

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RICARDO MURILO DIAS

ESTUDO DO DESGASTE POR ABRASÃO E PROJETO DE UM
ABRASÔMETRO DO TIPO RODA DE BORRACHA

7.5
Amilton

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo na disciplina
PMC-581 (Projeto Mecânico II)
Amilton Sinetov, orient

São Paulo

1999

Agradecimentos

A meus pais, João Carlos Dias e Maria Cristina Tambucci Dias, pelo apoio nas horas difíceis, pela paciência nos momentos decisivos e pela compreensão de minhas opiniões e decisões.

A meu avô Emílio Tambucci, por despertar o interesse por Engenharia Mecânica.

A minha namorada Juliana Peres Salomão Fernandes, pela paciência e pela compreensão nos momentos necessários.

Ao Professor Doutor Amilton Sinatora, pela oportunidade e pelas críticas e sugestões, tanto neste trabalho quanto em minha carreira profissional.

Ao Engenheiro Metalúrgico e Mestre em Engenharia Mecânica Giuseppe Pintaúde pela revisão do texto e pelas discussões e sugestões neste trabalho.

A Eutectic, na pessoa do Engenheiro Paulo Celso, pelo auxílio na fase de projeto do equipamento.

Aos amigos do Laboratório de Fenômenos de Superfície, pelas discussões e sugestões neste trabalho e em minha carreira profissional.

Aos amigos da Escola Politécnica pelo companheirismo e incentivo.

Aos amigos de São Caetano do Sul, pela compreensão nas situações necessárias.

Aos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo conhecimento transmitido.

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – POSSÍVEL CLASSIFICAÇÃO POR SITUAÇÃO CAUSADORA DE DESGASTE [4].....	9
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO POR SEVERIDADE PROPOSTA POR GATES [4].	10
TABELA 3 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TRIBO-MECÂNICAS E QUANTO AO DESGASTE DE ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO A TRÊS CORPOS [7].	16
TABELA 4 – SEPARAÇÃO DOS DIVERSOS ENSAIOS EM GRUPOS SEMELHANTES.	18
19	
TABELA 5 – PARÂMETROS DE ENSAIO PARA OS QUATRO PROCEDIMENTOS SUGERIDOS POR ASTM G 65 - 91 [1]. ..	22
TABELA 6 – FAIXAS TÍPICAS DE DESGASTE EM VOLUME [1].....	24
TABELA 7 – ORÇAMENTO DO EQUIPAMENTO RODA DE BORRACHA (12/1998).....	24
TABELA 8 – COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS RODA DE BORRACHA SECO E ÚMIDO [12].	26

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DOS MECANISMOS DE FRATURA DAS PARTÍCULAS (A) ABRASÃO (TENSÕES LOCALIZADAS) , (B) CLIVAGEM (FORÇAS DE COMPRESSÃO) E (C) FRATURA GENERALIZADA (FORÇAS DE IMPACTO) [6].....	6
FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE POR ABRASÃO SEGUNDO MISRA; FINNIE [5].....	8
FIGURA 3 – GRÁFICO DO COEFICIENTE DE DESGASTE X SUSCETIBILIDADE AO DESGASTE	19
FIGURA 4 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO EQUIPAMENTO [1].....	20
FIGURA 5 – CONJUNTO RESPONSÁVEL PELA PRODUÇÃO DO DESGASTE [1].....	22
FIGURA 6 – COMPARAÇÃO DAS REGIÕES DE ENTRADA DE PARTÍCULAS (1) E CENTRAL (2) DA MARCA DE DESGASTE PARA (A) AÇO AISI 1020 (HRB 75), (B) AÇO AISI 1090 (HRC 30), E (C) AÇO AISI 1080 (HRC 63) [12]. ...	27
FIGURA 7 – SEÇÃO IDEALIZADA DA REGIÃO ENTRE A RODA DE BORRACHA E O CORPO DE PROVA [11].....	28
FIGURA 8 – MICROGRAFIAS DOS TIPOS DE AREIA UTILIZADOS, (A) QUARZO TRITURADO E (B) SÍLICA AFS 50/70 (ADOTADA PELA ASTM G 65 – 91 [1]) [12].	29
FIGURA 9 – COMPARAÇÃO DOS DEBRIS GERADOS UTILIZANDO (1) SÍLICA AFS 50/70 E (2) QUARTZO TRITURADO, PARA (A) AÇO AISI 1020 (HRB 75) E (B) AÇO AISI 1080 (HRC 63) [12].	30
FIGURA 10 – INFLUÊNCIA DA DUREZA DA BORRACHA NA PERDA DE MASSA DE AÇO COM 1,10% DE CARBONO [11]. ...	31

SUMÁRIO

ÍNDICE DE TABELAS

ÍNDICE DE FIGURAS

INTRODUÇÃO	1
CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE DESGASTE POR ABRASÃO	3
CLASSIFICAÇÃO TRADICIONAL (POR CONFIGURAÇÃO)	3
CLASSIFICAÇÃO POR INTENSIDADE DE TENSÃO	5
CLASSIFICAÇÕES POR SITUAÇÃO E POR SEVERIDADE (GATES)	8
ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO	12
PARÂMETROS EXTRAÍDOS DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA COMPARATIVO ENTRE ENSAIOS	12
COMPARAÇÃO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO	14
ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO RODA DE BORRACHA	20
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO E PROJETO DO EQUIPAMENTO	21
DISCUSSÃO E ANÁLISE DO ABRASÔMETRO DO TIPO RODA DE BORRACHA	25
CONCLUSÕES	32
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

Introdução

Desgaste por abrasão, definido pela ASTM [1], é a perda progressiva de matéria da superfície provocada por partículas ou protuberâncias duras quando forçadas e movidas em relação à superfície de um sólido. O custo da abrasão é alto, estimado entre 1 e 4% do produto interno bruto (PIB) de uma nação industrializada. Isto é principalmente percebido em áreas como a agricultura, a mineração, o processamento de minérios, a movimentação de terra, isto é, todas as áreas que envolvem o manuseio de rochas, areia [2,3] ou qualquer outro tipo de partícula abrasiva.

Nota-se, na prática, que a combinação entre as características de equipamentos e componentes sujeitos à abrasão e a ocorrência de mecanismos distintos faz com que os pesquisadores busquem uma classificação, tanto para facilitar o intercâmbio de informações entre centros de pesquisa, quanto para possibilitar o entendimento das informações obtidas por pessoas que não estudam este tipo de fenômeno. Infelizmente não tem-se chegado a uma uniformidade nos vários sistemas de classificação, o que dificulta o uso correto de resultados publicados por terceiros [1,4].

Outro aspecto a se ressaltar são os vários tipos de ensaios que vêm sido empregados para se investigar o fenômeno. Alguns destes ensaios ainda não foram normalizados e, portanto, não possuem referências operacionais, o que dificulta comparações entre resultados obtidos por diferentes centros de pesquisa. Por outro lado, existem algumas normas que regulamentam alguns tipos de ensaios e são uma referência principalmente para comparações entre resultados. Por exemplo, a Norma ASTM G 65 – 91 [1] regulamenta o ensaio roda de borracha.

Este trabalho tem como principais objetivos apresentar e discutir os seguintes tópicos:

1. classificação dos vários tipos de desgaste por abrasão,
2. comparação entre alguns dos ensaios existentes para a investigação deste fenômeno;
3. projeto de construção do ensaio roda de borracha;
4. e alguns resultados e discussões sobre o referido ensaio.

Classificação dos tipos de desgaste por abrasão

Classificação tradicional (por configuração)

A classificação tradicional do desgaste por abrasão recai sobre dois grupos, abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos.

Tal classificação originou-se da definição de um sistema tribológico [4] onde tem-se o primeiro corpo, onde o desgaste ocorre ou é estudado; o segundo corpo (algumas vezes também denominado contra-corpo), que se movimenta relativamente e transmite direta ou indiretamente uma carga ao primeiro. Além destes elementos, podem ser considerados separadamente os elementos interfaciais (terceiro corpo) que são quaisquer materiais que se encontrem entre o primeiro e o segundo corpos (lubrificantes, poeira, partículas geradas pelo desgaste de algum dos corpos, etc.); além do meio ambiente, da força e movimento relativo entre os corpos [4].

A interpretação dominante é a que define a abrasão a dois corpos como o sistema onde as partículas abrasivas ou as asperezas estão rigidamente fixas no segundo corpo, permitindo a essas penetrarem profundamente e causarem riscos profundos no primeiro corpo; a abrasão a três corpos onde as partículas abrasivas estão suficientemente livres para rolares de maneira que estas não passam o tempo todo retirando material do primeiro corpo. Como consequência disso, os ensaios a abrasão a dois corpos produzem taxas de desgaste uma a três ordens de grandeza maiores que em ensaios a abrasão a três corpos [4].

Uma segunda interpretação que pode ser dada à classificação apresentada recai sobre a definição de primeiro e segundo corpos, isto é, abrasão a dois corpos ocorre

quando não existe o segundo corpo, ou seja, as partículas abrasivas se encontram livres segundo esta interpretação; enquanto que a abrasão a três corpos ocorre quando as partículas abrasivas se encontram confinadas entre os dois corpos. Nota-se que esta interpretação vai totalmente contra a interpretação dominante [4].

