



## AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE EROSIVO DE LIGAS FERROSAS USADAS EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE LAMA CONTENDO CASSITERITA

**Francisco Francelino Ramos Neto**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG, [francisco@.mecanica.ufu.br](mailto:francisco@.mecanica.ufu.br)

**Roberto Máscia**

Mineração Taboca, Pitinga-AM

**Robson José de Souza**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG

**Sinésio Domingues Franco**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG, [ltm-sdfranco@.ufu.br](mailto:ltm-sdfranco@.ufu.br)

**Resumo.** *Nas várias etapas do processamento da cassiterita são utilizados equipamentos, cujos componentes estão sujeitos a elevadas taxas de desgaste, sendo o desgaste erosivo um dos principais. Como consequência, tem-se altos custos de manutenção e de reposição destes componentes. Dentre os maiores custos destaca-se o relacionado com a aquisição de rotores e volutas de bombas de transporte da mistura água e minério. Assim, no presente trabalho foi desenvolvido, projetado e construído um hidro-abrasômetro com vistas à simulação do desgaste desses componentes. Na configuração deste equipamento, o ângulo de ataque do abrasivo varia de 0 a 90° reproduzindo as diversas regiões de desgaste das bombas. No ensaio utilizou-se uma suspensão abrasiva de água e areia na proporção de 5% em peso e velocidade de impacto da região de estagnação igual a 8,4 m/s. Foram avaliadas ligas ferrosas com diferentes teores de Cromo e Molibdênio no estado temperado e revenido a 200°C. Os mecanismos de desgaste atuantes durante o ensaio foram analisados através de Microscopia Eletrônica de Varredura. Para amostras com maiores teores de Cromo notou-se uma maior resistência ao desgaste erosivo. Além disso, a adição de Molibdênio eleva significativamente a resistência a esse tipo de desgaste. Notou-se ainda, que a taxa de desgaste decresce durante o ensaio devido, basicamente, à destruição das arestas cortantes do abrasivo.*

**Palavras-chave:** *Desgaste erosivo, ferros fundidos brancos de alto Cromo, rotores e carcaças de bombas*

### 1. INTRODUÇÃO

O desgaste erosivo representa um sério problema em usinas de processamento de minérios. Nas várias etapas de extração da cassiterita, por exemplo, é despendido um montante relativamente elevado de recursos na reposição de elementos que estão sujeitos à ação deterioradora de partículas suspensas na polpa manipulada. Somando-se as perdas de eficiência desses equipamentos, as

paradas do processo de produção e custos de manutenção, tem-se altas cifras de recursos, que podem comprometer economicamente o processo extrativo desse minério.

Nesta situação em particular, os ferros fundidos brancos de alto Cromo são largamente empregados, principalmente na confecção de calhas de transporte, impelidores de britadores e rotores e carcaças de bombas. Esta aplicação justifica-se, basicamente, pela larga fração volumétrica de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  que são formados nestas ligas durante a solidificação. A dureza destes carbonetos depende de sua composição, e, tipicamente, apresentam valores entre 1200 e 1700HV (Berns *et al.*, 1987; Gundlach *et al.*, 1977 e Rohrig, 1979). Os abrasivos da polpa bombeada no processo de extração da cassiterita são constituídos na sua maior parte por  $SiO_2$  (tipicamente cerca de 80%), cuja dureza pode variar de 800 a 1100HV (Uetz, 1986). Desta forma, os carbonetos de  $M_7C_3$  podem atuar de forma efetiva na redução do desgaste erosivo em componentes que interagem com  $SiO_2$ . A matriz desses ferros fundidos por sua vez é constituída de martensita revenida e de austenita retida, além de carbonetos não dissolvidos.

Com o propósito de simular o desgaste gerado por essas partículas alguns dispositivos são relatados na literatura. Dentre estes, destacam-se: o ensaio de desgaste abrasivo com roda de borracha, o ensaio de desgaste erosivo com amostras presas ou não a discos rotativos, o ensaio de erosão com partículas dispersas em uma lama abrasiva, ensaio com jato da mistura abrasivo/fluido (Zu *et al.*, 1990, Madsen, 1992, Clarck *et al.*, 2001). Em alguns desses equipamentos, o ângulo de incidência do abrasivo pode ser variado, permitindo assim, a identificação desse parâmetro no comportamento tribológico (Stevenson, *et al.*, 1995, Hansen, 1979 e Ellis *et al.*, 1990). Assim, alguns autores puderam sugerir que o ângulo de impacto que provoca maior taxa de desgaste em ferros fundidos brancos é da ordem de  $60^\circ$  (Aptekar *et al.*, 1985; Katavic, 1987 e Ninham *et al.*, 1987).

