

CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE ABRASÔMETRO DO TIPO RODA-DE-BORRACHA PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE AÇOS

L. Villabón, A. Sinatora

villabon@usp.br, sinatora@usp.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Fenômenos de Superfície Universidade de São Paulo, São Paulo-Brasil.

RESUMO

O ensaio de abrasão, tipo roda-de-borracha (norma ASTM G-65), é muito utilizado na indústria de mineração e transporte de terras, para caracterizar e hierarquizar materiais em função da sua resistência ao desgaste. Os equipamentos com essa configuração não dispõem de instrumentação que permita a aquisição, o controle e armazenamento de parâmetros do tribossistema. Neste trabalho, é descrita a instrumentação de um abrasômetro tipo roda-de-borracha, construído e calibrado conforme a norma ASTM G-65. A instrumentação permitiu o controle da força normal aplicada e da velocidade de rotação da roda, medir a temperatura na amostra e a força de atrito. O equipamento permitiu medir variações da força de atrito devido ao tipo de aço, magnitude da força normal aplicada e tamanho do abrasivo. Além disso, observou-se que a redução do tamanho do abrasivo provocou diminuição do desgaste, sendo esse efeito dependente da carga aplicada e não apenas do material ensaiado, como mostrado na literatura. Formulou-se também uma hipótese para explicar por que outros equipamentos não permitiram constatar variações na força de atrito em função do tamanho do abrasivo, da força normal e do material.

Palavras chave: desgaste abrasivo, roda-de-borracha, força de atrito.

1- INTRODUÇÃO

1.1- Importância do tema

Na indústria mundial, uma das maiores preocupações é o desgaste de equipamentos porque é a mais frequente causa de falha do maquinário ou parte dele, ocasionando perdas por paradas inesperadas, manutenção e reposição. O desgaste apresenta-se sob diferentes tipos; sendo mais frequentes os desgastes: abrasivo, erosivo, por deslizamento e por fadiga de contato (DIN 50320).

O desgaste abrasivo é um dos principais tipos de desgaste, sendo um dos mais intensos e dos mais encontrados na prática,

sendo responsável por 50 % das causas de falhas das máquinas ou componentes (Eyre, 1991). Além disso, o desgaste abrasivo tem especial importância nas atividades agrícolas, de transporte e de mineração, atividades de importância estratégica para países como o Brasil e a Colômbia.

Diante disso é importante a avaliação do desgaste abrasivo em laboratório para o melhor entendimento de fenômenos de desgaste e para o desenvolvimento de materiais ou equipamentos.

O abrasômetro tipo roda-de-borracha é um dos dispositivos mais antigos para avaliação de desgaste abrasivo em laboratório. Ele foi responsável pela maioria dos dados de

desgaste disponíveis na literatura até a década de 70 (Borik, 1972). Este equipamento foi apresentado pela primeira vez por Haworth (1948) e consiste em uma roda-de-borracha que gira em contato com a superfície do corpo-de-prova, com abrasivo na interface. Este equipamento permite realizar ensaios a seco ou a úmido, com alta confiabilidade de resultados, sendo empregado tradicionalmente na indústria de mineração; usa-se para classificar materiais quanto a sua resistência ao desgaste.

Uma limitação destes equipamentos é a impossibilidade de se medir a força de atrito durante o ensaio, o que dificulta a estimativa da energia gasta no processo de desgaste. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um abrasômetro do tipo roda-de-borracha capaz de medir a força de atrito com uma sensibilidade que permite avaliar o efeito do tamanho de grão do abrasivo, e do tipo de material ensaiado no coeficiente de atrito.

1.2- Conteúdo

Este trabalho descreve a construção de um equipamento do tipo roda-de-borracha conforme as indicações da norma ASTM G-65. Apresenta-se em seguida a construção de um equipamento instrumentado para controlar a aplicação da força normal, capaz de adquirir dados das forças normal e tangencial, velocidade rotacional e temperatura. A seguir apresentam-se resultados de desgaste para cargas entre 15 e 100 N, dois tamanhos de sílica: 150 e 300 μm , em dois materiais, aço AISI 1004 e aço AISI D2.

2- OBJETIVOS

Os objectivos deste trabalho são:

1. Construir e avaliar um abrasômetro tipo roda-de-borracha, semelhante ao especificado pela norma ASTM G-65.
2. Construir um dispositivo instrumentado capaz controlar a carga normal e monitorar as cargas normal e tangencial, velocidade de rotação da roda e a temperatura da amostra.
3. Verificar se o novo equipamento permite determinar a influência do material, da carga e

do tamanho do abrasivo no coeficiente de atrito e no desgaste.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A construção do equipamento foi dividida em duas etapas. Uma primeira com as diretrizes da norma ASTM G-65, construindo-se uma configuração chamada de sistema mecânico na qual a força é aplicada por um braço alavanca, e a velocidade de rotação do disco é controlada manualmente por meio de um inversor de frequência.

