

INFLUÊNCIA DOS MEIOS DE RESFRIAMENTO NA ESTRUTURA E RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE UM AÇO BAIXA-LIGA FUNDIDO¹

Bruno Megale Colombo²
Maria Aparecida Larosa³
Maria Aparecida Pinto⁴

Resumo

Os aços baixa-liga têm sido usados na fabricação de peças de grande porte para a indústria de mineração. Amostras de um aço baixa-liga ao cromo-molibdênio, após tratamento de normalização, têmpera em diferentes meios (água, óleo e ar forçado) e revenimento, foram caracterizadas microestruturalmente e submetidas ao ensaio de dureza. Adicionalmente, para cada meio de resfriamento utilizado, as amostras foram avaliadas quanto à resistência ao desgaste em ensaio de microabrasão com esfera, a fim de estabelecer os mecanismos de desgaste para cada uma das três condições de tratamento. A amostra resfriada ao ar apresentou melhor resistência ao desgaste com predominância do mecanismo de desgaste por microsulcamento. As amostras resfriadas em água e em óleo apresentaram três mecanismos de desgaste: microsulcamento, microcorte e microtrincamento.

Palavras-chave: Aços baixa-liga; Resistência ao desgaste; Desgaste por microabrasão.

EFFECT OF DIFERENT QUENCHING MEDIA ON THE STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF A LOW-ALLOY STEEL

Abstract

Low-Alloy Steels have been used in the manufacture of parts in the mining industry. Samples of CrMo-type low-alloy steel, after annealing, quenching with different cooling rates (air, oil and water) and tempering, were characterized microstructurally and subjected to hardness testing. Additionally, for each cooling rate used, the abrasive wear resistance was analyzed using micro-scale abrasive wear test, in order to establish the mechanisms of wear for each of the three conditions of treatment. The sample cooled in air showed better wear resistance involving microploughing wear mechanism. The samples cooled in water and in oil showed behavior was termed "mixed-mode" and involved three wear mechanisms: microcutting, microploughing and microcracking.

Key words: Low-alloy steels; Wear resistance; Micro-scale abrasive wear test.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro metalúrgico, Analista de Comercialização - COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista*

³ *Doutoranda, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP*

⁴ *Engenheira metalúrgica, D.Sc., Professora Adjunta, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Campus Universitário – Morro do Cruzeiro, 35400-000 – Ouro Preto – MG; mariap@em.ufop.br*

1 INTRODUÇÃO

Os aços baixa-liga fundidos são amplamente utilizados na indústria de máquinas e equipamentos de grande porte, sendo muitas vezes desenvolvidos para atender condições severas de desgaste como na indústria de mineração, onde o contato constante com minérios resulta na deformação gradual das peças, com alteração em suas dimensões e perda de eficiência. Neste trabalho, amostras de um aço baixa-liga ao cromo e molibdênio foram submetidas a tratamentos térmicos de normalização, têmpera em diferentes meios de resfriamento (água, óleo e ar forçado) e revenimento como objetivo de avaliar a influência das diferentes estruturas obtidas na resistência ao desgaste. Após os tratamentos térmicos, as amostras foram caracterizadas microestruturalmente e a resistência ao desgaste abrasivo foi avaliada, utilizando-se o ensaio de desgaste por microabrasão com esfera.

1.1 Aços Baixa-liga Fundidos

Muitos materiais de engenharia, usados para aplicações nas quais a resistência ao desgaste é a principal característica, são materiais polifásicos ⁽¹⁾. Um grupo particular desses materiais polifásicos é formado pelos aços baixa-liga ao cromo e molibdênio.

As propriedades dos aços dependem de sua estrutura, sendo esta influenciada pela composição química e pelas condições de processamento do material. Desta forma, nos aços baixa-liga são usadas combinações de elementos de liga, como cromo e molibdênio, e tratamentos térmicos específicos, como têmpera e revenimento, para garantir a estes aços melhor desempenho, segurança, economia e, principalmente, boa resistência ao desgaste.⁽²⁾ Os aços baixa-liga ao cromo-molibdênio, após tratamento térmico de têmpera e revenimento, apresentam uma matriz predominantemente martensítica com carbonetos dispersos, podendo apresentar bainita e austenita residual.

