

EFEITO DA CARGA E DO TAMANHO DO GRÃO ABRASIVO NO DESGASTE DO FERRO FUNDIDO BRANCO 19,9% CROMO E 2,9% CARBONO¹

Karla Dubberstein Tozetti²
Eduardo Albertin³
Cherlio Scandian⁴

Resumo

No trabalho foi investigado o efeito da carga e do tamanho da partícula abrasiva na resistência ao desgaste da liga de ferro fundido branco alto cromo (FFBAC) com composição química de 2,9% de carbono e 19,9% de cromo em massa. Para tanto foram realizadas duas séries de ensaio com diferentes níveis de severidade. No ensaio pino sobre lixa foram utilizadas lixas de sílica e de granada como abrasivo, com três tamanhos distintos: 63 μm , 149 μm e 177 μm , e duas cargas: 5 N e 10 N. Em abrasão no roda-de-borracha utilizou-se como abrasivo a areia normal brasileira com três tamanhos médios: 90 μm , 115 μm e 170 μm , e três cargas: 44 N, 80 N e 130 N. No ensaio pino sobre lixa obteve-se variação de uma ordem de grandeza no volume perdido no desgaste com lixa de sílica variando a carga de 5 N para 10 N. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram, de maneira geral, um aumento no desgaste com o aumento da carga e do tamanho do abrasivo e permitiram, para os resultados dos ensaios no roda-de-borracha, a observação de um tamanho crítico do abrasivo.

Palavras-chave: Ferro fundido branco alto cromo; Tamanho da partícula abrasiva; Carga; Desgaste abrasivo.

LOAD AND ABRASIVE SIZE EFFECTS ON THE HIGH WHITE CAST IRON WITH 19,9% CHROMIUM AND 2,9% CARBON WEAR

Abstract

In this research the effects of different applied load and abrasive size on the martensitic high-chromium white cast iron (with a chemical composition: 2,9% carbon and 19,9% chromium) wear was investigated. Abrasive wear tests using a pin test on silica and garnet paper were carried out using three different abrasives sizes: 63 μm , 149 μm e 177 μm and two applied load: 5 N e 10 N. And the rubber wheel abrasion test (ASTM standard G-65) was carried out using three abrasives sizes: 87 μm , 115 μm e 170 μm and three applied loads: 44 N, 80 N e 130 N. The results of the pin test on silica paper show a change in the magnitude of the volume lost in wear abrasion by varying the applied load of 5 N to 10 N. In rubbers wheel abrasion test were observed that the mass loss of the white cast iron alloy increases linearly with the increase of particle size until the critical particle size is reached. In general, the mass loss increases with the increase of the load applied and the abrasive size.

Key words: High-chromium white cast iron; Abrasive size; Load; Abrasive wear.

¹ *Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil*

² *Mestranda, PPGEM, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES, Brasil.*

³ *Pesquisador, Dr., IPT, São Paulo, SP, Brasil.*

⁴ *Professor Dr., PPGEM, UFES, Vitória, ES, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos da indústria metalúrgica, como, por exemplo, os equipamentos de transporte e moagem de minério, são expostos ao desgaste excessivo. Isso pode aumentar o número de interrupções não planejadas na produção dessa indústria.

Para minimizar as perdas com trocas de peças desgastadas e com paradas na produção é importante, primeiramente, o conhecimento sobre o comportamento desses equipamentos em desgaste. Para tanto um mapa de desgaste poderá fornecer informações relevantes sobre a interação entre o abrasivo e o material em desgaste.

Como o desgaste é sistêmico, para mapear o comportamento de um material é necessário conhecer o máximo sobre a influência de cada variável no processo. Entre essas variáveis, sem dúvida, a carga normal e o tamanho do abrasivo têm uma importância preponderante na abrasão.

A literatura já apresentou preocupação sobre esse tema nos trabalhos de Hokkirigwa e Kato,⁽¹⁾ Williams⁽²⁾ e Jensen et al.⁽³⁾ Nesses trabalhos são encontradas diferentes abordagens sobre a construção de mapas de desgaste abrasivo para metais e ligas. Diante do que foi exposto, o objetivo do trabalho é construir um mapa de desgaste abrasivo, observando os efeitos da variação da carga e do tamanho da partícula abrasiva. Para tanto, foram realizadas duas séries de ensaios de abrasão com diferentes níveis de severidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ferro Fundido Branco Alto Cromo (FFBAC)

Foi utilizada uma liga de FFBAC hipoeutética temperada e revenida (19,9%Cr e 2,9%C). Os blocos foram fundidos e tratados termicamente no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT/SP). Foram fornecidos 5 blocos nas dimensões 80 x 60 x 45 mm.

Para o tratamento térmico da liga aplicou-se, inicialmente, um aquecimento até 700°C por 2 horas para a desestabilização da austenita. Depois, novo aquecimento até a temperatura de 975°C. Em seguida, foi realizada a têmpera ao ar forçado para obtenção da matriz martensítica. Por fim, foi aplicado o revenido a 200°C por 2 horas.

2.2 Composição Química e Análise Microestrutural da Liga de FFBAC

A liga de FFBAC utilizada possui composição química mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química analisada da liga de ferro fundido branco alto cromo. Porcentagem em peso dos principais componentes da liga e dos componentes residuais

Principais Componentes (%)				Componentes Residuais (%)			
C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	P	S
2,9	19,9	1,2	0,58	0,15	0,02	0,024	0,008

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT-SP, 2011.