Tendo como base o sistema mecânico foi desenvolvido e acoplado um dispositivo capaz de impor força normal e velocidade de rotação, medir e adquirir sinais de força normal, tangencial, velocidade de rotação e temperatura. Dispositivo chamado de sistema instrumentado.

3.1- Materiais

A estrutura da máquina foi construída de aço AISI 1020, e as partes da máquina unidas mediante solda e parafusos. A transmissão constituiu-se de um moto-reductor e um sistema flexível por correia-polia, para minimizar a vibração e obter a velocidade rotacional de 200 rpm no disco recoberto com borracha. Para a confecção do disco recoberto com borracha foi necessário usinar um disco que encaixa-se em um molde, para posteriormente vulcanizar na sua superfície o polímero (clorobutil) com as especificações da norma. O bico de alimentação do abrasivo foi constituído de aço inox, dimensionado com as indicações da norma, proporcionando uma cortina homogênea de abrasivo na interface corpo-de-prova/roda-de-borracha. O braço de alavanca para aplicação da carga foi calculado e construído com as condições dimensões da norma, e material (aço AISI 1020).

Sobre a estrutura anteriormente descrita e sem realizar modificação alguma foi acoplado o sistema instrumentado, o qual foi equipado com um sistema para variação das rotações da roda-de-borracha mediante o uso de um inversor de frequência comandado por uma unidade de controle,

computador e dispositivos periféricos; um sistema de contagiros equipado com pinhão coleta os valores de velocidade rotacional. Para a aplicação, controle e coleta de dados de cargas e temperatura foram usadas duas células de carga, um termopar e uma unidade de aquisição e controle, que funciona com linguagem de programação para Windows 98. Paralelamente foi desenvolvido um sistema de extração de poeira e insuflamento de ar que proporciona conforto e segurança à saúde devido à presença de pós gerados durante o processo de desgaste.

Foram confeccionados corpos-de-prova para a realização dos ensaios, de aços AISI D2 e AISI 1004 com dimensões 76,2 x 25,4 x 12,7 mm. O aço AISI D2 teve um tratamento térmico de austenitização a 1010 °C por 25 min, foi feito um resfriamento ao ar e revenimento a 205 °C por 1 hora.

Um dos abrasivos usados para a padronização do sistema mecânico foi areia para fundição Steel 70 (doada pela empresa Steel-Flux do Brasil), denominada como areia ST-13, e que para o presente trabalho foi chamada de areia 50/70, devido à distribuição granulométrica ser próxima desta classificação segundo a ASTM. Outro tipo de areia que foi usada para padronizar, tanto o sistema mecânico quanto o sistema instrumentado foi a Areia Normal Brasileira (ANB), definida como material natural quartzoso extraído do Rio Tietê no município de São Paulo, e distribuída pelo IPT (São Paulo), e que já tem sido utilizada em trabalhos executados em abrasômetros tipo roda-de-borracha (Zumpano Jr., Cornachioni; De Mello, 1989).

3.2- Aparato e metodologia experimental

Na Figura 1 é apresentado o equipamento mostrando o sistema de transmissão e contagiros.

Na Figura 2 se apresenta uma parte do sistema instrumentado de aplicação da carga, controle coleta de dados.



Fig 1 - Abrasômetro tipo roda-de-borracha, mostrando o sistema de transmissão: A - polia; B - correia; C - eixo; D - contagiros; E - redutor; F - motor.



Fig 2 - Abrasômetro tipo roda-de-borracha, mostrando na foto o sistema mecânico e instrumentado: A - disco de borracha; B e C - células de carga normal e tangencial; D e E: porta-amostras dos sistemas mecânico e instrumentado; F - Braço para ensaios mecânicos; G - termopar; H - bico alimentador do abrasivo; e I - exaustor de poeira

Para o procedimento de padronização dos sistemas mecânicos e instrumentados realizou-se o procedimento recomendado pela norma ASTM G-65, tendo como força normal aplicada sobre a amostra de 130 N, velocidade de rotação de 200 rpm, tempo total de ensaio de 30 min, aço AISI D2, e análise de resultados mediante análises estatísticas do coeficiente de variação da perda de volume (inferior a 7 %).