GATES [4] mostrou as discordâncias geradas por tal classificação. A interpretação dominante, por si só gera algumas discordâncias ao se analisar situações reais. Por exemplo, o ensaio da roda de borracha (ASTM G 65 – 91) [1] é classificado inicialmente como abrasão a três corpos, mas alguns autores observaram que, ao penetrarem na interface entre o corpo de prova e a roda, as partículas abrasivas ficam bloqueadas pela borracha no sentido de rolar, tornando-se um sistema a dois corpos [4].

A análise alternativa mostra problemas quando tem-se apenas um corpo e partículas abrasivas livres, como por exemplo uma calha transportadora de minérios. Esta interpretação classifica este caso como abrasão a dois corpos (primeiro corpo e partículas abrasivas), atendo-se à primeira definição de sistema tribológico, e indo de encontro à interpretação dominante.

MISRA; FINNIE [3] propuseram uma nova subdivisão para o caso de abrasão a três corpos (interpretação dominante) em casos de sistemas abertos e fechados. Sistemas abertos seriam os casos nos quais as partículas abrasivas se encontram livres de uma segunda superfície ou quando as duas superfícies estão suficientemente afastadas de tal maneira que as propriedades mecânicas de uma superfície não influem na outra. Por outro lado, os sistemas fechados seriam aqueles nos quais as superfícies dos corpos estão muito próximas umas das outras, permitindo apenas pequenas partículas abrasivas entre elas [3].

Nota-se que a classificação tradicional do desgaste por abrasão não é consensual e não alcança seu principal objetivo, uniformizar a linguagem para facilitar a comunicação entre pesquisadores. Apesar de existir uma interpretação dominante, a simples existência de uma interpretação alternativa causa problemas de comunicação.

Classificação por intensidade de tensão

AVERY [5] classificou o desgaste por abrasão em: erosão por partículas sólidas, abrasão a baixas tensões, abrasão a altas tensões e abrasão por goivadura ("gouging abrasion").

Embora AVERY tenha incluído o desgaste erosivo em sua classificação, este tipo de desgaste possui muitas particularidades que o separam do desgaste por abrasão e, portanto não será comentado.

A classificação proposta por AVERY tem sua origem no mecanismo de quebra do abrasivo, ou seja, o mesmo estava preocupado com o ponto de vista do produto final de indústrias de mineração, que é o material reduzido.

KELLY; SPOTTISWOOD [6] classificam em três os possíveis mecanismos de quebra de minérios:

- a) abrasão: a energia aplicada é insuficiente para provocar uma fratura significativa na partícula, apenas tensões localizadas são impostas de maneira que o produto se mostra fino e em grande número de fragmentos (Figura 1a);
- b) clivagem: a energia aplicada é suficiente apenas para provocar a fratura em poucas regiões das partículas. O produto da fratura possui um tamanho comparável ao original e se dá em um pequeno número de fragmentos. Esta situação ocorre

principalmente pela aplicação de forças de compressão sobre a partícula (Figura 1b);

e

- c) fratura generalizada: a energia aplicada é excessivamente maior que a necessária para a ocorrência da fratura da partícula, provocando a ocorrência de sobrecarga em várias regiões desta. O produto desta fratura apresenta grande número de fragmentos relativamente grandes. Esta situação ocorre quando da presença de cargas de impacto (Figura 1c).

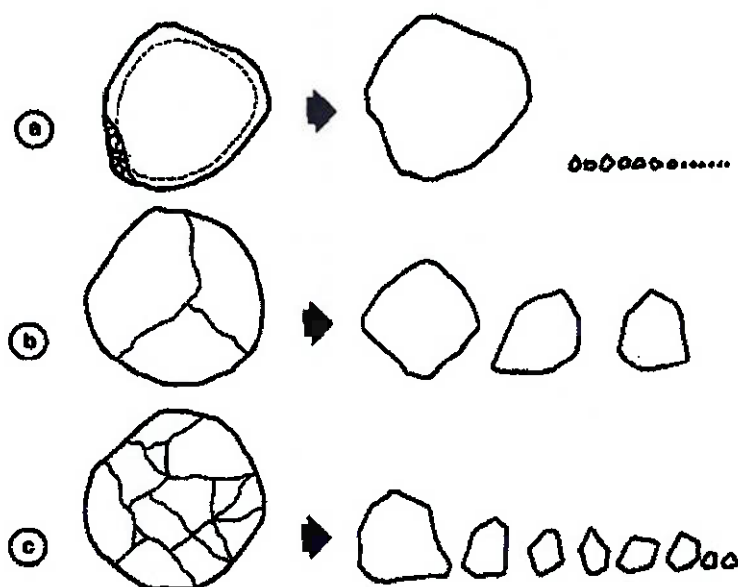


Figura 1 – Representação dos mecanismos de fratura das partículas (a) abrasão (tensões localizadas) , (b) clivagem (forças de compressão) e (c) fratura generalizada (forças de impacto) [6].

Vista a classificação dos mecanismos de quebra de partículas, AVERY propôs que a diferença entre o desgaste por abrasão a baixas tensões e a altas tensões é que no primeiro tipo as partículas abrasivas não se quebram e há formação de riscos na superfície desgastada, enquanto que no segundo tipo as partículas abrasivas se quebram

devido à carga aplicada, formando cantos vivos a todo momento, tornando a situação mais crítica para a superfície desgastada.

A transição de abrasão a altas tensões para abrasão por goivadura não é muito bem definida. Este último tipo as tensões são muito maiores que na primeira situação. É possível citar uma diferença prática entre as mesmas, pois as tensões de contato no caso de abrasão por goivadura são suficientes para causar deformação plástica generalizada no corpo desgastado, quando este é constituído por materiais que apresentam baixa a moderada tensão de escoamento (por exemplo, aços austeníticos ao manganês) [4], outra diferença é a presença de forças de impacto na abrasão por goivadura [7].

Algumas críticas a este tipo de classificação são, por exemplo, o fato da fronteira entre abrasão por goivadura e abrasão a altas tensões não estar bem definida e também a necessidade de dizer se as partículas abrasivas estão livres para rolar ou totalmente engastadas em uma das superfícies [4], entre outras. Além disso, relega a segundo plano propriedades das partículas abrasivas, como dureza e tenacidade à fratura, possibilitando a ocorrência de modificações no sentido da classificação. Por exemplo, um moinho de bolas que é classificado como ensaio de altas tensões, durante a moagem de talco, não reduz o tamanho deste abrasivo por mecanismo de cisalhamento, não fraturando o minério.

Na tentativa de elucidar tais dúvidas, MISRA; FINNIE [3] propuseram que esta última classificação fosse uma subdivisão da primeira (abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos) como uma subclasse do desgaste por abrasão a três corpos em sistemas abertos (Figura 2) [3].

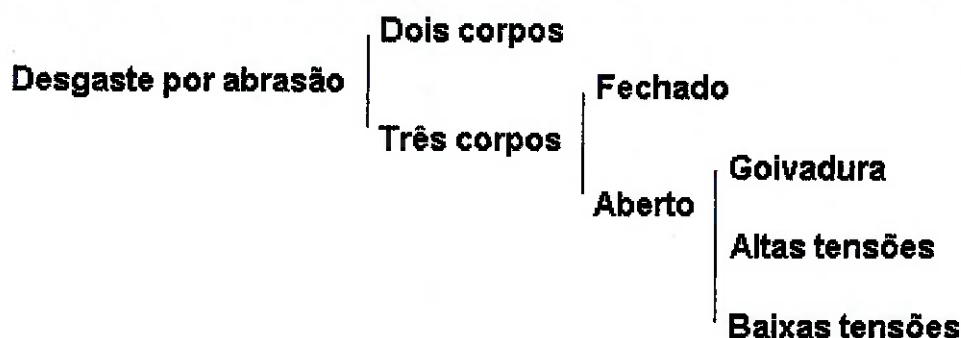


Figura 2 – Classificação do desgaste por abrasão segundo Misra; Finnie [5].

O refinamento proposto por MISRA; FINNIE [3] acaba também não sendo preciso. Por exemplo, ao analisar os casos de um britador de mandíbulas, um moinho autógeno e um processo de polimento fino, nota-se que ambos se encontram classificados no grupo de desgaste por abrasão a três corpos de sistema aberto, e sabe-se que nem a natureza do desgaste verificado, nem os mecanismos de desgaste são coincidentes [4].

GATES [4] sugere verificar as raízes das classificações e corrigi-las, ao invés de tentar combinar os tipos de classificação já existentes.

Classificações por situação e por severidade (GATES)

Com base nas discussões realizadas anteriormente sobre as classificações tradicional e por intensidade de tensão, GATES [4] sugeriu que a classificação tradicional deve ser abandonada devido às suas falhas e a classificação por intensidade de tensão também deixa a desejar. Com isto, o mesmo propõe dois tipos de classificação, um por situação (ou condição) e outro por severidade de desgaste.

GATES [4] justifica a classificação por situação devido a facilidade dos engenheiros em determinar tais situações macroscopicamente, tornando-se uma base para o aprofundamento do estudo do fenômeno (Tabela 1).

Tabela 1 – Possível classificação por situação causadora de desgaste [4].

		Tensões de contato		
		Baixas (partículas não se quebram)	Altas (partículas se quebram)	Extremas (deformação flagrante)
Partículas abrasivas	Livres	Baixas tensões, abrasivo livre	Altas tensões, abrasivo livre	
	Fixas	Baixas tensões, abrasivo fixo	Altas tensões, abrasivo fixo	Extremas tensões, abrasivo fixo

GATES [4] justifica a ausência do tipo de desgaste causado por extremas tensões e abrasivo livre devido à baixa probabilidade dos abrasivos se encontrarem livres com tamanhas tensões de contato agindo sobre os corpos.