No caso de rotores e carcaças de bombeamento de lama abrasiva contendo cassiterita, uma análise preliminar mostrou a presença de microcorte, microsulcamento e microindentação, Figura (1). Isso sugere, portanto, a presença de diferentes ângulos de ataque. Assim, através de um amplo programa de estudo do desgaste erosivo e corrosivo observado em diferentes tipos de bombas, foram desenvolvidos e projetados diferentes tipos de equipamentos. O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desempenho de diferentes amostras de ligas ferrosas em um equipamento simples e com ângulo de incidência variando de  $0$  a  $90^\circ$ .

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 2.1. Materiais

Foram selecionados cinco materiais, cujas composições são apresentadas na Tabela (1). Nesta tabela são expressos também os respectivos valores de dureza. Os corpos de prova foram temperados e revenidos a  $200^\circ C$ .

Tabela 1. Composição química e dureza das amostras testadas (porcentagem em peso).

<i>Amostra</i>	<i>H<sub>Rc</sub></i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Nb</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Mg</i>
L1	59	<b>2,72</b>	0,66	0,66	0,02	0,03	<b>19,45</b>	<b>1,09</b>	0,26	-	-	-	-	-	-
L2	59	<b>2,72</b>	0,68	0,79	0,04	0,02	<b>18,86</b>	<b>1,19</b>	0,37	-	-	-	-	-	-
L3	55	<b>1,10</b>	0,64	0,73	0,02	0,02	<b>11,70</b>	<b>0,56</b>	0,10	-	1,40	-	-	-	-
L4	56	<b>2,75</b>	0,62	0,66	0,04	0,02	<b>26,92</b>	<b>0,00</b>	-	-	-	-	-	-	-
L5	52	<b>2,65</b>	0,74	0,93	0,07	0,06	<b>22,29</b>	<b>0,50</b>	0,10	-	0,03	0,01	0,01	0,09	0,02

O material das amostras foi caracterizado através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A microestrutura apresentada na Figura (2) evidencia a presença dos carbonetos do tipo  $M_7C_3$  formados pelo Cromo, dispersos em uma matriz martensítica. As ligas estudadas são todas do tipo hipereutética, com exceção da liga L3, que possui apenas 1,1% Carbono (aço-ferramenta).

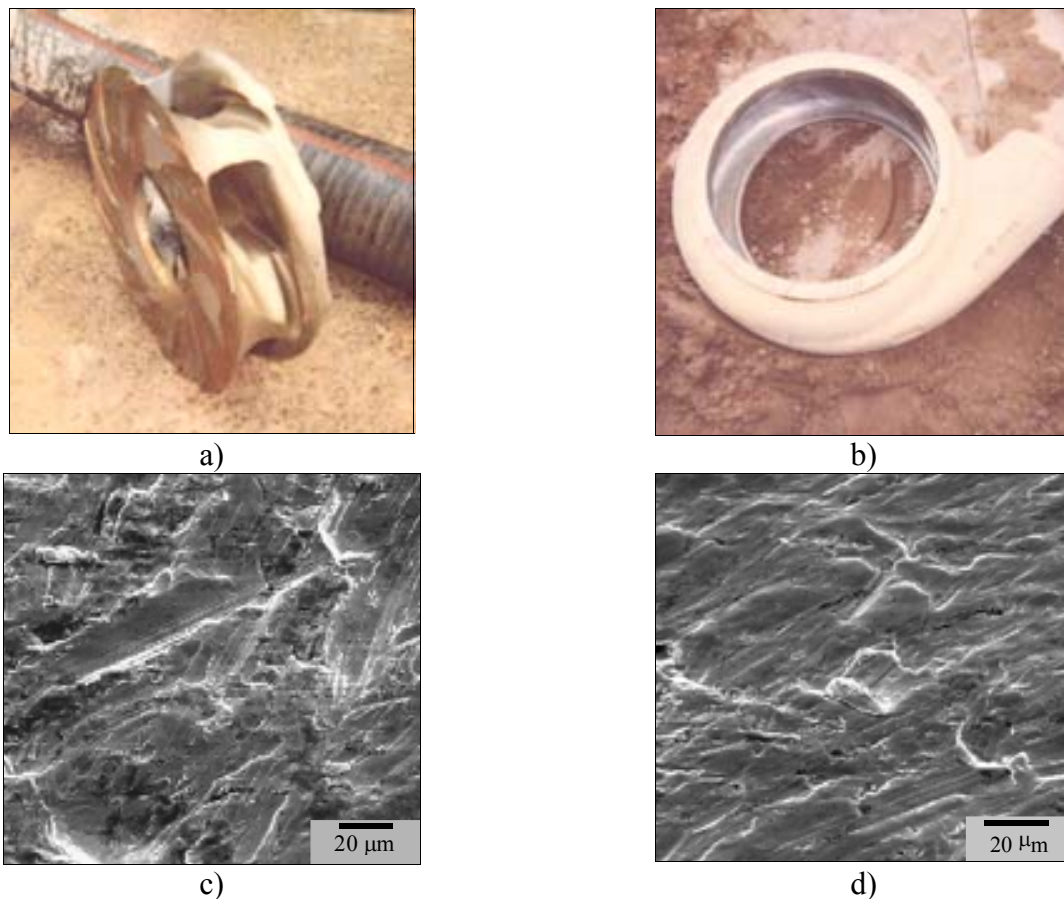


Figura. 1. Caracterização do desgaste em sistemas de bombeamento de água e minério contendo cassiterita, a) rotor e b) voluta após o uso, e c) e d) superfícies de desgaste.