Após padronização do equipamento foram realizados ensaios com tempo constante de 10 minutos e cargas de 15, 30, 50 e 100 N empregando-se areias ANB 50 e 100 (300 μ m e 150 μ m). Os valores de rotação da roda recoberta por borracha, temperatura e coeficiente de atrito são valores médios dos

480 pontos finais de cada ensaio. Este procedimento foi adotado uma vez que o sistema levava 120 segundos para se estabilizar e este período estava, com segurança, excluído do período que abarca os 480 pontos finais de cada ensaio. Os valores da variação da temperatura não foram apresentados uma vez que não apresentaram variação significativa para as cargas, tempo de ensaio e velocidade de rotação empregada.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Avaliação dos sistemas mecânicos e instrumentados

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de velocidade de rotação, força normal, força tangencial, e coeficiente de atrito em função do tempo. As forças normal e tangencial, e por tanto o valor do coeficiente de atrito, demoram aproximadamente 60 s para se estabilizar, isto devido à inércia do sistema e às limitações do conjunto de instrumentação. Considerou-se que era razoável manter a duração do ensaio em 30 minutos uma vez que o período necessário para estabilizar o sistema e a aquisição de dados correspondia a 1/30 do tempo total de ensaio, ou seja, 3,3 %.

Após este período o sistema se estabiliza, embora ainda com flutuação dos valores, devido aos choques dos grãos de areia contra o corpo e o contra-corpo, e à mudança contínua no contato corpo-de-prova, borracha e material abrasivo, mesmo com o sistema de retroalimentação para corrigir os valores de carga normal aplicada. Esta limitação existe devido ao tempo de resposta do sistema. Considerando a Figura 3, foram calculadas as variações nos valores de força normal e tangencial, valores não superiores ao 1 % do valor da variável.

Observa-se que os valores de temperatura são crescentes, devido ao atrito na interface, atingindo valores inferiores a 70 °C nos ensaios com aço AISI D2. Este valor de temperatura não diminui significativamente a dureza do AISI D2 por revenido.

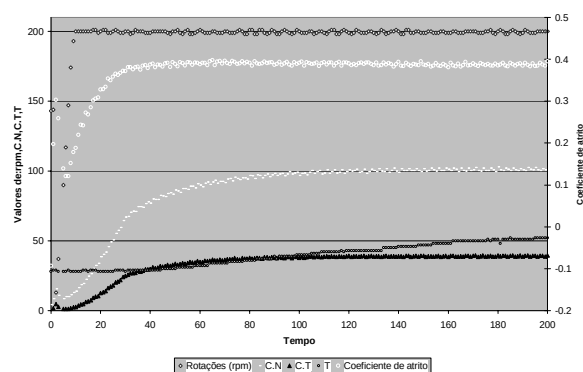


Fig 3. Variáveis adquiridas em ensaios realizados no abrasômetro instrumentado do tipo roda-de-borracha. CN: Força normal, CT: Força tangencial, T: Temperatura

Nos ensaios com sistema mecânico e areia Steel 50/70 ocasionaram perda de volume de $2,8 \pm 0,45 \text{ mm}^3$, com coeficiente de variação de 18 %, portanto, fora do máximo valor recomendado pela norma que é 7 %. Avaliou-se a excentricidade do disco e o seu alinhamento em relação ao porta-amostra, com ajuda do relógio comparador verificando-se que ambos poderiam ser diminuídos. Isto foi feito mediante nova usinagem do eixo e nova montagem, mais cuidadosa. Realizaram-se novos ensaios, obtendo perda de volume de $6,5 \pm 0,7 \text{ mm}^3$, com coeficiente de variação de 7,7 %, ainda fora do permitido pela norma. Atribuiu-se a amplitude do coeficiente de variação à heterogeneidade do abrasivo. Para investigar esta hipótese realizaram-se novos ensaios, agora com areia ANB padronizada pelo IPT e já empregada por Zumpano.; Cornachioni; De Mello (1989). Com este procedimento obteve-se que o valor médio de perda-de-volume é de $11,5 \pm 0,45 \text{ mm}^3$, com valor de coeficiente de variação de 3,8 %, inferior aos 7 % requeridos pela norma ASTM G-65.

Nos ensaios com sistema instrumentado foram mantidas as condições de ensaio recomendadas pela norma, alterando-se apenas o modo de aplicação da carga normal. Com estes resultando foi realizada a análise estatística seguido as recomendações da norma ASTM G-65, resultado em um coeficiente de variação de 4,31 %, valor inferior ao máximo valor de 7 % permitido pela mesma norma.

Na Figura 4 são resumidos os valores médios dos coeficientes de variação para todos os ensaios realizados. Verificando-se que, para os ensaios mecânicos e instrumentados realizados com o abrasivo ANB 50, o coeficiente de variação é menor que 7 %. Este resultado mostra que o ajuste do sistema devido à diminuição da excentricidade é tão importante quanto à qualidade do abrasivo.