A principal autocrítica à esta classificação é a ausência de outros parâmetros importantes para a definição de mecanismos e severidade do desgaste [4]. Além disto, esta classificação ainda é uma combinação de duas classificações já discutidas, recurso que GATES refuta.

Na tentativa de abranger o maior número possível de parâmetros na classificação do desgaste por abrasão, GATES [4] busca utilizar o conceito de severidade, bastante frequente na classificação do desgaste por deslizamento. GATES propõe para tanto que o desgaste por abrasão seja dividido em três classes de severidade: desgaste moderado, desgaste severo e desgaste extremo. Além disso GATES [4] propôs os mecanismos que levam a determinado tipo de desgaste e uma analogia com os termos até então utilizados (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação por severidade proposta por GATES [4].

Situação típica (a)	Severidade do desgaste		
	Moderado	Severo	Extremo
Tamanho da partícula	Pequeno	Moderado	Grande
Grau de engastamento	Livre	Parcialmente engastado pelo contra-corpo	Fortemente engastado
Forma da Partícula	Arredondada	Pontiaguda	Pontiaguda
Tensões de contato	Baixas (insuficientes para quebrar partículas)	Altas (suficientes para quebrar partículas)	Altíssimas (causa deformação macroscópica ou fratura frágil no material sendo desgastado)
Mecanismos dominantes (b)	Microsulcamento	Microcorte	Microcorte e/ou Microfratura
Termos equivalentes (c)	Abrasão a baixas tensões	Abrasão a altas tensões	Abrasão por goivadura
	Abrasão por riscamento (d)	Abrasão por polimento (d)	Altas tensões a dois corpos (e)
	Baixas tensões a três corpos (e)	Altas tensões a três corpos (e)	
		Altas tensões a dois corpos (e)	

(a) Nem todos os aspectos da "situação típica" aplicados simultaneamente.

(b) Os mecanismos de remoção de material são altamente dependentes deste.

(c) Já foi demonstrada a ambiguidade destes termos alternativos, assim, não é esperada uma completa correspondência com os novos termos.

(d) Termo não favorito mesmo em outras classificações alternativas.

(e) Interpretação dominante da distinção dois corpos/três corpos.

Algumas autocríticas surgiram para a classificação segundo a severidade do desgaste. Uma delas é que as fronteiras entre desgaste moderado e severo não são tão claras como no caso de desgaste por deslizamento, pois os mecanismos de desgaste não são competitivos entre si. Algumas situações onde as propriedades dos materiais dos corpos sofrem alterações não são bem explicadas por este tipo de classificação.

GATES constatou este tipo de situação em ensaios realizados com a configuração do ensaio da roda de borracha, porém utilizando uma roda de aço de baixa liga (600 HV). Ao ensaiar amostras de aço rápido M2 (880 HV) e de alumínio (80 HV), esperava-se que com as amostras de alumínio o sistema se mostrasse mais severo (segundo a classificação proposta por GATES). Entretanto, as amostras de aço rápido apresentaram perdas de massa muito maiores. Isto ocorreu devido a mudança de mecanismo de desgaste de abrasão a três corpos para abrasão a dois corpos (classificação tradicional), devido ao engastamento das partículas pelo material de menor dureza. No caso do alumínio, estas partículas acabam fornecendo maior resistência ao se engastarem, e no

caso do aço rápido, as partículas ao se engastarem no contra-corpo de aço atuam como em uma configuração a dois corpos, segundo a classificação tradicional [4].

Ensaio de desgaste por abrasão

Antes de se descrever alguns dos principais ensaios de desgaste por abrasão, se faz necessária a apresentação de alguns modelos matemáticos para taxa de desgaste, os quais fornecem parâmetros que torna possível a comparação entre os diversos ensaios.

Parâmetros extraídos de modelos matemáticos para comparativo entre ensaios

ARCHARD [8], através de uma análise física do desgaste por deslizamento, chegou a um modelo quantitativo de desgaste mais aceito entre os tribólogos, no qual a taxa de desgaste em termos de volume de material removido, V , é constante (volume de material por distância percorrida dV/ds) e não é afetada pelas mudanças na área de contato aparente (equação I).

Posteriormente, RABINOWICZ (1965) [9] através de uma análise geométrica e quantitativa das partículas abrasivas e aplicando o postulado da deformação plástica

$A = \frac{F}{H_s}$, onde A é a área real de contato, F , a força estática aplicada e H_s , a dureza da

superfície desgastada, chegaram a uma expressão semelhante a de ARCHARD [8].

$$V = \frac{kFs}{H_s}, \text{ onde:} \quad (I)$$

k – coeficiente de desgaste (depende do módulo de elasticidade e microestrutura da superfície desgastada assim como do tamanho e dureza das partículas abrasivas);

F – carga normal;

s – distância percorrida pelas partículas abrasivas para ocorrer o desgaste; e

H_s – dureza da superfície desgastada.

BLICKENSDETFER, preocupado em relacionar ensaios laboratoriais com ensaios de campo, definiu alguns parâmetros úteis para a abordagem do fenômeno. Sendo assim, definiu a intensidade de desgaste, w , ou o potencial instantâneo de uma superfície se desgastar em um determinado ponto por um contra-corpo (equação II) [7]

$$w = gp, \text{ onde:} \quad (II)$$

g – parâmetros de desgaste do contra-corpo (depende de propriedades do contra-corpo e parâmetros ambientais, como, temperatura, pH e composição da mistura); e

p – a pressão aplicada no ponto de desgaste.

Outro parâmetro do modelo proposto por BLICKENSDETFER é a suscetibilidade ao desgaste, B , definida como a razão entre o volume de material desgastado e por unidade de energia, E , aplicada (equação III) e depende de propriedades físico-mecânicas do material e de aspectos ambientais [7].

$$B = \frac{dV}{dE} \quad (III)$$

Assim, um material com suscetibilidade ao desgaste B e intensidade de desgaste w apresentará um volume de material removido dado pela equação IV que pode ser reduzida à de Archard (equação I) [7].

$$V = \iint Bw \, dA \, ds = \iint Bgp \, dA \, ds \quad (IV)$$

De posse dos conceitos definidos nos modelos de ARCHARD e de BLICKENSDECKER – coeficiente de desgaste k e suscetibilidade ao desgaste – será descrito algum dos principais ensaios de laboratório empregados para avaliar a resistência ao desgaste por abrasão.

Comparação das principais características de ensaios de desgaste por abrasão

Existem vários ensaios de desgaste por abrasão sendo utilizados em laboratório para se estudar a abrasividade de um sistema frente a um determinado material, e/ou a interação entre abrasividade e corrosividade deste sistema, além de possibilitar a seleção adequada de materiais. A Tabela 3 contém um resumo de dez ensaios laboratoriais de desgaste por abrasão.

Na Tabela 3 pode-se destacar três grupos distintos quanto às principais características dos ensaios, como seguem:

Grupo 1 – Ensaios onde a ação de polimento por atrito é o mecanismo de desgaste predominante. Tal ação é caracterizada pela rolagem e pelo deslizamento das partículas abrasivas, tanto sobre a superfície a ser desgastada, quanto sobre as próprias partículas, ficando em segundo plano os efeitos das forças de compressão e cisalhamento sobre as partículas entre as superfícies dos corpos desgastados. Nesta classe de ensaios o coeficiente de desgaste k , estimado para situações típicas, é menor que $100E-06$, e a suscetibilidade ao desgaste B é menor que $0.5 \text{ mm}^3/\text{kJ}$. Fazem parte deste grupo os ensaios do tipo YGP, Moinho de matelos, “tribotester” e moinho de rolos [7].




Grupo 2 – Neste grupo se encontram ensaios onde são predominantes os efeitos das forças de compressão, cisalhamento e impacto, e, o efeito do atrito é menos importante, ao contrário dos ensaios classificados no grupo anterior. Neste caso, os valores de k são


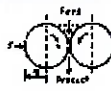

maiores que $1000\text{E-}06$ e, seguindo a mesma tendência, os valores de B são maiores que $1\text{ mm}^3/\text{kJ}$. Os ensaios moinho de bolas marcadas, britador de mandíbulas, eletrodo rotativo e roda de borracha se encontram neste grupo [7].



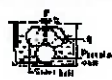
Grupo 3 – Os ensaios aqui incluídos não possuem um mecanismo de desgaste predominante, tanto as forças de compressão e cisalhamento quanto o efeito do polimento por atrito se mostram presentes. Quanto aos parâmetros de comparação do desgaste, estes ensaios se localizam na faixa entre o grupo 1 e o grupo 2, isto é, os valores de k ficam entre $100\text{E-}06$ e $1000\text{E-}06$ e os valores de B se encontram entre 0.5 e $1\text{ mm}^3/\text{kJ}$. Este grupo engloba os ensaios radioquímico e coluna de partículas abrasivas carregada [7].

A Tabela 4 apresenta uma outra forma de apresentar a divisão em grupos de ensaios.

Tabela 3 – Comparação das características tribo-mecânicas e quanto ao desgaste de ensaios de desgaste por abrasão a três corpos [7].