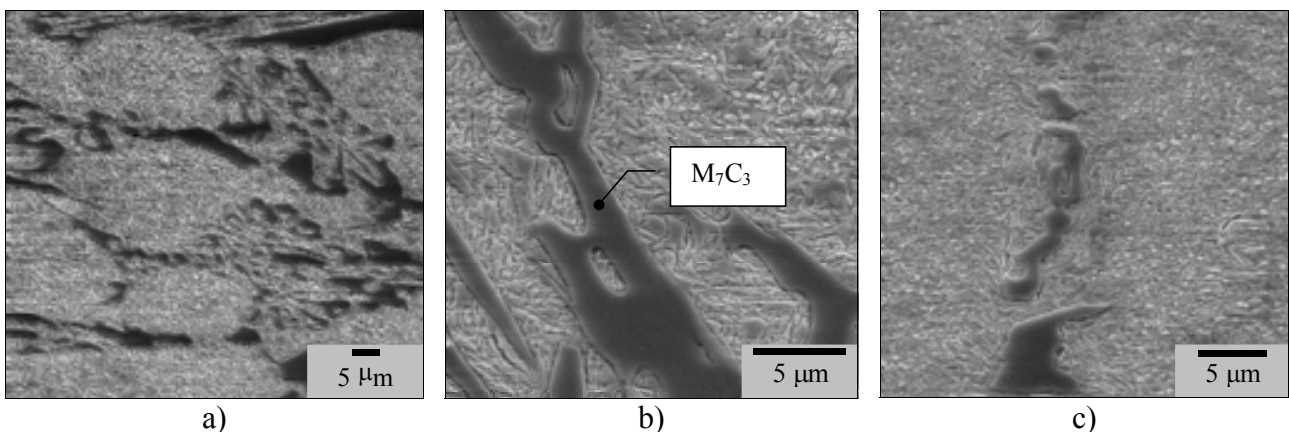


Figura 2. Microestrutura típica das ligas estudadas, a) Liga L5, b) detalhe de a) mostrando carbonetos eutéticos de  $M_7C_3$  e c) Liga L3.

## 2.2. Ensaio de erosão

Para a simulação do ambiente abrasivo e dos mecanismos de desgaste observados na Figura (1) foi desenvolvido no Laboratório de Tribologia e Materiais um hidro-abrasômetro, mostrado na Figura (3a). O equipamento possui como características principais o controle da velocidade de impacto, um sistema de controle da temperatura da lama abrasiva e a realização simultânea de quatro ensaios por teste. A fixação da amostra ao porta-amostra se dá em uma posição radial simétrica ao eixo de 50 mm. A velocidade relativa empregada foi de 8,4 m/s.

As amostras foram obtidas a partir de cilindros vazados da mesma corrida utilizada na produção de componentes de bombas de transporte de polpa do minério de cassiterita. Para minimizar os

rechupes durante a solidificação foi utilizado uma conicidade de cerca de 5°. Após a solidificação dos corpos de prova, foram realizadas operações de torneamento, têmpera e revenimento a 200 °C. As dimensões finais dos corpos de prova são apresentadas na Figura (3b),  $\phi$  20 x 75 mm.

A suspensão abrasiva foi preparada com água deionizada e areia Normal Brasileira com diâmetro médio de 0,6 mm, na proporção de 5% em peso.