O resultado da análise metalográfica, na Figura 1, revela uma microestrutura de FFBAC hipoeutético de matriz martensítica revenida mais um eutético contendo carboneto M_7C_3 .

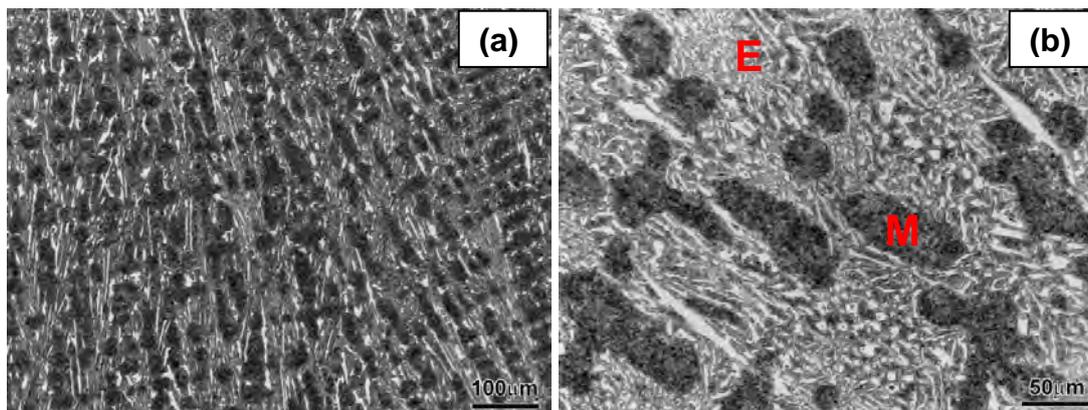


Figura 1. Microestrutura do FFBAC com matriz martensítica revenida e carbonetos. Os pontos mais claros são carbonetos eutéticos na matriz de martensita revenida (no E, em destaque) e a região mais escura é martensita revenida (no M, em destaque). Micrografia do ótico.

2.3 Ensaio Roda-de-Borracha

Para o ensaio roda-de-borracha foram obtidas 30 amostras retangulares via usinagem por descargas elétricas a fio nas dimensões 9 x 25 x 76 mm. Após o corte, a superfície das amostras foi retificada.

Os ensaios foram conduzidos conforme Norma ASTM G-65⁽⁴⁾ em um abrasômetro Roda-de-Borracha Horizontal modificado segundo Hutchings e Steverson.⁽⁵⁾ O equipamento é mostrado na Figura 2.

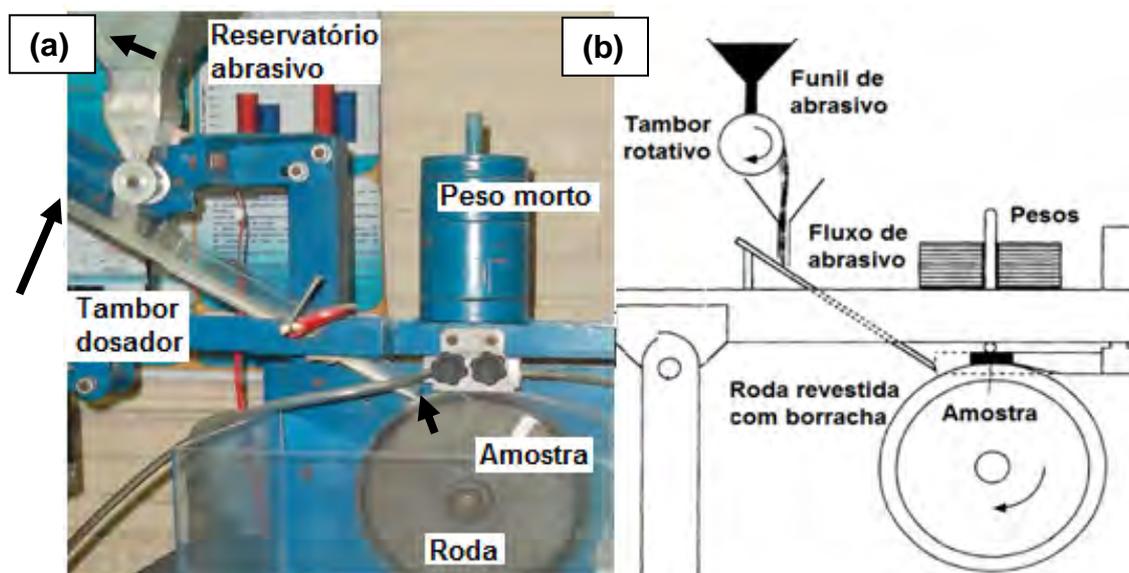


Figura 2. (a) Fotografia da roda-de-borracha do TRICORRMAT-UFES. (b) Desenho, esquemático, do equipamento roda-de-borracha horizontal.⁽⁵⁾

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de ensaio utilizados. A vazão do abrasivo foi mantida constante em 120 g/min. Foram realizados três repetições para cada condição de ensaio.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para a realização dos ensaios no equipamento roda-de-borracha, seguindo o procedimento A da Norma ASTM G-65⁽⁴⁾

Parâmetros de ensaio adotados - Norma ASTM G-65			
Procedimento:	Carga aplicada ao corpo-de-prova:	Rotações do disco:	Distância Percorrida:
A	130 N (da Norma)	6000 (da Norma)	4309 m (da Norma)
	80 N (escolhido)		
	44 N (escolhido)		

2.3.1 Abrasivo: areia normal brasileira (ANB)

Os tamanhos de abrasivo foram obtidos com peneiramento do descarte fino da ANB. O peneiramento foi realizado seguindo a Norma SAE J444.⁽⁶⁾ A tabela 3 apresenta o nome dado aos intervalos de tamanhos obtidos após peneiramento da areia com 90% dos valores centrais.