	Ensaio de Yancey, Geer e Price (YGP)	Moinho de Martelos	"Tribotester"
			
Configuração			
Dimensões	$R=0.095\text{ m}$ $n=(1470 \pm 30)\text{ rpm}$ $z=4\text{ amostras}$	$R=0.077\text{ m}$ $n=2800\text{ rpm}$ $z=2\text{ amostras}$	$R=0.025\text{ m}$ $n=100\text{ rpm}$ $z=1\text{ amostra}$
Condições de Alimentação			
Tipo	Combustível e Mineral	Combustível	Combustível
Úmido ou Seco	Úmido e Seco	Seco	Úmido e Seco
Tamanho do Abrasivo	6.7-0 mm	1.18-0.60 mm	1.18-0.60 mm
Peso/Taxa de alimentação	2 kg	0.10 kg/min.	0.050 kg
Condições de Desgaste (típicas)			
Carga	$F_a=F_c=295\text{ N}$	$F=53\text{ N}$	$F=1960\text{ N}$
Distância Percorrida	$s=7163\text{ m}$	$s=6780\text{ m}$	$s=50\text{ m}$
Duração do Teste	$td=12000\text{ revol.}$	$td=14000\text{ revol.}$	$td=400\text{ revol.}$
Material de Referência	Aço Doce	Ni-duro 2	Aço Doce
Dureza da Superfície (HV)	$H_s=165 \pm 15$	$H_s=500$	$H_s=160$
Volume de Desgaste (típico)	$V=8\text{ mm}^3$	$V=5\text{ mm}^3$	$V=4\text{ mm}^3$
Carga x Distância percorrida	$F_s=2150\text{ kNm}$	$F_s=370\text{ kNm}$	$F_s=100\text{ kNm}$
Coefficiente de Desgaste	$k=6E-06$	$k=70E-06$	$k=70E-06$
Energia Fornecida	$EI=4700\text{ kJ}$	$EI=360\text{ kJ}$	$EI=35\text{ kJ}$
Suscetibilidade ao desgaste	$B=1.7E-03\text{ mm}^3/\text{kJ}$	$B=1.4E-02\text{ mm}^3/\text{kJ}$	$B=1.1E-01\text{ mm}^3/\text{kJ}$
Precisão	Coef. Var. 5%		Coef. Var. 5%

	Britador de Mandíbulas	Moinho de Rolos	Ensaio Radioquímico
			
Configuração			
Dimensões	Altura de queda=0.003 m $n=260\text{ ciclos/min.}$ $z=1\text{ mandíbula móvel}$	$R=0.050\text{ m}$ $n=460\text{ rpm}$ $z=2\text{ rolos}$	$R1=0.0127\text{ m}$ $R2=0.0190\text{ m}$ $n=40\text{ rpm}$ $z=8\text{ bolas}$
Condições de Alimentação			
Tipo	Mineral	Combustível	Combustível e Mineral
Úmido ou Seco	Seco	Úmido e Seco	Úmido e Seco
Tamanho do Abrasivo	50-38 mm	6.7-0 mm	1.18-0.60 mm
Peso/Taxa de alimentação	4 x 27 kg	3 kg at 15 kg/h	0.050 kg
Condições de Desgaste (típicas)			
Carga	$F=12500\text{ N}$	$F=176\text{ N}$	$F=284\text{ N}$
Distância Percorrida	$s=47\text{ m}$	$s=1734\text{ m}$	$s=160\text{ m}$
Duração do Teste	$td=60\text{ min.}$	$td=720\text{ s}$	$td=2000\text{ revol.}$
Material de Referência	Aço de baixa liga	Aço ferramenta	Ni-duro 2
Dureza da Superfície (HV)	$H_s=275$	$H_s=550$	$H_s=500$
Volume de Desgaste (típico)	$V=650\text{ mm}^3$	$V=0.4\text{ mm}^3$	$V=3\text{ mm}^3$
Carga x Distância percorrida	$F_s=60\text{ kNm}$	$F_s=300\text{ kNm}$	$F_s=45\text{ kNm}$
Coefficiente de Desgaste	$k=2980E-06$	$k=7E-06$	$k=320E-06$
Energia Fornecida	$EI=590\text{ kJ}$	$EI=10800\text{ kJ}$	$EI=10\text{ kJ}$
Suscetibilidade ao desgaste	$B=1.1\text{ mm}^3/\text{kJ}$	$B=3.7E-02\text{ mm}^3/\text{kJ}$	$B=3.0E-01\text{ mm}^3/\text{kJ}$
Precisão	Coef. Var. 5%	Coef. Var. 4%	

	Moinho de Bolas Marcadas	Roda de Borracha	Eletrodo Rotativo
			
Configuração			
Dimensões	R1=0.10 m R2=0.0127 m n=70 rpm z= 14 bolas marcadas de 126	R=0.10 m n=200 rpm z=1 amostra	R=0.0127 m n=250 rpm z=3 bolas de aço
Condições de Alimentação			
Tipo	Mineral	Abrasivo Se	Mineral
Úmido ou Seco	Úmido e Seco	Seco	Úmido
Tamanho do Abrasivo	2.0-0 mm	0.3-0.2 mm	2.0-0 mm
Peso/Taxa de alimentação	1.15 kg	0.13 kg/min.	1.150 kg
Condições de Desgaste (típicas)			
Carga		F=132 N	F=2.4 N
Distância Percorrida		s=1436 m	s=1200 m
Duração do Teste	td=1200 s	td=685 s	td=60 min.
Material de Referência	Aço de baixa liga	Aço Doce	Aço Alto C, baixa liga
Dureza da Superfície (HV)	Hs=500	Hs=165	Hs=500
Volume de Desgaste (típico)	V=276 mm ³	V=120 mm ³	V=20 mm ³
Carga x Distância percorrida		Fs=190 kNm	Fs=2.9 kNm
Coefficiente de Desgaste		k=1020E-06	k=33000E-06
Energia Fornecida	EI=124 kJ		
Suscetibilidade ao desgaste	B=2.2 mm ³ /kJ		
Precisão	Coef. Var. 2-5%	Coef. Var. 5%	Coef. Var. 2-4%


	Coluna de Abrasivos Carregada
	
Configuração	
Dimensões	R=0.036 m n=20 rpm
Condições de Alimentação	
Tipo	SiC
Úmido ou Seco	Úmido e Seco
Tamanho do Abrasivo	0-0.25 mm
Peso/Taxa de alimentação	Altura da coluna 0.04-0.075 m
Condições de Desgaste (típicas)	
Carga	F=20 N
Distância Percorrida	s=220 m
Duração do Teste	td=1000 revol.
Material de Referência	Aço Doce
Dureza da Superfície (HV)	Hs=165
Volume de Desgaste (típico)	V=3 mm ³
Carga x Distância percorrida	Fs=4.3 kNm
Coefficiente de Desgaste	k=980E-06
Energia Fornecida	
Suscetibilidade ao desgaste	
Precisão	Coef. Var. 4%

Tabela 4 – Separação dos diversos ensaios em grupos semelhantes.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Coefficiente de desgaste	$k < 100E-06$	$k > 1000E-06$	$100E-06 < k < 1000E-06$
Suscetibilidade ao desgaste (mm^3/kJ)	$B < 0.5$	$B > 1$	$0.5 < B < 1$
Mecanismo de quebra predominante	Polimento por atrito	Forças de compressão e cisalhamento	Múltiplos mecanismos

A divisão apresentada na Tabela 4 é reforçada pela observação das características das superfícies após a ocorrência do desgaste (mecanismos) [7].

SPERO e co-autores [7] notam que, segundo a classificação proposta por MISRA; FINNIE [3], todos os ensaios relatados recaem sob um mesmo grupo: abrasão a três corpos em sistema aberto à altas tensões.

Pode-se propor que uma classificação dos ensaios, portanto, por meio da avaliação dos parâmetros k e B , pois foi possível distinguir três grupos entre os ensaios.

Tomando-se os valores para k e B apresentados na Tabela 3, é possível verificar que existe uma correlação entre k e B ($R^2 = 0,91$) (Figura 3). Tal observação reforça a validade e a semelhança das abordagens propostas por ARCHARD e BLICKENSDEFER. Nesta análise não foram incluídos 4 ensaios de laboratório apresentados na Tabela 3, os quais não forneciam dados completos. Além disto, incluiu-se um ensaio de campo – moinho anel-bola, e excluiu-se os dados referentes ao britador de mandíbulas devido à dificuldade do tratamento estatístico destes valores, perante os outros dados disponíveis.