Chama a atenção na bibliografia o fato de não se empregar explicitamente o procedimento recomendado na norma nem a respectiva análise estatística para padronização dos equipamentos. Também notou-se que a padronização do equipamento com materiais diferentes a os recomendados pela norma ASTM G-65 (Stevenson; Hutchings, 1996). Neste trabalho a reprodutibilidade dos resultados é considerada “boa” sem que se apresente um valor quantitativo da variabilidade do equipamento. A exceção à abordagem qualitativa é o trabalho de Zumpano.; Cornachioni; De Mello, (1989), no qual os procedimentos da norma são seguidos obtendo-se coeficientes de variação dentro dos limites impostos pela norma (até 6,9 %). Diante deste único resultado relatado na literatura, os valores de 3,8 e 4,3 % para o coeficiente de variação obtidos neste trabalho podem ser considerados satisfatórios.

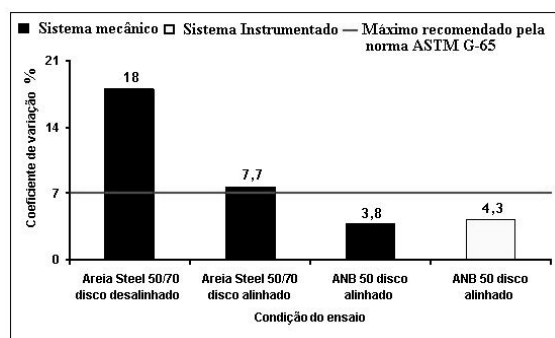


Fig 4 Calibração dos sistemas mecânico e instrumentado

4.2- Evolução do desgaste em função do tamanho do abrasivo e da carga

Na Figura 5 e Tabela 1, mostram-se os resultados de perda de volume para os dois

aços em função do tipo de abrasivo e da carga normal aplicada. Pode-se afirmar que à medida que se aumenta a carga normal, o desgaste também aumenta independente do material ensaiado, conforme amplamente comentado na literatura tanto em ensaios com abrasômetros pino-contra-disco, (Nathan; Jones, 1966); (Misra; Finie, 1981). E em abrasômetros roda-de-borracha, (Misra; Finnie, 1980); (Stevenson;; Hutchings, 1996). Verifica-se também, que o desgaste é sensível ao tamanho do abrasivo, observando-se que para tamanhos maiores de abrasivo, os valores de desgaste também serão maiores, mantidas as cargas constantes. Por fim, observa-se, como era de se esperar, que o aço AISI 1004 apresenta maior desgaste que o aço AISI D2, independente do tipo de abrasivo ou carga aplicada utilizada.

Tabela 1 Resultados e análise percentual da perda de volume nas diferentes condições de ensaios

	PERDA DE VOLUME (mm ³)					
	Aço AISI 1004			Aço AISI D2		
	ANB 100	ANB 50	Incremento (%)	ANB 100	ANB 50	Incremento (%)
15 N	5,46	7,56	38	0,52	0,65	25
30 N	23,67	28,95	22	1,26	1,84	46
Incremento (%)	333	282		142	183	
50N	41,40	65,40	58	2,33	2,95	27
Incremento (%)	75	126		85	60	
100 N	104,79	199,20	90	3,13	3,60	15
Incremento (%)	153	204		34	22	

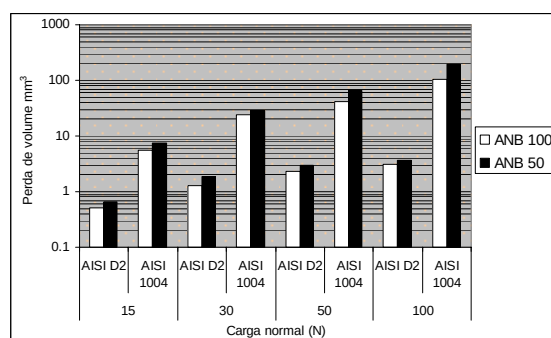


Fig 5 Perda de volume em função da carga normal e tipo de abrasivo para ensaios realizados com aços AISI 1004 e D2

O desgaste do aço AISI 1004 foi maior quando o ensaio de desgaste foi realizado com abrasivo mais grosso. Comparando-se os efeitos da mudança de abrasivo de ANB

100 para ANB 50, nota-se que a perda de volume aumenta de 38 % para carga de 15 N, 22 % para carga de 30 N, 58 % para carga de 50 N e 90 % para carga de 100 N.

A diminuição da perda de massa com a diminuição do tamanho de grão abrasivo para cada carga estudada pode ser explicada pela mudança dos mecanismos de desgaste. Na Figura 6(A), apresenta-se a superfície do aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 100. Observam-se microimpressões devido ao rolamento das partículas abrasivas na superfície do aço. Com este movimento o abrasivo danifica o material por sucessivas deformações plásticas e a remoção do mesmo deve se dar por fractura como ocorre nos fenômenos de fadiga de baixo ciclo. Na Figura 6(B), apresenta-se a superfícies do aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 50; observa-se a presença do mecanismo de sulcamento (ou de corte).