Tabela 3. Classificação dos intervalos de tamanho da partícula abrasiva

Nome	Intervalo de Tamanho	Média (μm)	Desvio Padrão (μm)
“Fina”	30 μm - 142 μm	90	10
“Média”	52 μm - 191 μm	115	15
“Grossa”	64 $\mu\setminus\text{m}$ - 204 μm	170	16

2.4 Ensaio Pino Sobre Lixa

Os pinos foram obtidos pelo processo de usinagem por descargas elétricas por penetração. Os 24 pinos foram retirados nas dimensões (6 x 30 mm). A dimensão de 6 x 20 mm, necessária para o encaixe no porta-amostra do equipamento, foi obtida com usinagem por descargas elétricas a fio. A superfície do pino foi retificada. Os ensaios foram conduzidos em um abrasômetro pino sobre lixa desenvolvido no LTM/UFU. O equipamento é mostrado na Figura 3.

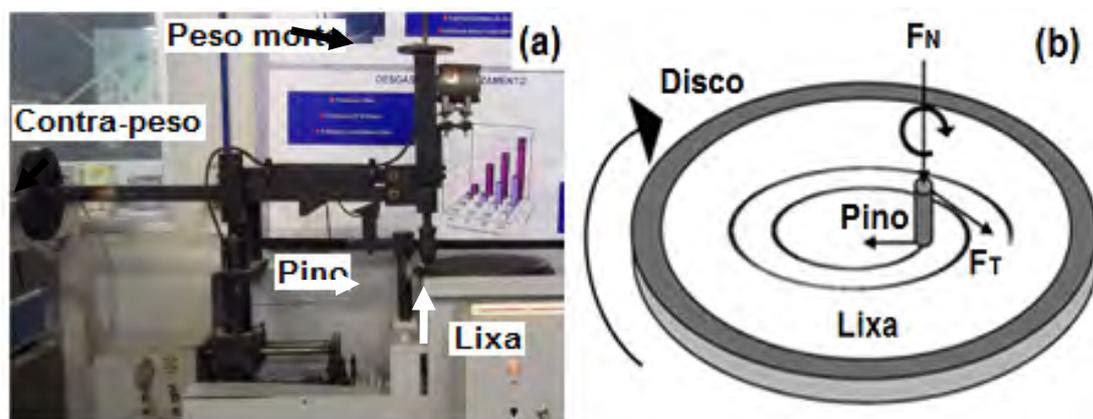


Figura 3. Abrasômetro pino sobre lixa. (a) Fotografia do abrasômetro pertencente ao LTM/UFU. (b) Desenho esquemático do ensaio de desgaste pino sobre lixa.

O ensaio consiste na passagem de um pino sobre uma lixa descrevendo uma trajetória em espiral de Arquimedes. O pino percorre uma distância média de 3,2 m. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios.

Tabela 4. Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste abrasivo pino sobre lixa

Parâmetros usados no ensaio de desgaste pino sobre lixa:	
Rotação do Disco (rpm)	35
Rotação da Amostra (rpm)	25
Formato da Amostra	Cilíndrica
Diâmetro da Amostra (mm)	6
Altura da Amostra (mm)	20
Tipo de Abrasivo	Sílica e Granada
Granulometria do Grão Abrasivo (mesh)	220, 100 e 80
Carga Normal (N)	5 e 10
Tempo de Ensaio (s)	10

Para cada condição de ensaio foram realizadas 3 repetições.

2.5 Limpeza das Amostras

Em ambas as séries de ensaio foram aplicadas os mesmos procedimentos para a limpeza das amostras.

Cada amostra era imersa num Becker contendo álcool etílico colocado em um equipamento de limpeza por ultrassom por 10 min. Após, ela era imersa em outro Becker contendo acetona por mais 10 min no ultrassom. Em seguida, foi realizada a secagem da amostra com ar quente por 10 min. e ar frio por mais 10 min. para resfriá-la.

Depois de limpa e seca, a massa da amostra foi medida numa balança eletrônica de resolução de 10^{-4} g. Para determinação da massa foi feita média aritmética de sete medições. Com a medida da massa perdida e a densidade da liga foi calculado o volume perdido como na Equação 1.⁽⁴⁾

$$\text{Volume Perdido (mm}^3\text{)} = \frac{\text{Massa Perdida (Kg)}}{\text{Densidade (Kg/mm}^3\text{)}} \quad (1)$$

2.6 Análise da Topografia das Superfícies e dos Micromecanismos

Para a análise da topografia das superfícies desgastadas utilizou-se um Analisador Tridimensional de Superfície da marca Taylor Hobson, modelo Talysurf CLI 1000 do LCSM/UFES. Foi obtido o parâmetro de rugosidade (Sq) para comparação com os resultados de perda de massa.