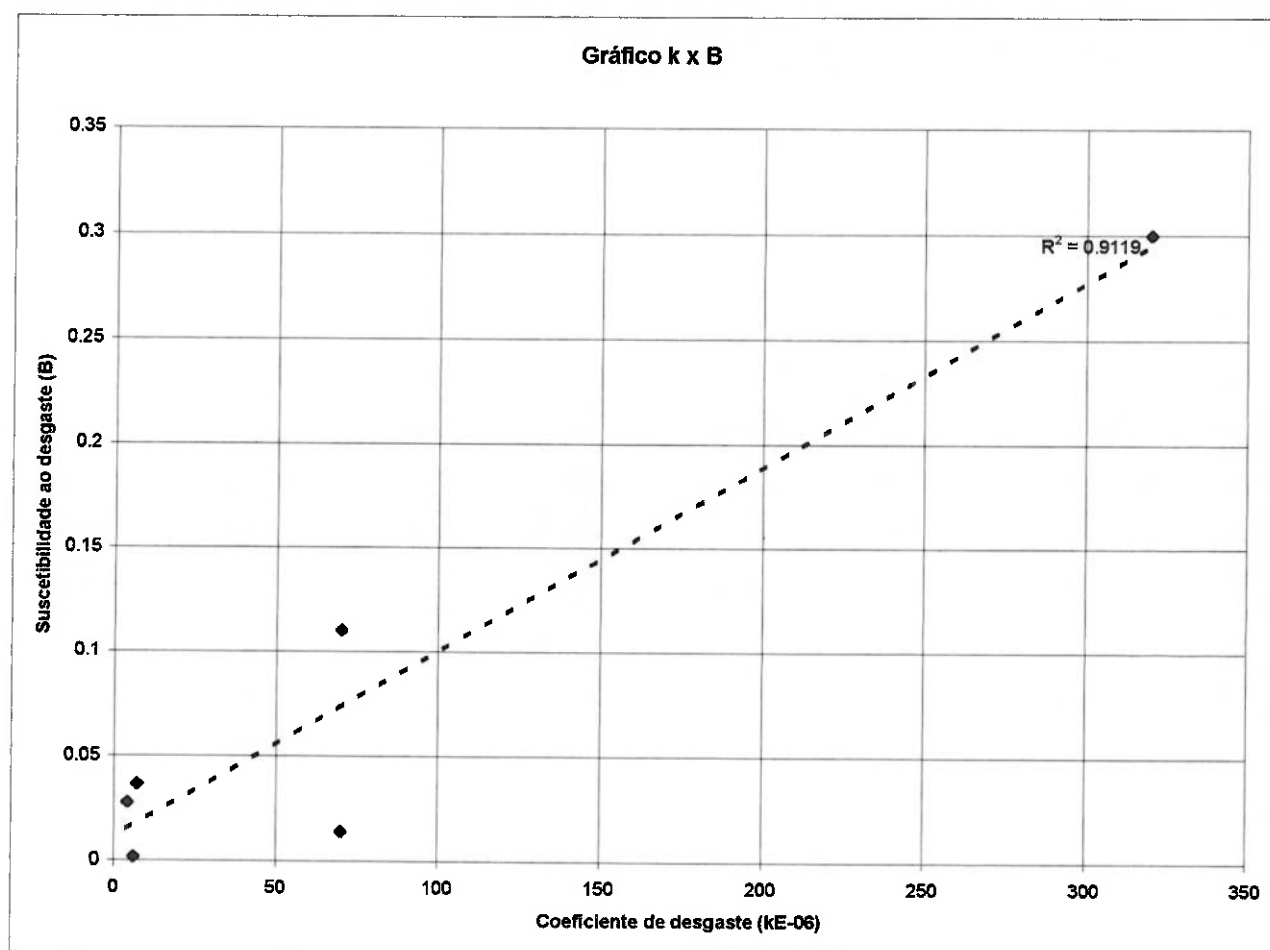


Figura 3 – Gráfico do coeficiente de desgaste x suscetibilidade ao desgaste

SPERO e co-autores [7] mostraram, para o ensaio YGP (laboratorial) e o moinho anel-bola (ensaio de campo), a existência de uma considerável correlação ($R^2 > 60\%$). Sugere-se observar esta característica entre outros ensaios laboratoriais e outros equipamentos de campo.

Ensaio de desgaste por abrasão roda de borracha

Considerações iniciais

O Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LFS – EPUSP) sentiu a necessidade de desenvolver um abrasômetro do tipo roda de borracha (Figura 4) com o objetivo de avançar no conhecimento do fenômeno desgaste por abrasão, oferecendo a oportunidade de projetar e construir tal equipamento a um aluno de graduação em engenharia mecânica.

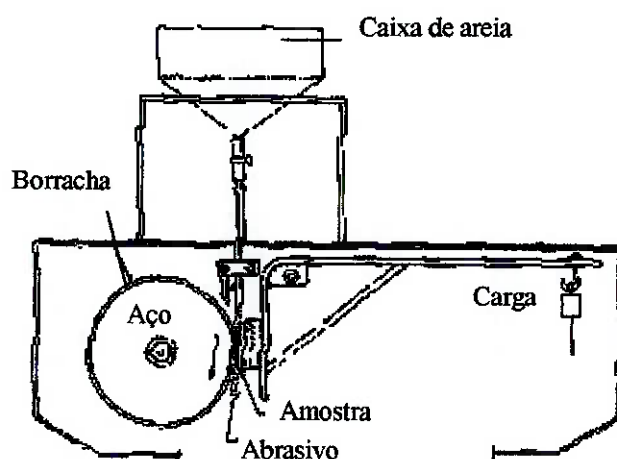


Figura 4 – Desenho esquemático do equipamento [1].

Os motivos pelos quais se optou por esta configuração de ensaio de desgaste por abrasão foram:

1. o caráter normalizado do ensaio (ASTM G 65 – 91) [1], o que facilita o intercâmbio de informações entre pesquisadores, tornando mais rápido o desenvolvimento de conclusões;

2. a grande quantidade de ensaios já realizados por diversos centros de pesquisas nacionais e internacionais. O ensaio de desgaste do tipo roda de borracha é o que gera maior número de resultados sobre desgaste por abrasão no mundo [10];
3. a correlação de seus resultados com equipamentos em escala de produção [10];
4. a possibilidade do estudo das incertezas quanto ao fenômeno do desgaste por abrasão envolvidas neste tipo de equipamento;
5. o custo relativamente baixo do equipamento; entre outros.

Nota-se que existem várias configurações possíveis para a realização deste ensaio, entre elas, versões seca e úmida, com alimentação em sistemas aberto e fechado, com amostras dispostas nas posições vertical e horizontal, etc. Este estudo trata da configuração proposta pela Norma ASTM G 65 – 91 [1], apesar de apresentar discussões envolvendo outras configurações.

Características do ensaio e projeto do equipamento

A Norma ASTM G 65 – 91 [1] apresenta alguns elementos da máquina como imprescindíveis para garantir a uniformidade de resultados entre laboratórios. Estes elementos são: o tipo de borracha utilizado na confecção do “pneu” de borracha, o tipo e a forma das partículas abrasivas utilizadas no ensaio, posicionamento e dimensões da abertura do bico direcionador das partículas e o sistema de alavancas sugerido para garantir a força desejada e requerida pela Norma [1]. A Figura 5 mostra um desenho do conjunto responsável pela geração dos dados do ensaio de desgaste. Todos os elementos citados foram construídos segundo as recomendações da Norma.

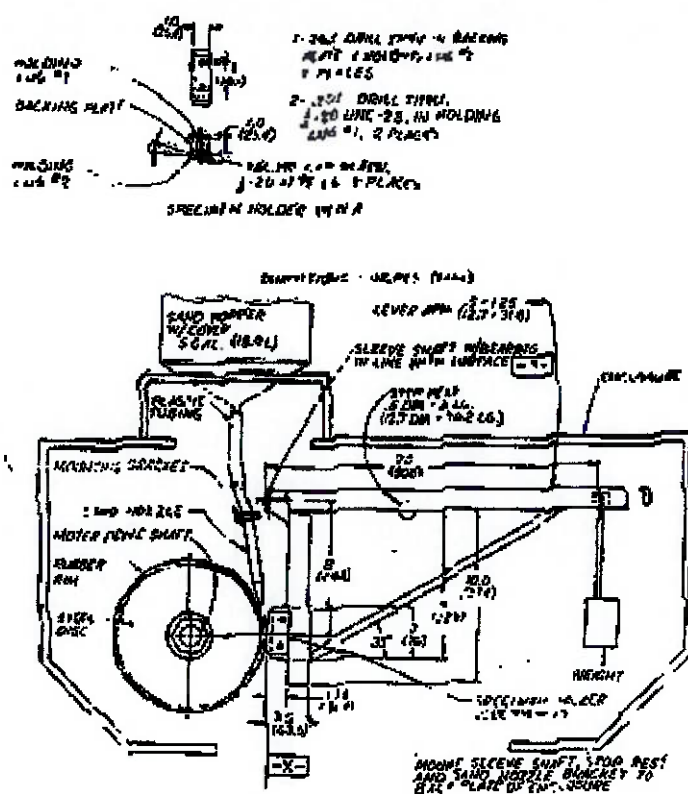


Figura 5 – Conjunto responsável pela produção do desgaste [1].

Quatro procedimentos de ensaios são sugeridos, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de ensaio para os quatro procedimentos sugeridos por ASTM G 65 - 91 [1].

Procedimento	Carga sobre a amostra ¹ (N)	Revoluções	Abrasão linear ² (m)
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71.8
D	45	6000	4309

1 - Tolerância de +/- 3%

2 - Para uma roda de 228.6 mm de diâmetro

O sistema motor sugerido para o equipamento é um motor de corrente contínua de 1 HP de potência acoplado a um sistema de transmissão por engrenagens de relação de transmissão 10/1 (entrada/saída), e o sistema deve manter uma rotação de 200 ± 10 rpm,

sob carga [1]. O equipamento projetado utiliza um motor de corrente alternada trifásico de 2 HP de potência acoplado a um sistema de transmissão por engrenagens planetárias de relação de transmissão 11/1 (entrada/saída), o que supera as expectativas de torque, rotação e potência requeridas pelo ensaio.