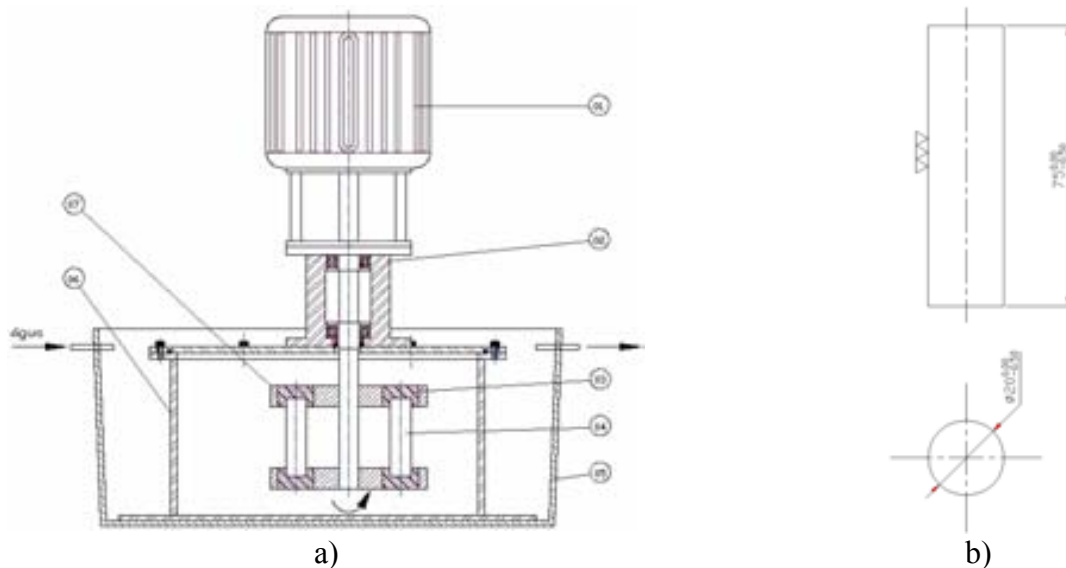


Figura 3. Hidro-abrasômetro construído, a) 01- motor, 02 - mancal, 03 - bucha, 04 - amostra, 05- cuba de refrigeração, 06, - cuba de abrasivo 07- porta-amostra e b) dimensões da amostra.

As taxas de desgaste foram determinadas pelo método gravimétrico interrompido sendo realizadas medições da perda de massa em intervalo de 5 horas para as seis primeiras medições e 12 horas para a última. As perdas de massa foram mensuradas numa balança com resolução de  $10^{-5}$  g e os resultados expressos em gráficos ajustados por uma função de potência.

Através de MEV foram realizadas avaliações das superfícies desgastadas, bem como análises para caracterizar a degradação das partículas abrasivas. A topografia superficial das amostras foi analisada através de um interferômetro laser UBM, Microfocus Expert IV.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura (4) ilustra o gráfico com os resultados preliminares de quatro amostras sendo que o conjunto era constituído de duas amostras da liga L4 e duas da liga L3. Nas primeiras horas de teste, observa-se um decréscimo rápido da taxa de desgaste. Este fenômeno pode ser atribuído à rugosidade inicial das amostras, cuja etapa final de processamento foi o torneamento. Para minimizar os efeitos deste parâmetro, foi utilizado o processo de retífica cilíndrica de todas as amostras. A Figura (4b) mostra a rugosidade típica apresentada pelas amostras antes e depois do processo de retífica.

A Figura (5) apresenta os resultados dos ensaios com amostras retificadas. Observa-se, que todos os materiais apresentam um mesmo comportamento durante o experimento. Ou seja, as taxas de desgaste decrescem com o tempo obedecendo a uma lei de potência com bom coeficiente de correlação, assumindo uma regressão do tipo potência.

A partir da análise das partículas abrasivas antes e após o término dos ensaios (Figura (6)), pôde-se constatar, que grande parte da perda do poder erosivo está associado à perda das arestas de corte. Além disso, foram feitas medições geométricas nos abrasivos antes e depois dos ensaios através de um *software* de análise de imagens. Os resultados expressos na Tabela (2) mostram que o diâmetro médio e o fator de forma (número adimensional, que representa a razão entre o maior e o menor diâmetros medidos de cada abrasivo) não sofrem significativa redução durante o ensaio. Isso mostra que, de fato, as modificações sofridas pelo abrasivo estão restritas às arestas cortantes.

Na Figura (7) nota-se que o abrasivo novo apresenta valores mais próximos da média. Isso pode estar associado à presença de partículas de impureza com diâmetro pequeno e de baixa dureza que são totalmente destruídos ao longo do ensaio.

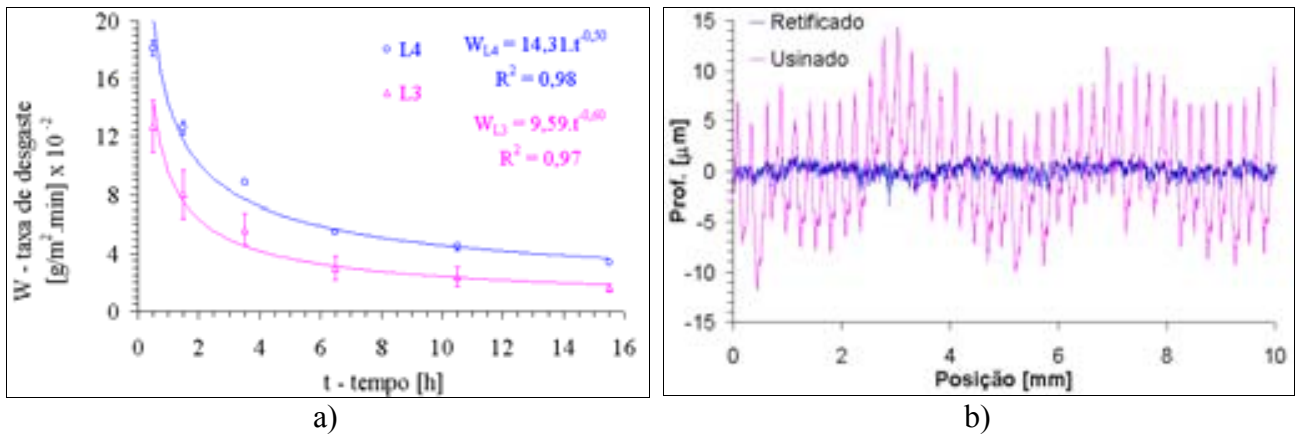


Figura 4. Efeito da rugosidade inicial das amostras nos ensaios preliminares: a) pré-teste com amostra usinada e b) rugosidade comparativa da amostra antes e depois da retífica.