Para análise dos micromecanismos de desgaste utilizou-se as micrografias do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca ZEISS, modelo EVO 40 do LCSM/UFES.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados dos Ensaio no Roda-de-Borracha

Com os volumes perdidos no desgaste e os valores do parâmetro de rugosidade da superfície (Sq) foram construídos os gráficos das Figuras 4 e 5, respectivamente.

Em geral, observa-se na Figura 4 aumento no volume perdido com o aumento da carga e do tamanho do abrasivo. Pode-se notar a maior influência da variação da carga no desgaste.

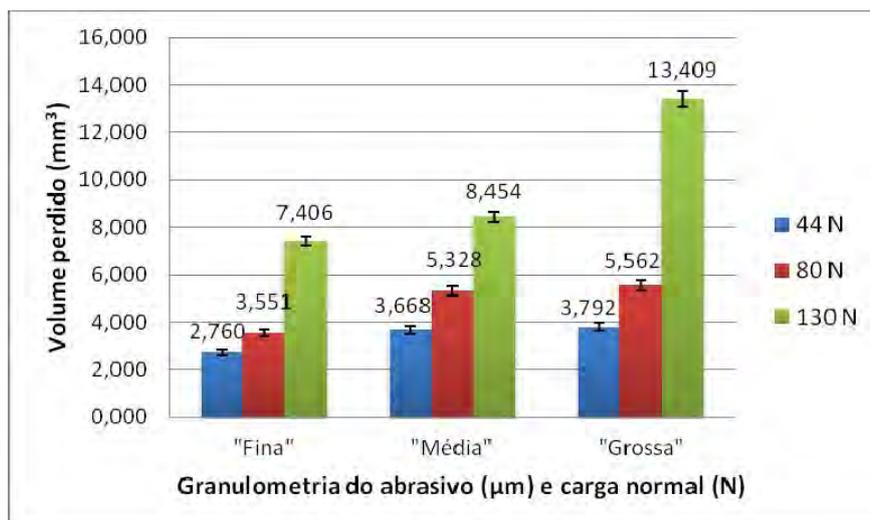


Figura 4. Gráfico do volume perdido no desgaste roda-de-borracha.

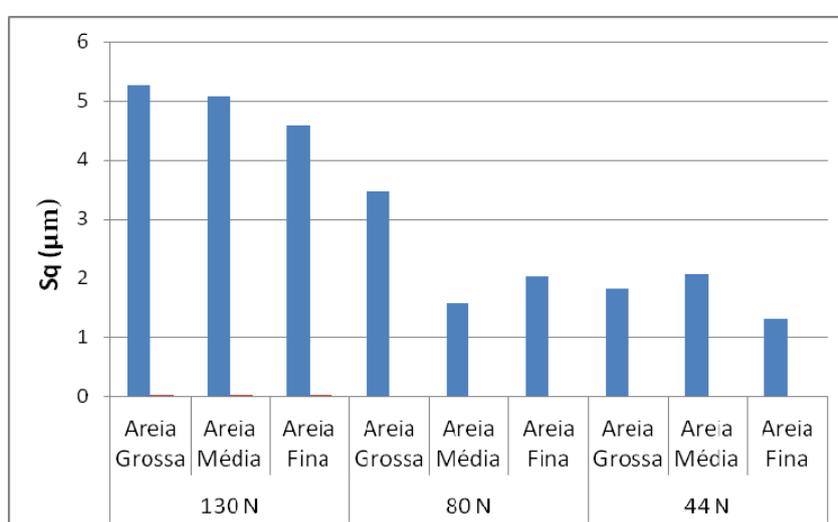


Figura 5. Gráfico do parâmetro de rugosidade da superfície desgastada (Sq). Ensaio roda-de-borracha.

Na Figura 5 nota-se, também, uma maior influência da variação da carga na alteração da rugosidade da superfície.

Fazendo análise da areia pós-ensaio, para os três tamanhos de abrasivo, não se observa muita variação no formato dos grãos com a variação da carga. Isso pode ser comprovado observando a Tabela 5 de fator de esfericidade. Apenas a areia "fina" apresentou uma variação pouco maior, com a aplicação da carga de 130 N as partículas ficaram menos facetadas.

Tabela 5. Fator de esfericidade das partículas abrasivas antes da realização dos ensaios e após os ensaios com carga de 130 N

Tamanho do abrasivo	Fator de esfericidade (F)	
	Antes do ensaio	Após ensaio (130 N)
"Fina"	0,57 ± 0,04	0,70 ± 0,02
"Média"	0,61 ± 0,03	0,67 ± 0,02
"Grossa"	0,61 ± 0,03	0,67 ± 0,03

3.1.1 Mecanismo de desgaste: roda-de-borracha

A Figura 6 apresenta as micrografias do MEV das superfícies desgastadas no ensaio Roda-de-Borracha, variando carga e tamanho do abrasivo.

Observe na Figura 6 que os abrasivos desgastam a matriz, mas não os carbonetos. Para a carga de 130 N a remoção da matriz aparece mais profunda, mas os carbonetos mantêm-se íntegros. Para o ensaio com a areia “grossa” aparecem riscos ainda mais profundos (esses riscos estão em destaque nos círculos amarelos).