Esta modificação é consequência da possibilidade de estudos futuros em desgaste por abrasão em componentes de borracha (pneus, solas de sapato, etc.), o que, por cálculos preliminares, requer torque e potência maiores que os estudados para o ensaio roda de borracha tradicional, devido ao atrito.

A Norma ASTM G 60 – 85 [1] define procedimentos de preparação de corpos de prova de diversos materiais e procedimentos de manutenção da roda de borracha (componente). O cálculo do desgaste em termos de volume é calculado segundo a equação V. Devido à redução do diâmetro da roda de borracha durante a realização do ensaio é necessária uma correção neste valor dada pela equação VI.

$$\text{Desgaste em volume (mm}^3\text{)} = \frac{\text{perda de massa (g)}}{\text{densidade (g/cm}^3\text{)}} \times 1000 \quad (\text{V})$$

$$\text{Desgaste corrigido (mm}^3\text{)} = \text{Desgaste em volume (mm}^3\text{)} \times \frac{228.6 \text{ mm (9.00")}}{\text{diâmetro da roda após o ensaio}} \quad (\text{VI})$$

A precisão e a acuidade dos resultados de ensaios realizados de acordo com os procedimentos sugeridos pela Norma ASTM G 65 – 91 [1] pode variar devido a pequenas alterações nos parâmetros de ensaio, por exemplo, a dureza da borracha. Pelo menos cinco ensaios com os materiais de referência são necessários para se determinar a precisão do equipamento utilizado [1].

Acredita-se que seguindo as sugestões propostas pela Norma ASTM G 65 – 91 [1], os resultados dos ensaios forneçam um coeficiente de variação inferior a 7% em materiais que apresentam um desgaste em volume entre 20 e 60 mm³.

A Tabela 6 apresenta algumas faixas típicas de desgaste em volume para os materiais de referência através de dois tipos de procedimentos [1].

Tabela 6 – Faixas típicas de desgaste em volume [1].

Material	Procedimento A, mm ³	Procedimento D, mm ³
1 - Aço inoxidável 316 (Rb-80)	260 +/- 20	75 +/- 8
2 - Aço AISI 1090 normalizado 900°C (24-26 HRC)	80 +/- 8	29 +/- 4
3 - Aço inoxidável 17-4PH envelhecido (500°C) (43 HRC)	225 +/- 20	66 +/- 5
4 - Aço ferramenta AISI D2 temperado (59-60 HRC)	36 +/- 3	-
5 - Stellite 1016 com superfície endurecida (57-58 HRC)	21 +/- 4	-
6 - Carbetto de tungstênio sinterizado	1.5 +/- 1	-

O custo do equipamento (R\$ 1817,00), orçado em dezembro de 1998 é apresentado na Tabela 7, nota-se o baixo custo em comparação com outras configurações de ensaios de desgaste por abrasão.

Tabela 7 – Orçamento do equipamento roda de borracha (12/1998)

Produto	Especificação	Fabricante	Preço (R\$)	Observação
Inversor de Freqüência	2CV, monofásico, 220V	WEG	547.00	Sem IPI
Moto-Redutor de Velocidade	motor 2 CV WEG 4 pólos, redutor 11:1	SM CYCLO	540.00	Sem IPI
	CNHM2-4105-11			
Usinagem e Soldagem	Ponteira	Oficina Mecânica	200.00	Já fabricado
	Roda de Aço	Oficina Mecânica	30.00	Estimativa
	Porta Amostra	Oficina Mecânica	30.00	Estimativa
	Sistema de Alavancas	Oficina Mecânica	50.00	Estimativa
	Corte e Dobra de Chapas	Oficina Mecânica	70.00	Estimativa
	Placas de acrílico	Oficina Mecânica	50.00	Estimativa
	Soldagem	Oficina Mecânica	50.00	Estimativa
Outros	Parte feita de borracha	Fabricante de artefatos de borracha	100.00	Estimativa
	Parafusos, porcas e ferragens	Loja de ferragens	100.00	Estimativa
	Instalação elétrica	Loja de artigos elétricos	50.00	Estimativa
			1,817.00	TOTAL

Vê-se pelo custo do equipamento apresentado na Tabela 7 que o ensaio é acessível a centros de pesquisa e até particulares que pretendam estudar o fenômeno do desgaste por abrasão através de um ensaio normalizado (ASTM G 65 – 91 [1]).

Discussão e análise do abrasômetro do tipo roda de borracha

Este tipo de ensaio de desgaste por abrasão foi inicialmente estudado por Roy Haworth em 1949 [10] e até hoje gera discussões sobre os fenômenos envolvidos no desgaste produzido por esta configuração de equipamento.

Uma característica do equipamento bastante discutida no início deste trabalho é quanto à classificação do ensaio roda de borracha, se a dois ou a três corpos. Acredita-se que, dependendo de certas condições de contorno do ensaio, tais como dureza da amostra, dureza da borracha presente na roda, etc., pode-se estudar os dois tipos de desgaste. Uma consequência da ausência de uma classificação do desgaste por abrasão consensual é a discussão do ponto de vista de tensões. Tradicionalmente classifica-se o ensaio da roda de borracha como um sistema sob baixas tensões. AVERY [11] propôs uma classificação do tipo ensaio de desgaste por abrasão a três corpos com ampla faixa de tensões aplicadas, tamanha a incerteza sobre esta variável.

Outro aspecto importante deste tipo de ensaio é a possibilidade de adaptá-lo para uma versão úmida, onde a alimentação não mais se dá através da gravidade e de uma ponteira dosadora, e sim por meio de palhetas dispostas na lateral da roda de borracha que, por sua vez, está embebida em uma “lama” de abrasivos [10,12]. SWANSON, KLANN [12] mostraram as diferenças entre as duas configurações e concluíram que para materiais com dureza mediana (HRC 20 a HRC 50), a resistência ao desgaste não é afetada pela mudança de condição seca/úmida. Por outro lado, materiais com elevada

dureza (HRC 63) apresentam resistência ao desgaste consideravelmente menor na versão seca do ensaio [12]. A Tabela 8 mostra alguns resultados que mostram essa diferença.

Tabela 8 – Comparação dos ensaios roda de borracha seco e úmido [12].

Material	Dureza Rockwell	Resistência ao desgaste relativa ao aço 1090	
		úmido	seco
1020	B75	0.319	0.355
1080	C44	0.826	0.775
	C54	1.28	0.958
	C63	1.94	1.24
1090	C29	1	1
15B35	C45	0.625	0.542
	C54	1.32	0.983

Uma das principais diferenças entre os ensaios úmido e seco é a temperatura atingida pela amostra durante a execução deste, apesar de que ainda não se conseguiu medir a temperatura na interface (região de maior interesse). No ensaio seco a amostra atinge temperaturas entre 100°C a 462°C [10,12] o que pode levar a uma deterioração da parte fabricada em borracha do equipamento, além de poder alterar propriedades mecânicas do corpo de prova. ZUMPARO Jr. e co-autores [10] propuseram um sistema de refrigeração forçada do porta amostras sugerido pela Norma ASTM G 65 – 91 [1] na tentativa de minimizar o efeito da elevação da temperatura durante o experimento [10]. O caso úmido não apresenta problemas com elevação excessiva de temperatura.

AVERY [11] discutiu a distribuição da carga aplicada sobre a amostra e concluiu, como SWANSON, KLANN [12], que, na região de entrada das partículas abrasivas, se observa os mecanismo de desgaste de microcorte e deformações plásticas, dependendo do material do corpo de prova, enquanto que na região central da área de atuação dos

abrasivos observa-se predominantemente o mecanismo de microcorte. A Figura 6 mostra micrografias das regiões acima citadas para três materiais diferentes [12].