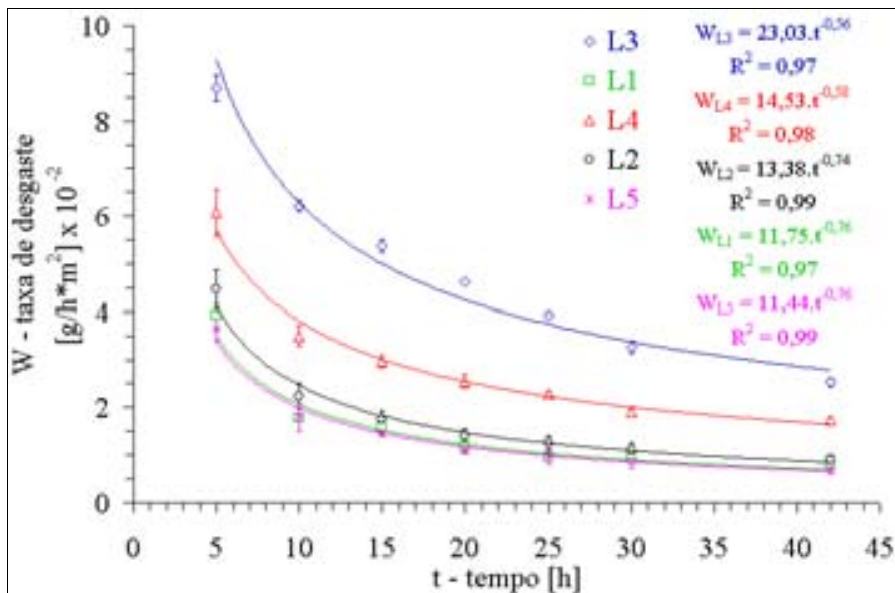
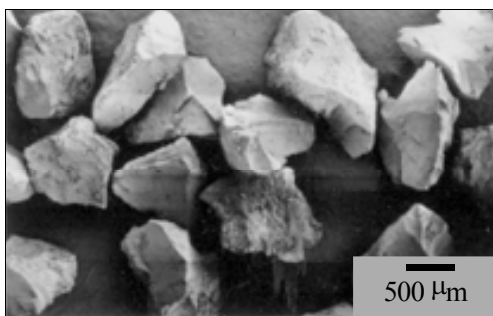
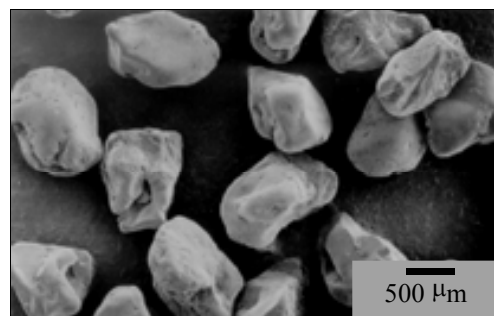


Figura 5. Evolução da taxa de desgaste para as diferentes ligas estudadas.



a)



b)

Figura 6. Mudança geométrica do abrasivo, a) antes do ensaio – abrasivo pontiagudo e b) depois do ensaio – abrasivo com arestas arredondadas.

Tabela 2. Caracterização dos abrasivos.

<i>Abrasivo</i>	<i>Diam. Máx. [mm]</i>	<i>Diâm. Mín. [mm]</i>	<i>Diâm. Médio [mm]</i>	<i>Fator de forma</i>	
Novo	768.8	480.6	617.8	1.45	Media
	163.7	120.0	130.4	0.25	Desv. Pad.
Usado	718.2	508.9	608.1	1.36	Media
	109.3	101.5	095.5	0.22	Desv. Pad.

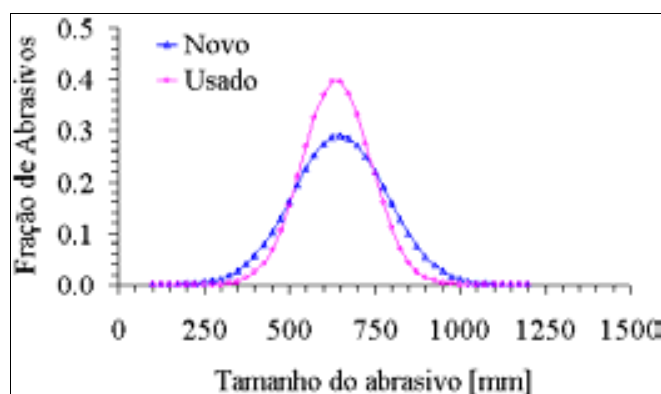


Figura 7. Distribuição normal do diâmetro médio do abrasivo utilizado.