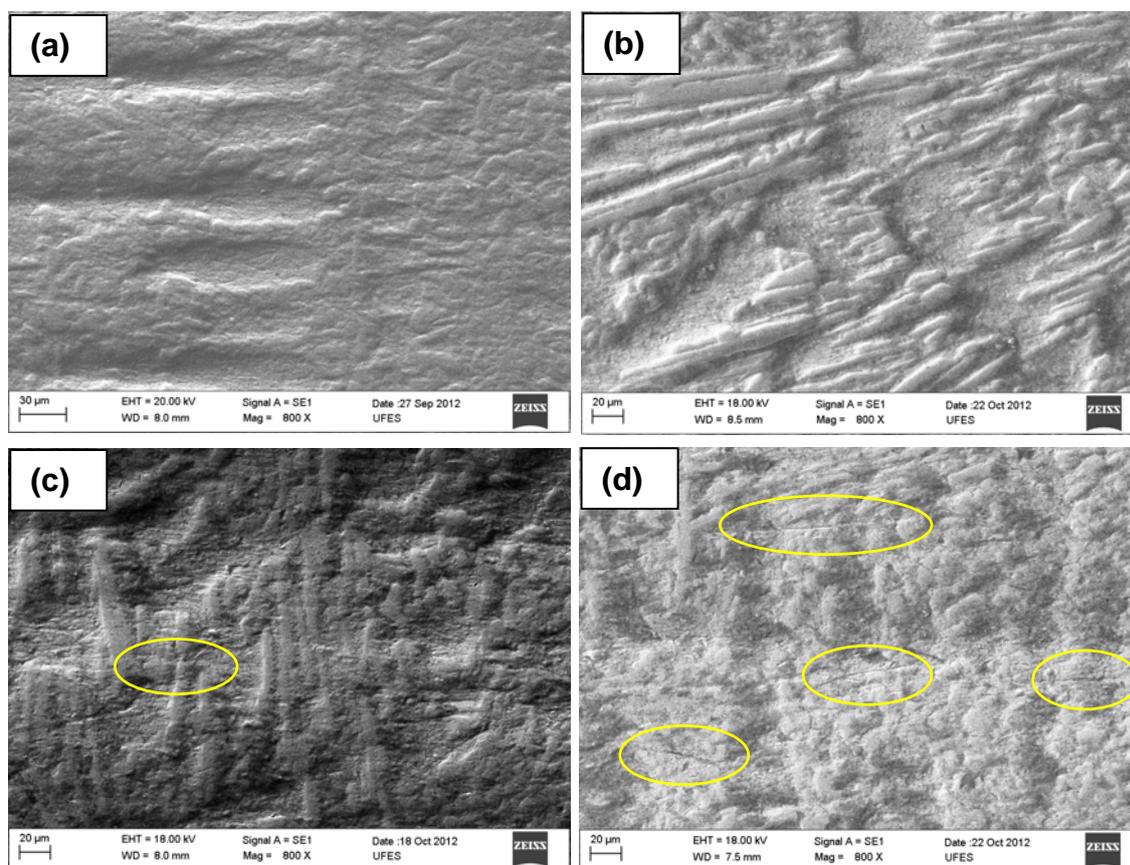


Figura 6. Micrografias das superfícies após ensaios no roda-de-borracha. Areia “fina” e carga de (a) 44 N; (b) 130 N. Com areia “grossa” e carga de (c) 44 N; (d) 130 N. Em destaque no círculo amarelo estão os riscos.

3.2 Resultados dos Ensaios no Pino Sobre Lixa

Com os valores do volume perdido nos ensaios pino sobre lixa e os valores do parâmetro de rugosidade (S_q) foram elaborados os gráficos das Figuras 7 e 8, respectivamente.

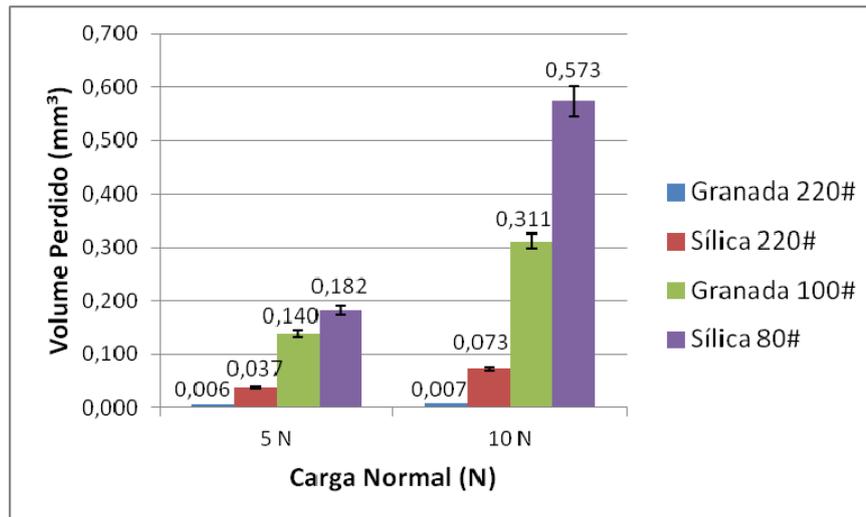


Figura 7. Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no pino sobre lixa, em função da carga normal, do tamanho da partícula abrasiva e do material da lixa.