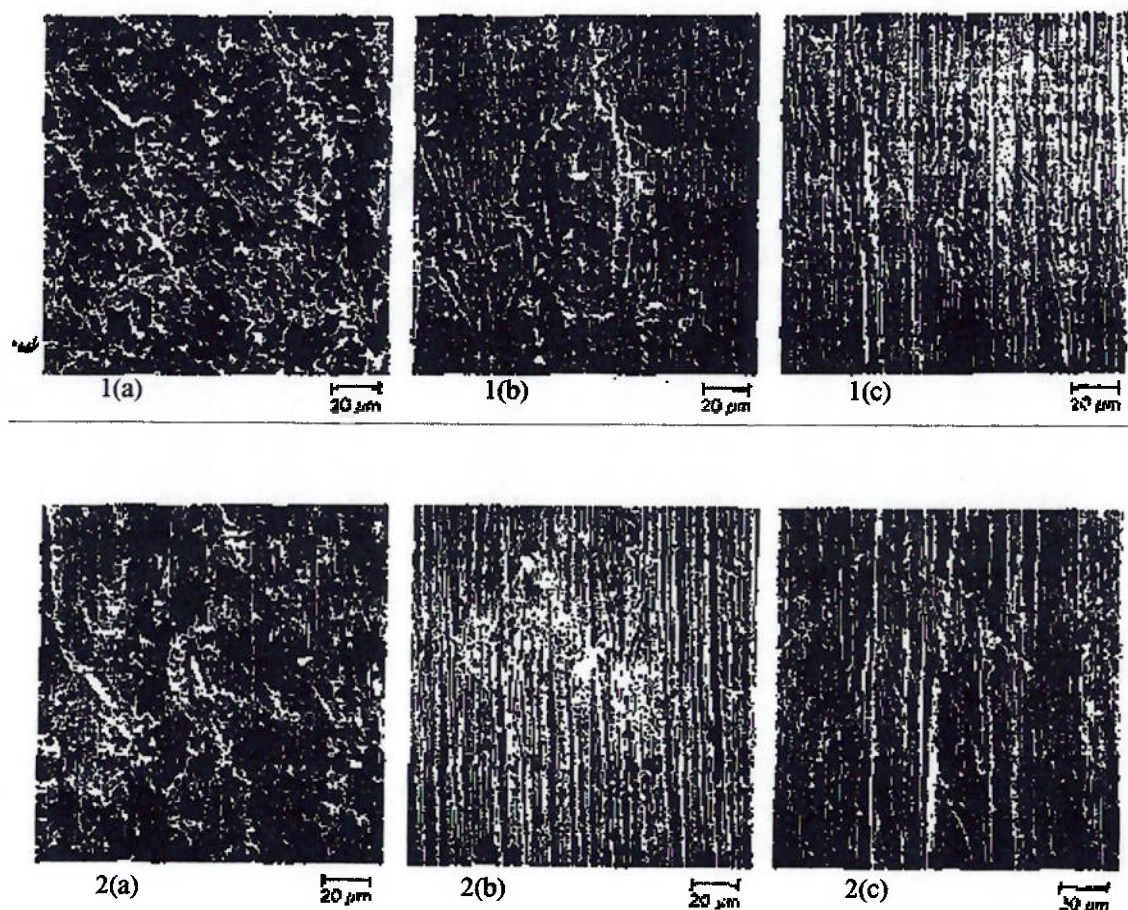


Figura 6 – Comparação das regiões de entrada de partículas (1) e central (2) da marca de desgaste para (a) aço AISI 1020 (HRB 75), (b) aço AISI 1090 (HRC 30), e (c) aço AISI 1080 (HRC 63) [12].

Uma das explicações dadas a esta diferença de condições de desgaste é a transição da morfologia do desgaste a três corpos (partículas livres) para desgaste a dois corpos (partículas engastadas) [10]. Por sua vez, a proporção dos mecanismos de microcorte e deformação plástica foi explicada como função da dureza do material do corpo de prova [12].

O tipo de abrasivo utilizada na execução destes experimentos se mostra importante, tanto no tamanho das partículas quanto na forma das mesmas. A Figura 7 mostra uma seção idealizada por AVERY [11] da região interfacial do contato, demonstrando a importância do controle do tamanho das partículas abrasivas para a determinação da carga aplicada sobre cada partícula e, conseqüentemente, para a determinação das tensões aplicadas sobre o corpo de prova.

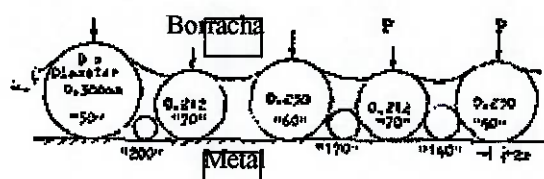


Figura 7 – Seção idealizada da região entre a roda de borracha e o corpo de prova [11].

SWANSON, KLANN [12] mostraram a influência da forma das partículas abrasivas no resultado dos ensaios. Foram utilizados dois tipos de areia, uma de quartzo triturado (forma pontiaguda) e a outra de sílica AFS 50/70 (forma arredondada) (Figura 8). Constatou-se uma maior resistência ao desgaste quando foi utilizado quartzo quebrado, apenas variando o grau de aumento da resistência de acordo com o material. Este resultado é contrário aos encontrados por MOORE; SWANSON [13], que utilizando os mesmos abrasivos, encontraram maior desgaste de aços temperados e revenidos em presença de quartzo triturado, ou seja, com maior angularidade.

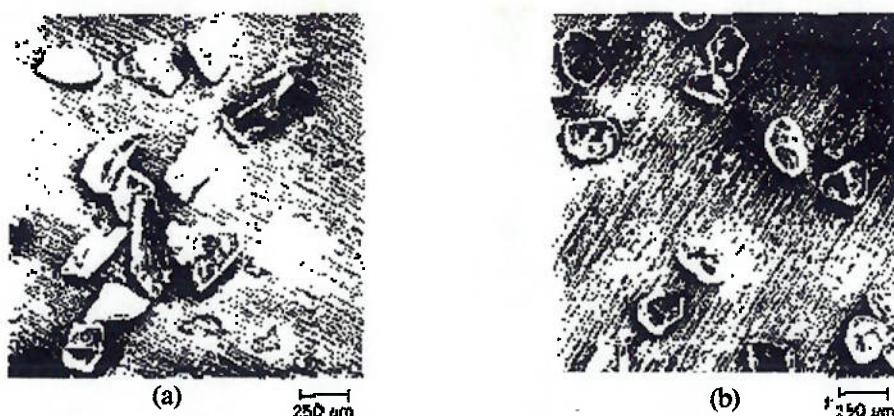


Figura 8 – Micrografias dos tipos de areia utilizados, (a) quartzo triturado e (b) sílica AFS 50/70 (adotada pela ASTM G 65 – 91 [1]) [12].

Outro aspecto estudado por SWANSON, KLANN [12] foi a forma do material retirado do corpo de prova por abrasão em função do tipo da forma das partículas abrasivas utilizadas no ensaio, possibilitando a determinação dos mecanismos de desgaste para diversos materiais. Por exemplo, através desta análise verificou-se para o aço AISI 1020 (HRB 75) que o mecanismo de desgaste predominante não é o de microcorte, mas sim a deformação plástica, devido a forma “amassada” e quebradiça dos cavacos. Para o aço AISI 1080 (HRC 63) o mecanismo de desgaste é notadamente o microcorte: o material retirado do corpo de prova apresenta longos filetes, parecidos com os que saem de uma operação de torneamento [12]; independente do tipo de abrasivo utilizado (Figura 9).

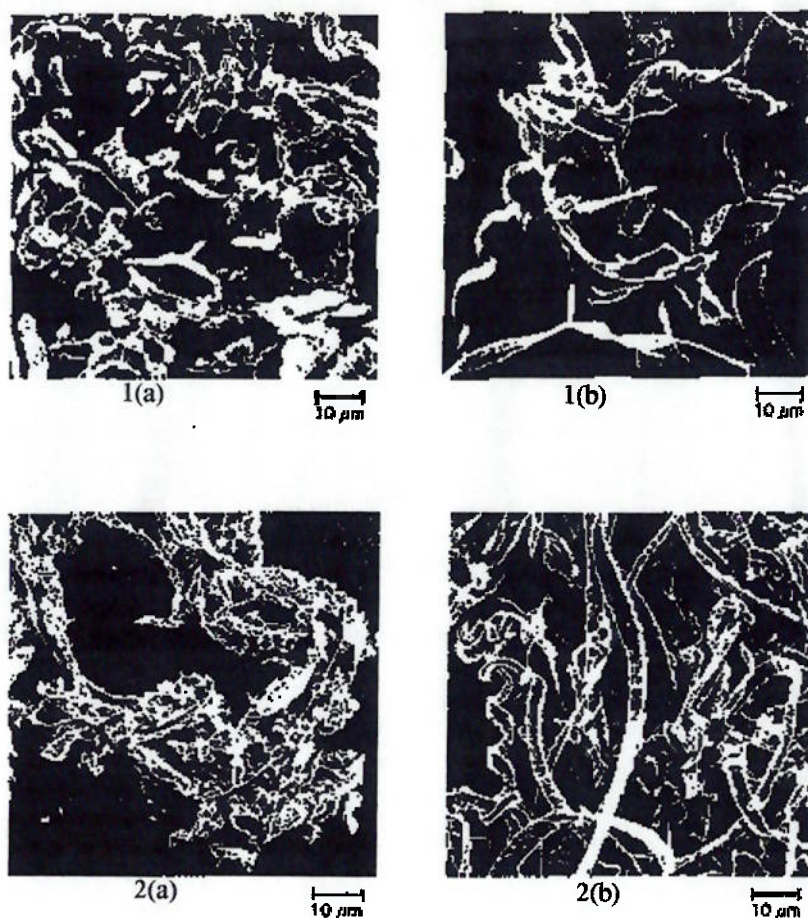


Figura 9 – Comparação dos debrís gerados utilizando (1) sílica AFS 50/70 e (2) quartzo triturado, para (a) aço AISI 1020 (HRB 75) e (b) aço AISI 1080 (HRC 63) [12].

A dureza da borracha é um importante parâmetro, com pequenas modificações nesta característica se obtém resultados muito diferentes. AVERY [11] mostrou a influência desta propriedade ao ensaiar um aço com 1,10% de carbono em areia de quartzo (Figura 10). Pouco se sabe sobre a influência real da dureza da borracha e sobre a variação desta propriedade conforme a duração do ensaio [12].