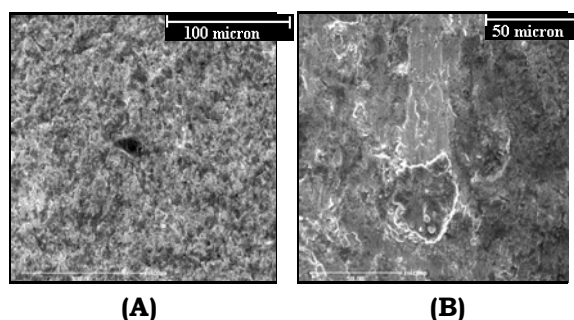


Fig 6 Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 100, Figura (A), e abrasivo ANB 50, Figura (B). Foto MEV

Evidências dos mecanismos de desgaste atuantes nos ensaios com aço AISI D2 (ensaiado com areia ANB 100) podem ser observados na Figura 7. Observam-se evidências de deformação plástica e de vazios. Em alguns dos vazios menores, observou-se que a partícula abrasiva entrou no material e posteriormente foi removida pela ação de outras partículas ou pela interação com a roda-de-borracha giratória. Este mecanismo é semelhante ao observado durante os ensaios com ANB 100 em aço AISI 1004, a microimpressão.

Na Figura 8 (aço AISI D2 com abrasivo ANB 50), observa-se evidência de

microcorte, dobras do material (indicando a ação de microfadiga) e vazios superficiais.

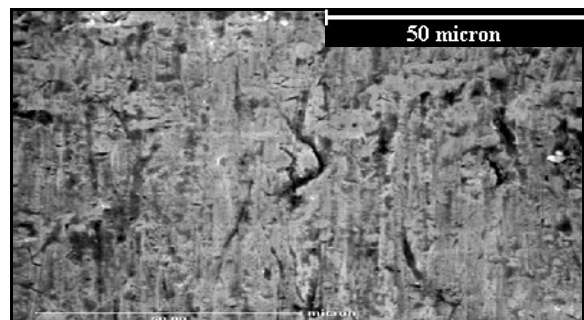


Fig 7 Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI D2, ensaiado com abrasivo ANB 100. Foto MEV

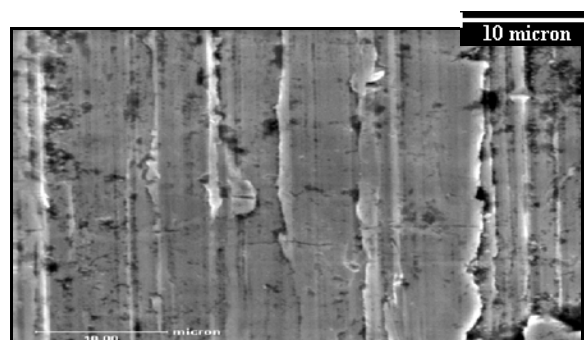


Fig 8 Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI D2, ensaiado com abrasivo ANB 50. Foto MEV

Para ensaios com aço AISI D2 o desgaste sempre foi mais intenso quando o ensaio foi realizado com abrasivo maior. Na comparação percentual, diferentemente do que ocorreu para o aço AISI 1004 o efeito do aumento do tamanho do abrasivo não foi progressivamente maior com a carga aplicada. A mudança de areia 100 para 50 provocou um aumento de desgaste de 25 % para a carga de 15N e de 46 % para a carga de 30 N; e para as cargas de 50 e 100 N os aumentos foram de 27 % e 15 %, como apresentado na Tabela 1.

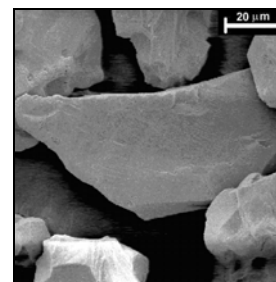
Analisando os incrementos de força aplicada para o aço AISI D2, diferentemente do que ocorreu para o aço AISI 1004, ocasionaram aumentos sucessivamente menores do desgaste. Ou seja, como se vê na Tabela 1, para o abrasivo ANB 100 os incrementos de desgaste foram de 142 %, 85 % e 34 % quando as cargas foram aumentadas de 15 para 100 N. Com o abrasivo ANB 50, os

incrementos foram de 183 %, 60 % e 22 %, para o mesmo intervalo de variação de cargas. Atribuiu-se este comportamento a que os aumentos percentuais para as cargas mais elevadas provavelmente não foram maiores devido às mudanças de forma da partícula abrasiva e por sua vez, à mudança de mecanismos de desgaste durante o período em que estas estiveram interagindo com o corpo e a roda-de-borracha. As partículas, que se tornam mais homogêneas e arredondadas, como observado na Figura 8(C). Este fenômeno não ocorre para as cargas menores o que justificaria o aumento da diferença de desgaste entre os dois abrasivos para a carga de 30 N, único caso para o qual possivelmente o efeito do tamanho do abrasivo estaria na região na qual a taxa de desgaste é mais sensível a variação do tamanho de grão.