Na Figura 7 nota-se crescimento no volume perdido com aumento da carga e do tamanho do abrasivo. Observando apenas as lixas de sílica e granada, com mesmo tamanho de abrasivo (220#), percebe-se uma diferença na perda de massa. Observe, para o mesmo tamanho de abrasivo, um fator de aumento de 4 vezes na mudança da lixa de granada para sílica para a carga de 5 N e um fator de aumento de 7 vezes para a carga de 10 N.

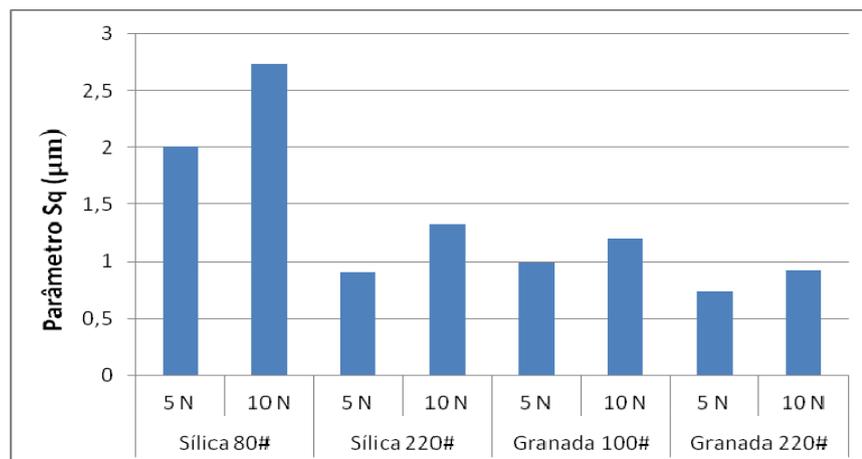


Figura 8. Gráfico do parâmetro de rugosidade (Sq) da superfície desgastada.

Analisando o gráfico da fig. 8 nota-se que os pinos dos ensaios com carga mais elevada e maior tamanho de abrasivo apresentaram as superfícies com maiores valores de Sq. Pode-se observar, também, que para a lixa de sílica, quando dobra a carga o Sq aumenta numa razão, aproximada, de 1,5. Para a granada aumenta em 1,2 vezes.

3.2.1 Mecanismos de desgaste: pino sobre lixa

A Figura 9 apresenta as micrografias obtidas do MEV das superfícies dos pinos desgastados no ensaio pino sobre lixa com variação do material da lixa, tamanho do abrasivo e carga.

É visível nas micrografias da Figura 9 aumento na densidade de riscos, na largura e comprimento com aumento da carga e do tamanho do abrasivo.

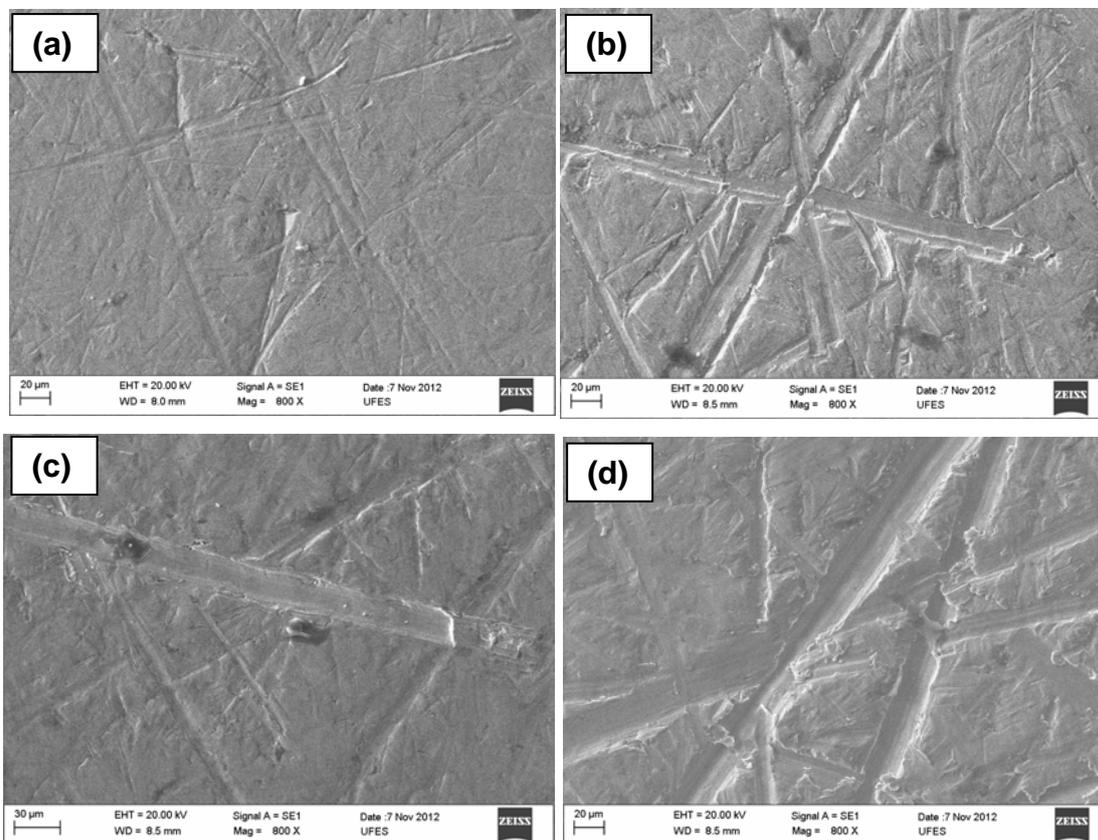


Figura 9. Micrografias das superfícies dos pinos após ensaio de desgaste pino sobre lixa. Realizados com lixa de granada em: (a) 220# e carga 5 N; (b) 100# e 10 N. E lixa de sílica em: (c) 220# e 5 N; (d) 80# e carga de 10 N.