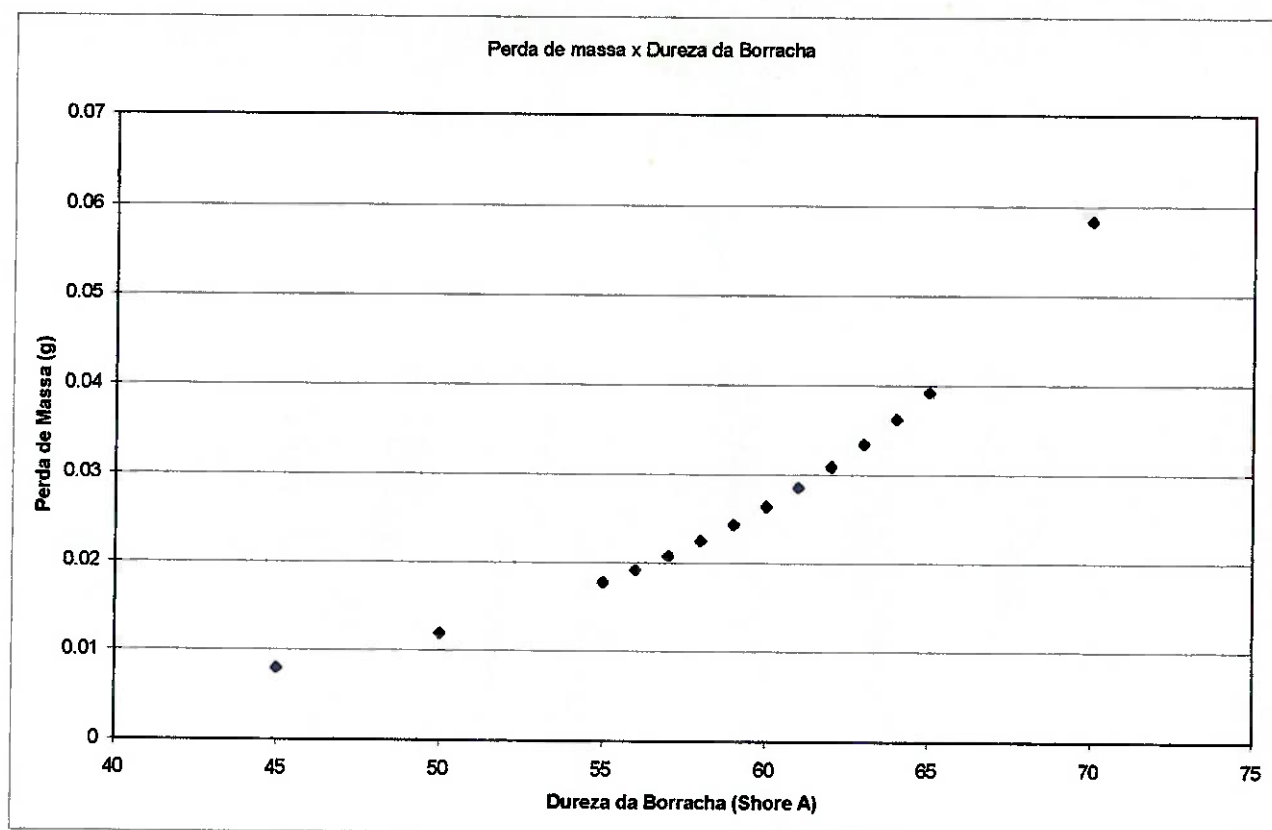


Figura 10 – Influência da dureza da borracha na perda de massa de aço com 1,10% de carbono [11].

Esta discussão mostra a complexidade dos fenômenos envolvidos no ensaio de desgaste por abrasão roda de borracha, desde a diversidade de configurações possíveis até o estudo do movimento da partícula na região interfacial. Ainda assim, não foram abordados todos os parâmetros influentes no ensaio, tais como, umidade do meio ambiente, forma da alimentação das partículas abrasivas, etc.

Conclusões

1. Nota-se que o estudo do desgaste por abrasão, apesar de evoluído, apresenta várias possibilidades de estudo dos pontos de vista fenomenológico e classificatório. A falta de uma classificação totalmente clara, dificulta a comunicação dos diversos centros de pesquisa no mundo.
2. A variedade de ensaios existentes é importante no sentido de tentar-se reproduzir situações semelhantes às experimentadas em equipamentos em escala de produção, mas dificulta o alcance de um consenso quanto à determinação das propriedades referentes ao desgaste do material. Esforços vem sendo feitos no sentido de criar-se normas e ensaios que regulamentem a prática desta investigação.
3. Nota-se ser possível a discussão de uma nova classificação segundo a distinção entre diferentes ensaios realizada por SPERO e co-autores [7]. Nesta classificação, a proposta de AVERY volta a ser importante, e as demais propostas de classificação por configuração acabam sendo menos relevantes.
4. Uma característica importante do ensaio de desgaste por abrasão do tipo roda de borracha é a existência de uma versão normalizada (ASTM G 65 – 91 [1]), o que facilita o intercâmbio de informações/resultados entre pesquisadores e determina um método padrão para a estimação da abrasividade dos materiais, acelerando a obtenção de conclusões sobre as propriedades dos materiais.
5. Há dificuldade de classificação do ensaio roda de borracha quanto aos mecanismos de desgaste (dois corpos ou três corpos, altas tensões ou baixas tensões). Acredita-se que a classificação em ensaio de desgaste por abrasão a três corpos com ampla faixa

de tensões aplicadas, proposta por AVERY [11], seja a mais coerente com a situação real.

6. A versão úmida do ensaio roda de borracha apresenta uma taxa de desgaste menor que a versão seca, provavelmente, devido à mistura água/óleo funcionar como um lubrificante do sistema, reduzindo as forças tangenciais na versão úmida. A diferença da resistência ao desgaste resultantes dos ensaios seco e úmido varia com o material. A temperatura atingida pelo sistema tribológico na versão seca pode ser um causador de mudanças de propriedades físicas, tanto no corpo de prova quanto na roda de borracha.
7. Existem variações nas conclusões quanto aos resultados dos ensaios com diferentes tipos de abrasivo.
8. O ensaio roda de borracha é muito sensível a alguns parâmetros, entre eles, a dureza da borracha, portanto, faz-se necessária uma avaliação desta propriedade durante o ensaio, pois constatou-se que esta varia com o tempo de ensaio.

Sugestões de Trabalhos Futuros

Baseando-se nas referências bibliográficas utilizadas neste trabalho, sugere-se os seguintes trabalhos:

1. Estudo aprofundado da classificação do desgaste por abrasão.
2. Análise da correlação existente entre os diversos modelos de desgaste por abrasão.
3. Análise da correlação existente entre os diversos ensaios de desgaste por abrasão.
4. Projeto da adaptação do ensaio roda de borracha (ASTM G 65 – 91 [1]) para a versão úmida.
5. Avaliação da variação do desgaste com diversos tipos de partículas abrasivas.
6. Análise de tensões devido à distribuição de carga devido ao contato real entre o corpo de prova e as partículas abrasivas.
7. Avaliação das forças tangencias (atrito) no ensaio roda de borracha.

Referências bibliográficas

- [1] Norma ASTM G 65 – 91, Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, Em: Annual Book of Standards, V.03.02, ASTM, 1992, pp. 239 - 251;
- [2] TYLCZAK, J. H., OREGON, A.; Abrasive Wear, Em: ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, v.18, ASM INTERNATIONAL, 1992, pp. 184-190;
- [3] MISRA, A., FINNIE, I.; A Classification of Three-Body Abrasive Wear and Design of a New Tester, **Wear**, 60, 1980, pp. 111 -121;
- [4] J. D. Gates, Two-body and three-body abrasion: A critical discussion, **Wear**, 214, 1998, pp. 139 - 146;
- [5] AVERY, H. S.; Work Hardening in Relation to Abrasion Resistance, Em: Materials for the Mining Industry, Simposium, 1974. **Proceedings**. Barr, R. Q., ed. Climax Molybdenum, pp. 43 – 77;
- [6] KELLY, E. G., SPOTTISWOOD, D. J.; **Introduction to Mineral Processing**, Wiley Interscience, Auckland, 1982, pp. 117 – 118;
- [7] SPERO, C., HARGREAVES, D. J., KIRKCALDIE, R. K., FLITT, H. J.; Review of test methods for abrasive wear in ore grinding, **Wear**, 146, 1991, pp. 389 - 408;
- [8] ARCHARD, J. F.; Contact and rubbing of flat surfaces, **J. Appl. Phys.**, 24, 1953, pp. 981 – 988;
- [9] RABINOWICZ, E.; **Friction and Wear of Materials**, Willey Sons, 1965;

- [10] ZUMPANO Jr, P., CORNACHIONI, D.D., DE MELLO, J.D.B.; Abordagem global do estudo do processo abrasivo, Parte 3: Projeto, construção e avaliação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha, Em: I Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste, Associação brasileira de metais, 1989, **Anais**, pp. 63 - 76;
- [11] AVERY, H. S.; An analysis of the rubber wheel abrasion test, Em: Int. Conf. of Wear of Materials, 1981. **Proceedings**. Rhee, S. K., Ruff, A. W., Ludema, K. C., eds., ASME, pp. 367 - 377;
- [12] SWANSON, P. A., KLANN, R.W.; Abrasive wear studies using the wet and dry sand rubber wheel tests, Em: Int. Conf. of Wear of Materials, 1981. **Proceedings**. Rhee, S. K., Ruff, A. W., Ludema, K. C., eds., ASME, pp. 379 – 389;
- [13] MOORE, M. A.; SWANSON, P. A.; The effect of particles shape on abrasive wear: a comparison of theory and experiment, Em: Int. Conf. on Wear of Materials, 1983. **Proceedings**. Ludema, K. C., ed., 1993, pp. 1 – 11.