As ligas L1 e L5, que representam ferros fundidos brancos de alto Cromo com adições de Molibdênio, 0,5 e 1,0 % em peso respectivamente, apresentam as menores taxas de desgaste. O melhor desempenho dessas duas ligas em relação ao aço-ferramenta pode ser explicado pelo maior teor de carbono, que resulta em uma maior fração volumétrica de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ . Comparando-se o desempenho da liga L4 com os das ligas L1 e L5, nota-se uma considerável superioridade desses dois últimos em relação ao primeiro, apesar dessas ligas terem praticamente o mesmo teor de carbono. O teor de Cromo é superior na liga L4. Essa diferença na taxa de desgaste pode ser atribuída à adição de Molibdênio, que atua diretamente nas transformações martensítica e bainítica, bem como na precipitação secundária de carbonetos. Nos ensaios realizados, a adição de até 1 % em peso de Molibdênio nos ferros fundidos brancos de alto Cromo resultou em uma redução da taxa de desgaste superior a 50%. Apesar do elevado preço desse elemento, a sua introdução em teores de até 3 % resulta, normalmente, em uma redução de custos de produção. No presente caso, peças contendo até 1% de Molibdênio estão sendo testadas e seus valores de desgaste comparados com as ligas sem esse elemento.

A Figura (8) apresenta o aspecto da superfície desgastada de algumas das ligas estudadas. Nas ligas de alto Cromo há uma predominância do mecanismo de indentação em todas as regiões de choque do abrasivo (todos os ângulos de ataque). Nota-se na Figura (8b), região correspondente aos menores ângulos de ataque, e portanto com maior tendência ao desenvolvimento de microcorte, que não há evidências de riscos. Nota-se ainda nessa região a presença da estrutura eutética contendo carbonetos de  $M_7C_3$ . Esses carbonetos funcionam como barreira física à ação dos grãos de areia, reduzindo assim a taxa de desgaste. Comparando-se essas superfícies de desgaste com as de rotores e volutas utilizadas na extração da cassiterita, pode-se afirmar que os parâmetros empregados neste trabalho levaram a uma ação menos agressiva da areia, sugerindo, portanto, que se deva aumentar a velocidade de teste, podendo-se assim, melhor reproduzir os mecanismos de desgaste observados na Figura (1). Todavia, os resultados já obtidos serão confrontados com os obtidos na prática para se verificar a existência de alguma correlação entre os dois tipos de teste.

A Figura. (8c) mostra a superfície da liga L3 (menor teor de Cromo e Carbono). Nota-se, que para um ângulo de incidência de  $60^\circ$  das partículas, há uma tendência ao aparecimento de microriscos, como indicado pelo círculo. Quando se observa a topografia das amostras ensaiadas, nota-se que nas Figuras (9a e 9b) o aspecto da superfície mantém-se praticamente inalterado para as

amostras com alto teor de elementos de liga, e para qualquer ângulo de incidência. Contudo, para a amostra com baixo teor de elementos de liga, mostrada nas Figuras. (9c e 9d) e sob o ângulo de incidência de 60°, a superfície apresenta-se mais “rugosa”. Este comportamento muito provavelmente está associado à baixa quantidade de carbonetos contidos na matriz martensítica.