4 DISCUSSÕES

4.1 Ensaio: Roda-de-Borracha

O gráfico da Figura 10 mostra o crescimento no desgaste com aumento da carga e tamanho do abrasivo. Observe que a influência da carga no desgaste foi mais significativa para o maior tamanho de abrasivo, resultado semelhante ao encontrado por Villabon⁽⁷⁾ para o aço AISI 1004.

Pode-se observar que há um aumento no desgaste com o aumento do tamanho da areia até um tamanho crítico entre 100 e 120 µm. Valor de TCA semelhante ao encontrado por Misra e Finnie.⁽⁸⁾

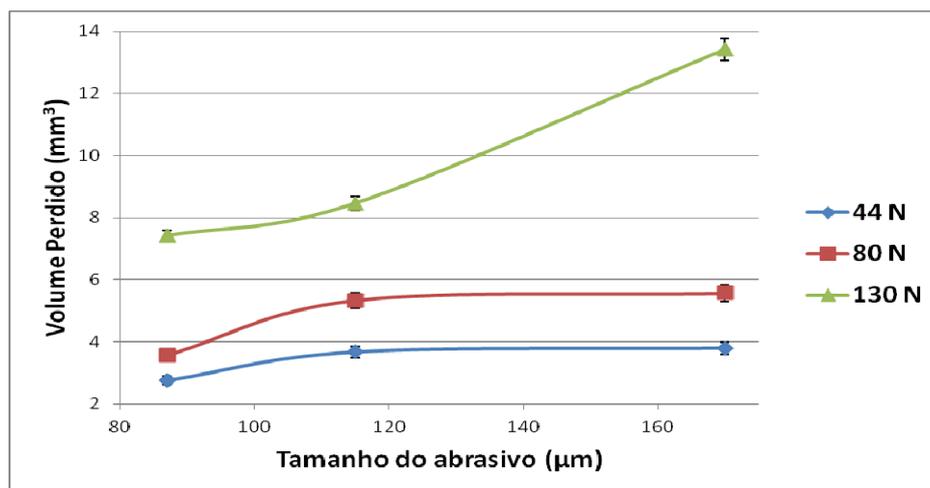


Figura 10. Gráfico do volume perdido nos ensaios de desgaste abrasivo no equipamento roda-de-borracha em função da carga normal e do tamanho da partícula abrasiva. Com ênfase no tamanho crítico do abrasivo (TCA) entre 100 e 120µm.

4.2 Ensaio de Desgaste: Pino sobre Lixa

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre os ensaios com lixa de sílica e granada, nota-se na tabela uma pequena diferença na densidade de riscos. Uma diferença maior aparece quando comparamos a largura e comprimento dos riscos que são, em geral, maiores para o desgaste com lixa de sílica.

Tabela 6. Tabela para comparação de densidades de riscos do ensaio pino sobre lixa para a lixa de sílica e granada

Tipo de Lixa:	Lixa de Sílica		Lixa de Granada	
	220 # e 5 N	80# e 10 N	220 # e 5 N	100# e 10 N
Condições de Ensaio:	220 # e 5 N	80# e 10 N	220 # e 5 N	100# e 10 N
Nº de riscos/µm ²	3,6x10 ⁻⁴	4x10 ⁻⁴	3,5x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴
Total de riscos	29	28	31	26
Maiores				
Nº de riscos	4	3	6	8
Comprimento (µm)	251	273	224	261
Largura (µm)	13	23	4	10
Médios				
Nº de riscos	6	5	8	6
Comprimento (µm)	83	200	118	174
Largura (µm)	6	13	3	5
Menores				
Nº de riscos	19	20	16	11
Comprimento (µm)	28	51	38	60
Largura (µm)	4	6	3	4

4.3 Mapa de Desgaste

Inspirado no mapa de desgaste de Riahi e Alpas,⁽⁹⁾ com o logaritmo dos valores do volume perdido dividido pela carga e pela distância percorrida no desgaste, nos ensaios no roda-de-borracha e no pino sobre lixa, em função do tamanho do abrasivo foi idealizado um mapa de desgaste para o FFBAC (Figura 11).