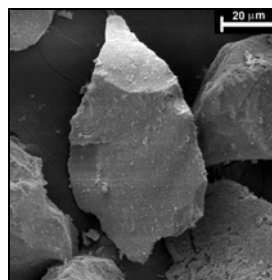
Na Figura 9(A) se apresenta a morfologia do abrasivo ANB 100 antes dos ensaios de desgaste, nota-se que as partículas abrasivas são alongadas, pontudas e rugosas.

Na Figura 9(B), se apresenta a morfologia do abrasivo ANB 100 após o ensaio de desgaste com o aço AISI 1004; observa-se que o abrasivo não sofreu maiores mudanças após desgaste, preservando inclusive sua rugosidade. Este efeito difere do observado em ensaios de erosão por Mesa (2001). Este autor observou que em ensaios de erosão não ocorria a quebra do abrasivo, porém havia um polimento do mesmo, decorrente do movimento relativo entre partículas abrasivas contra o recipiente e contra o material ensaiado (quartzo, SiO_2). As tensões contra os abrasivos eram seguramente menores que nos ensaios realizados no equipamento roda-de-borracha, mesmo assim o movimento relativo entre abrasivos, entre abrasivos e roda-de-borracha e entre abrasivos e amostra não foi suficiente para eliminar totalmente a rugosidade dos grãos abrasivos.

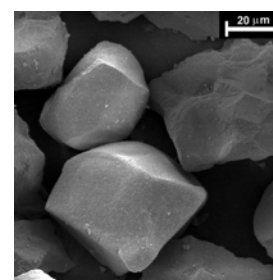
Sabe-se que para tamanhos menores de partícula abrasiva, em seu estado inicial ou devido à degradação do abrasivo (arredondamento) provocado pelo ensaio de



(A)



(B)



(C)

Fig 9 Morfologia do abrasivo ANB 100 antes do ensaio de desgaste mostrando partículas alongadas e pontudas. Foto MEV

desgaste, o ângulo de ataque também será menor; e conseqüentemente, diminuindo a capacidade de remoção de material. Esta afirmação pode ser apoiada pelos resultados apresentados na Tabela 1. Neste caso, o desgaste do material será motivado pela mudança ou pela ativação de outros mecanismos de desgaste, evidenciando-se ainda mais quando se vê aumentado o valor de força normal.

Comparando os resultados de desgaste entre os dois materiais nota-se que para a carga de 100 N o efeito do tamanho do abrasivo, na perda de volume, é mais acentuado no material mole (AISI 1004) que no material duro (AISI D2). Verifica-se ainda que à medida que a carga decresce até 30 N, o efeito do abrasivo foi aumentando para o D2 e diminuindo para o AISI 1004. Para a carga de 15 N, esta tendência volta a se inverter. Estes resultados sugerem que para ensaios com aço AISI 1004 onde o abrasivo não quebra os mecanismos de desgaste se vem mais acentuados com o aumento da carga normal, contrario ao caso do aço AISI D2 onde a partícula abrasiva quebra ficando mais arredondada e por tanto menos agressiva. Já para ensaios com 15 N os resultados se invertem, possivelmente

explicado pela vibração e excentricidade da roda recoberta por borracha, sendo mais evidente para baixas cargas.

4.3- Evolução do coeficiente de atrito em função do tamanho do abrasivo e da carga

Na Tabela 2 e na Figura 10, apresentam-se os resultados obtidos de coeficiente de atrito para todas as condições de ensaio.

Tabela 2 Resultados de coeficiente de atrito e análise percentual dos ensaios de desgaste

	COEFICIENTE DE ATRITO (μ)					
	Aço AISI 1004			Aço AISI D2		
	ANB 100	ANB 50	Incremento (%)	ANB 100	ANB 50	Incremento (%)
15 N	0,21	0,13	-38	0,22	0,19	-14
30 N	0,29	0,21	-28	0,31	0,28	-10
Incremento (%)	38	61		40	47	
50 N	0,34	0,27	-21	0,35	0,30	-14
Incremento (%)	17	29		13	7	
100 N	0,38	0,36	-5	0,34	0,26	-24
Incremento (%)	12	33		-3	-13	

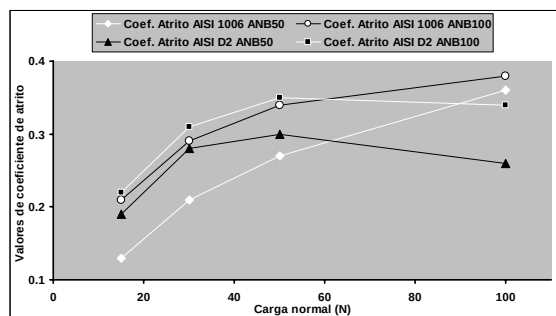


Fig 10 Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e ANB 100 e aços AISI 1004 e AISI D2

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

das partículas abrasivas, como mostrado no item 4.2.