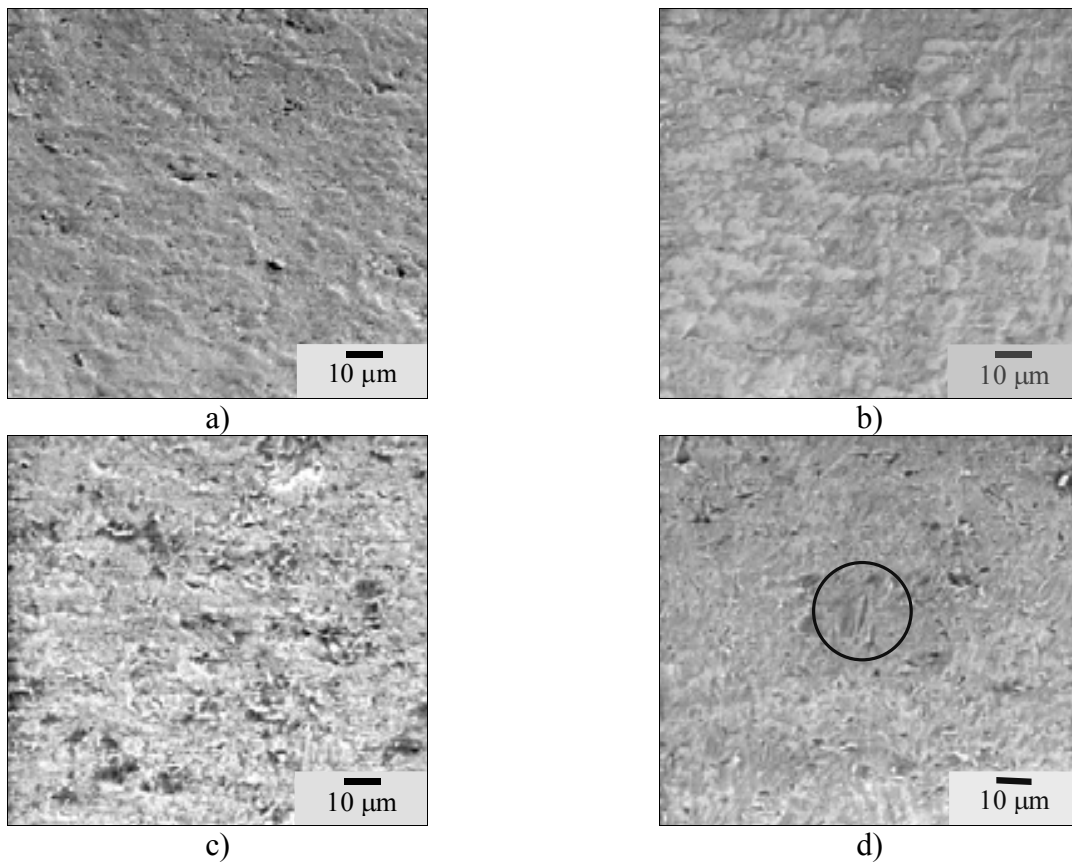


Figura 8. Superfície desgastada, a) amostra L5 com ângulo incidência do abrasivo de 90°, b) amostra L5 com ângulo de incidência de 60°, c) amostra L3 com ângulo incidência do abrasivo de 90°, d) amostra L3 com ângulo de incidência de 60°, MEV.

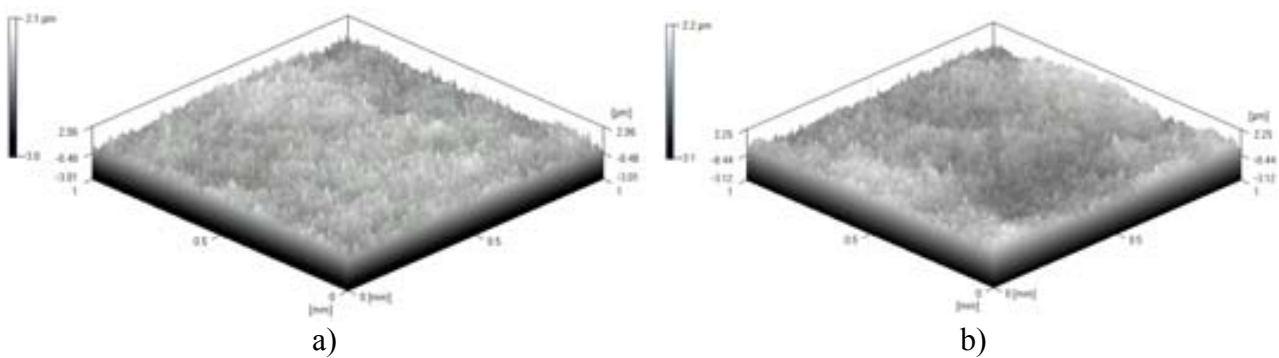


Figura 9 (continua)

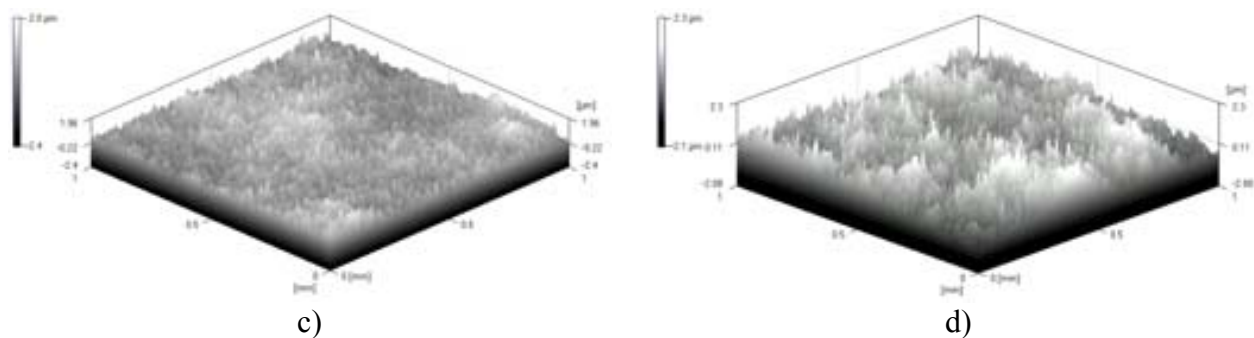


Figura 9. Aspecto topográfico típico das amostras ensaiadas. a) amostra L5 sob incidência de 90°, b) amostra de L5 sob incidência de 60°, c) amostra L3 sob incidência de 90° e d) amostra L3 sob incidência de 60°.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido, projetado e construído um equipamento para simular o desgaste erosivo de bombas de misturas água/minério de cassiterita. Os ensaios realizados com esse equipamento permitem concluir que:

- a) a resistência ao desgaste é maior para as amostras com maiores teores de Cromo e Molibdênio para a condição erosiva ensaiada;
- b) a adição de Molibdênio eleva consideravelmente a resistência ao desgaste erosivo;
- c) a taxa de desgaste decresce durante o ensaio devido, basicamente, à redução das arestas cortantes do abrasivo, e não pela efetiva redução do seu diâmetro médio.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Mineradora Taboca S/A pela confecção do hidro-abrasômetro e pelo fornecimento das amostras.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aptekar, S.S. and Kosel, T.H., "Erosion of white cast irons and stellite", *Wear of Materials*, ASME, New York, 1985, pp. 677-686.
- Avery, H.S. *Wear of Materials*, ASME, New York, 1977, pp. 148-157.
- Berns, H. and Fisher A., "Microstructure of Fe-Cr-C hardfacing alloys with additions of Nb, Ti and B", *Metallography*, 20 (1987) 401-429.
- Clarck, H.McI. and Llewellyn, R.J., "Assessment of the erosion resistance of steels used for slurry handling and transport in mineral processing applications", *Wear* 250 (2001)32-44.
- Ellis, J.S. and Armstrong, B.M. "Evaluation of wear Resistance Materials for use in Minerals Handling Systems" British Steel, 1990.
- Gundlach, R.B. and Parks, J. L., "Influence of abrasive hardness on wear resistance of high-chromium irons", *Wear of Materials*, ASME, New York, 1977, pp. 211-216.
- Hansen, J.S. "Relative erosion resistance of several material", in W.F. (ed.), *Erosion: Prevention and Useful Applications*, ASTM STP 664, ASTM, Philadelphia, 1979, pp. 148-162.
- Katavic, I. "Investigation of erosion of white cast irons", *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. On Erosion by liquid and solid Impact*", Cavendish Laboratory, Cambridge, 1987, pp. 841-844.
- Madsen, B.W., "Corrosive Wear", in "*Friction, Lubrication, and Wear Technology*", ASM Handbook, Vol. 18, 1992, p. 271-279.
- Ninham, A.J. and Levy, A.V., "The erosion of carbide-metal composites", *Wear of Materials*, ASME, New York, 1987, pp. 825-831.
- Rohrig, K., "Cast abrasion resistant iron base alloys, in *Metallurgical Aspects of Wear*", Bad Pyrmont, Germany, 1979, pp. 269-289.



Stevenson, A.N.J. and Hutchings, I.M. "Wear of hardfacing white cast irons by solid particle erosion" *Wear* 186-187 (1995) 150-158.  
Uetz, H.; "Abrasion und Erosion", Carl Hanser Verlag, München, 1986.  
Zu, J.B., Hutchings, M. and Burstein, G.T., "Design of a slurry test rig", *Wear* 140 (1990)331-344.

## **ASSESSMENT OF EROSIVE WEAR RESISTANCE OF FERROUS ALLOYS USED IN CASSITERITE PUMPINGS SYSTEMS**

### **Francisco Francelino Ramos Neto**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG, [francisco@.mecanica.ufu.br](mailto:francisco@.mecanica.ufu.br)

### **Roberto Máscia**

Mineração Taboca, Pitinga-AM

### **Robson José de Souza**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG

### **Sinésio Domingues Franco**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG, [ltm-sdfranco@.ufu.br](mailto:ltm-sdfranco@.ufu.br)

***Abstract.** During the cassiterite ore processing, a mixture containing mainly silicon oxide, cassiterite and water has to be pumped, which results in large maintenance costs due to erosive wear. The main eroded parts in these pumping systems are the rotors and the carcasses. This paper describes the design and construction of a slurry pot, which allows the simulation of the erosive wear process in pumping systems including hard particles. To simulate the wear conditions in such system, it was used a suspension of sand (5 % weight). The impingement velocity was fixed at about 8 m/s. Different quenched and tempered high chromium white cast irons were tested. The wear mechanisms were analyzed using a scanning electron microscope. The wear tests showed a positive influence of the  $M_7C_3$  carbides and the addition of up to 1 weight percent of molybdenum considerably increased the wear resistance. Additionally, an analysis of the initial reduction of the wear rate was found to be mainly related to a reduction of the abrasive sharp cutting edges during the test.*

***Keywords.** Erosive wear, high chromium white cast irons, pumping rotors and carcass.*