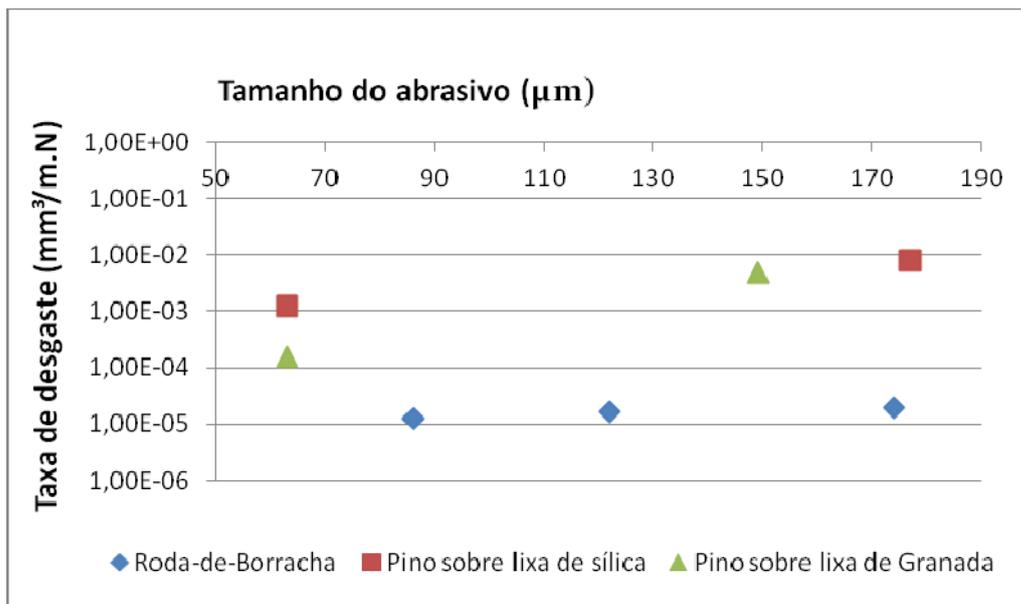


Figura 11. Mapa de desgaste abrasivo do FFBC 19,9% Cr e 2,9% C, para ensaios com dois níveis distintos de severidade, variando a carga normal e o tamanho da partícula abrasiva.

O ensaio no roda-de-borracha resultou nas menores taxas de desgaste com diferença de mais de duas ordens de grandeza comparando com os ensaios no equipamento pino sobre lixa, para o maior tamanho de abrasivo.

Misra e Finnie⁽¹⁰⁾ obtiveram uma diferença de, aproximadamente, uma ordem de grandeza no volume perdido comparando os dois tipos de ensaios com rolamento e deslizamento de abrasivo variando a carga aplicada.

Outra observação que pode ser feita é quanto à mudança de uma ordem de grandeza no desgaste quando aumenta o tamanho do grão abrasivo para o ensaio pino sobre lixa, o mesmo não foi observado nos resultados do roda-de-borracha.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios no equipamento roda-de-borracha e pino sobre lixa pode-se concluir que:

- quanto maior o tamanho do abrasivo e a carga, maiores as taxas de desgaste, em ambos os ensaios;
- quanto à rugosidade da superfície de desgaste, há uma tendência clara de que quando aumenta a carga e o tamanho do abrasivo aumenta o S_q , concordando com os valores do desgaste;
- quanto aos mecanismos de desgaste, para a menor carga e menor tamanho de abrasivo, foi observado apenas o desgaste da matriz, mas os carbonetos se mantiveram íntegros. Com carga mais elevada e maior tamanho de abrasivo, foi observado riscamento nos carbonetos, para os ensaios no roda-de-borracha;
- para o maior tamanho de abrasivo, o desgaste foi mais que 2 ordens de grandeza maior para o pino sobre lixa em relação ao Roda-de-Borracha; e
- no ensaio pino sobre lixa foi observado um aumento na taxa de desgaste de uma ordem de grandeza com o aumento no tamanho do abrasivo, o mesmo não foi observado nos resultados do ensaio no roda-de-borracha.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao prof. Dr. Amilton Sinatora da Poli-USP e ao prof. Dr. Sinésio Domingues Franco da UFU pela doação das lixas. Ao IPT/SP pela doação da areia. Ao prof. Dr. Flávio José da Silva da UFES pelo auxílio na usinagem. Ao prof. Dr. Washington Martins pelo auxílio nos ensaios pino sobre lixa no laboratório LTM/UFU. Ao eng. Leandro Entrinquer pela obtenção das topografias no LCSM/UFES.

REFERÊNCIAS

- 1 HOKKIRIGAWA, K.; KATO, K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. *Tribology International*, v. 21, p. 51-57, 1988.
- 2 WILLIAMS, J. A. Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. *Wear*, v. 225-229, p.1-17, 1999.
- 3 JENSEN, L. D.; FUNDALB, E.; MOLLERC P.; JESPERSENA M. Prediction of wear rates in comminution equipment. *Wear*, v. 269, p. 525-533, 2010.
- 4 ASTM G-65 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, 2001.
- 5 HUTCHINGS, I. M.; STEVENSON, A. N. J. Development of the Dry Sand/Rubbers Wheel Abrasion Test. *Wear*, v. 195, p. 232-240, 1996.
- 6 SAE J444 Cast Shot and Grit Size Specifications, 2005.
- 7 VILLABÓN, L. R. Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços. *Dissertação de mestrado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), São Paulo, p. 82, 2005.
- 8 MISRA, A.; FINNIE, I. Some observations on two-body abrasive wear. *Wear*, v. 68, p. 41-56, 1981.
- 9 RIAHI, A. R.; ALPAS, A. T. Wear map for grey cast iron. *Wear*, v. 255, p. 401-409, 2003.
- 10 MISRA, A.; FINNIE, I. A classification three-body abrasive wear and design of a new tester. *Wear*, v. 60, p. 111-121, 1980.