Os resultados de coeficiente de atrito apresentados na Figura 10 mostram claramente que o comportamento do coeficiente de atrito está influenciado pela força normal utilizada nos ensaios de desgaste, apresentando um comportamento crescente à medida que a carga normal é aumentada. Estes resultados contrariam os apresentados por Stevenson;; Hutchings (1996), como se vê na Tabela 3.

Essa conclusão de Stevenson;; Hutchings (1996) pode estar relacionada à e sensibilidade do abrasômetro instrumentado para medição da força tangencial.

Tabela 3 Comparação de resultados de coeficiente de atrito de Stevenson;; Hutchings (1996) e deste trabalho

Carga (N)	Abrasi vo	Tamanho de abrasivo (μ m)	Materi al AISI	Coeficiente de atrito	Referência
24,5 a 122,6	Areia Ottawa	90-150	1020	0,30 constante	Hutchings
100	ANB 100	150	1004	0,38 varia de forma crescente com a carga	Este trabalho
24,5 a 122,6	Arena Ottawa	90-150	FFBAC	0,30 constante	Hutchings
100	ANB 100	150	D2	0,34 varia com a carga e com o tamanho de grão	Este trabalho

Pode-se observar na Tabela 2 que para o aço AISI 1004 e os abrasivos ANB 100 e ANB 50, os incrementos percentuais no coeficiente de atrito diminuem, de 38 para, 28, para 21 e para 5 % quando as cargas foram elevadas de 15 para 30, para 50 e para 100 N, respectivamente. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento do encruamento do material na medida que a carga foi elevada.

Segundo os resultados de Zum Gahr, (1987) mostrados na Figura 11, verifica-se que a elevação de dureza de deformação de 200 para 300 HV causou uma redução média do coeficiente de atrito de 0,8 para 0,4, aproximadamente. Já a elevação da dureza de deformação de 300 para 400 HV levou a redução do coeficiente de atrito de 0,40

para 0,35 apenas. Observa-se que quanto maior a dureza da superfície deformada menor a variação do coeficiente de atrito, para diversos materiais.

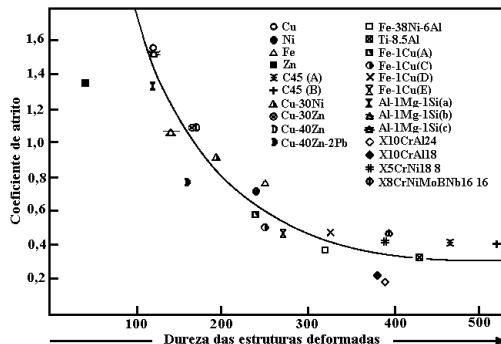


Fig 11 Coeficiente de atrito em função da dureza de deformação medida em superfícies polidas de diferentes materiais, usando ensaio de riscamento com ponta de diamante e carga de 2 N (Zum, 1987)

Explicar o comportamento do coeficiente de atrito obtidos neste trabalho (Figura 10), utilizando-se os resultados de (Zum, (1987) (Figura 11), depende apenas da obtenção de medidas precisas das durezas das superfícies encruadas. No entanto, isso não foi possível de ser realizado devido às irregularidades das superfícies desgastadas.

Para os ensaios com o aço AISI D2, a variação percentual do coeficiente de atrito durante os ensaios com os abrasivos ANB 100 a ANB 50 apresenta o seguinte comportamento: 14 %, 10 %, 14 % e 24 % para os ensaios com 15, 30, 50 e 100 N de carga aplicada, respectivamente. Observa-se que para cargas entre 30 e 100 N, os valores são crescentes, comportamento que possivelmente tem a ver com a mudança de geometrias e das superfícies das partículas abrasivas, devido às condições de carga normal produto das altas tensões e da dureza do corpo-de-prova que possibilita a quebrar das pontas do abrasivo. Fato que possivelmente é diferenciado para os dois tamanhos de abrasivo.

Para as três menores cargas o coeficiente de atrito para o aço AISI 1004 é sempre menor do que para o aço AISI D2, como observado na Tabela 2. Para a carga de 100 N ocorre o inverso e o coeficiente de atrito

para o aço AISI D2 é maior que para o aço AISI 1004.

Embora os resultados dos ensaios com 100 N sejam semelhantes às observações de Pintaúde (2002), (Tabela 4) quando se considera a diminuição do coeficiente de atrito com a elevação da dureza do material ensaiado, a fundamentação da comparação é difícil devido à diferença entre os sistemas e, principalmente, a diferença de dureza dos abrasivos, sílica neste trabalho e vidro naquele estudo.

Tabela 4 Valores médios de coeficientes de atrito. Abrasivo: vidro (Pintaúde, 2002)

Material	Lixa grana #80	Lixa grana #240
AISI 1006	0,531±0,008	0,398±0,009
AISI 52100 haperado y revenido 500 °C/24h	0,33±0,01	0,24±0,02

Os resultados da Figura 10 e da Tabela 2 mostram que para todas as cargas e para os dois materiais, se mediram maiores coeficientes de atrito nos ensaios realizados com areia ANB 100 do que nos realizados com areia ANB 50. Esses resultados contrariam os resultados apresentados por Stevenson;; Hutchings (1996), em que o coeficiente de atrito obtido em abrasômetro do tipo roda-de-borracha não muda com o tamanho do abrasivo, nem com a carga aplicada e nem com a velocidade de deslizamento nos quais, Pintaúde (2002) verificou que aumentando da dureza do material no regime severo ocorria diminuição do coeficiente de atrito para ambos os tamanhos de abrasivo (#80 e #240 mesh). Em contraposição, neste trabalho, esta variação ocorreu apenas para a carga de 100 N. Para as demais cargas os maiores coeficientes de atrito foram observados para o material mais duro. Uma possibilidade é a de que a carga aplicada possa ter um efeito no ensaio pino contra lixa como tem no presente trabalho, possibilidade não investigada por Pintaúde, naquela ocasião (Pintaúde 2002).

Na Figura 5, mostrou-se que a diferença entre as taxas de desgaste dos aços AISI 1004 e AISI D2 podem chegar a quase duas ordens de grandeza. Em contraposição, na Figura 10, mostrara-se que os coeficientes de atrito não variam

mais do que 10 % nos ensaios com areia ANB 100 e não mais do que 30 % nos ensaios com areia ANB 50. Este resultado sugere que a explicação de mudanças na taxa de desgaste e no coeficiente de atrito com base na análise de mecanismos de desgaste como foi feita neste trabalho requer maiores aprofundamentos capaz de dar conta da diferença de magnitude das variações das grandezas desgaste e atrito.

5- CONCLUSÕES

1. O equipamento construído no Laboratório de Fenômenos de Superfície, denominado Abrasômetro Instrumentado do Tipo Roda-de-borracha, além de cumprir com as indicações da norma ASTM G-65 quanto à construção e validação de ensaios, possui um sistema instrumentado de aplicação da carga e monitoração de parâmetros, que permite medir coeficiente de atrito e temperatura com boa reprodutibilidade de resultados para uma confiabilidade superior ao 95 % como recomendado pela norma ASTM G 65.
2. O sistema de aplicação e medição de forças tem sensibilidade suficiente para medir a variação dos resultados de atrito em função do tamanho de grão, da carga normal e do material.
3. As inovações de instrumentação introduzidas no equipamento permitem não apenas ordenar materiais enquanto a resistência ao desgaste, mas também melhorar a qualidade do estudo dos mecanismos de desgaste abrasivo, pois é possível associar a esses mecanismos as medidas de atrito correspondentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIN 50320 Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste, Metalurgia & Materiais, 53, 1997, p619-622.

Eyre, T. S. Friction and wear mechanisms of metals, In: II Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste, Uberlândia, ABM 1991, Anais, p.263-292.

Borik, F., Using test to define the influence of metallurgical variables on abrasion, Metal Engineering Quarterly, 1972, p. 33-39.

Haworth, R.D. The Abrasion Resistance of Metals. In: ASM. 1948, pp. 819-855.

ASTM G-65-94 American Standard for Testing Materials. Measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, G02.30, ASTM, 1994, p.239-250.

Célula de carga tipo A-50 fabricada pela Alfa instrumentos. (especificações dimensionais, 2000 disponível em: www.alfainstrumentos.com.br. Acesso em 8 de fev. 2005.

Zumpano Jr., P.; Cornachioni, D.D.; de Mello, J.D.B. Abordagem global do estudo do processo abrasivo. Parte III - desenvolvimento e avaliação de abrasômetro a dois e três corpos. In: I Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste. São Paulo, 1989. Anais. São Paulo: ABM, 1989. p.63-76.

Stevenson, A.N.J.; Hutchings, I.M. Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test. Wear, v.195, n.1-2, p.232-240, 1996.

Nathan, G.K; Jones, W.J.D. The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions. Wear, v.9, n.4, p.300-309, 1966.

Misra, A.; Finnie, I. On the size effect in abrasive and erosive wear. Wear, v.65, n.3, p.359-373, 1981.

Misra, A; Finnie, I.; A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester, Wear, v.60, n.1, p.111-121, 1980.

Mesa, D. Propriedades mecânicas e de superfície de aços inoxidáveis martensíticos de alto nitrogênio. 2001. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

Zum Gahr, K-H. Microstructure and wear of materials, New York: Elsevier, 1987, v.10. (Tribology series).

Pintaúde, G. Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza. 2002. 200p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.