O cromo e o molibdênio nos aços baixa-liga atuam deslocando as curvas de início e fim de transformação nos diagramas TTT/TRC para a direita, melhorando a temperabilidade do aço com conseqüente aumento da dureza. Entretanto, como nos aços baixa-liga ao cromo e molibdênio a temperabilidade é alta, no tratamento de têmpera sob condições de resfriamento em meios como óleo ou água, podem surgir apreciáveis tensões internas que, se não bem controladas, podem ocasionar deformações e fissurações no material.⁽³⁾

Quando submetidos ao tratamento de revenimento após a têmpera, os aços baixa-liga contendo manganês, cromo e níquel, além de impurezas como o fósforo, tornam-se susceptível ao fenômeno de fragilização pelo revenimento. A fragilização pelo revenimento desenvolve-se dentro da faixa de temperatura em que há susceptibilidade ao fenômeno e refere-se à perda progressiva da tenacidade à fratura do material. Em muitos casos, a dureza e as propriedades mecânicas do material não são sensíveis à fragilização, exceto em casos extremos, mas a temperatura de transição pode ser acrescida em mais de 100°C para a condição do aço fragilizado pelo tratamento térmico. Esta mudança na temperatura de transição dúctil-frágil está associada à fratura intergranular ao longo do contorno da austenita anterior.⁽⁴⁾ A fragilização pelo revenimento aumenta a taxa de crescimento tanto das trincas de fadiga quanto das trincas de corrosão sob tensão, significativamente.⁽⁵⁾

1.2 Resistência ao Desgaste Abrasivo

No desgaste abrasivo, ocorre a remoção ou deslocamento de material pela presença de partículas duras ou, em alguns casos, por protuberâncias duras entre ou engastadas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo.⁽⁶⁾

Embora a resistência ao desgaste não seja uma propriedade intrínseca do material, mas que depende das condições gerais do sistema tribológico, há uma relação estreita entre a microestrutura do material e seu comportamento em desgaste, visto que o desgaste abrasivo pode ocorrer por mecanismos dominados pela deformação plástica ou por fratura frágil. No primeiro caso, a dureza do material é um fator importante na determinação da resistência ao desgaste, ao passo que, no segundo caso, a tenacidade à fratura é mais importante, embora a dureza ainda tenha seu papel.⁽⁶⁾

Os elementos microestruturais dos materiais como a matriz, defeitos cristalográficos, inclusões, fases precipitadas, poros, microtrincas têm influência sobre a resistência ao desgaste. No caso dos aços baixa-liga ao cromo-molibdênio temperados e revenidos, a quantidade, tamanho, forma e ligação dos carbonetos com a matriz têm grande influência na resistência ao desgaste abrasivo, assim como o teor de austenita residual.⁽⁷⁻⁹⁾

1.3 Ensaio de Desgaste por Microabrasão com Esfera

O conhecimento do desgaste sofrido pela superfície do material, através de um método reprodutível e bem caracterizado, é importante para sua avaliação e aplicação. Neste âmbito, o ensaio de desgaste por microabrasão com esfera ou ensaio de desgaste do tipo de esfera-sobre-placa tem-se mostrado como uma técnica muito eficiente na avaliação do desgaste abrasivo não só de revestimentos, mas também de superfícies.

Neste ensaio, a amostra é pressionada, pelo carregamento de um peso inoperante, contra uma esfera de aço em rotação. Uma suspensão abrasiva é goteja na interface de desgaste durante o ensaio. Após a esfera percorrer uma distância previamente estabelecida, chamada de distância de rodagem, ocorre a formação de uma depressão circular ou calota sobre a superfície da amostra. O ensaio é finalizado e a calota proveniente do desgaste é medida para se determinar, a partir do seu diâmetro, a taxa de desgaste.⁽¹⁰⁻¹⁵⁾ A Figura 1 apresenta, esquematicamente, o diagrama do dispositivo utilizado no ensaio de desgaste por microabrasão com esfera e as características da calota formada.

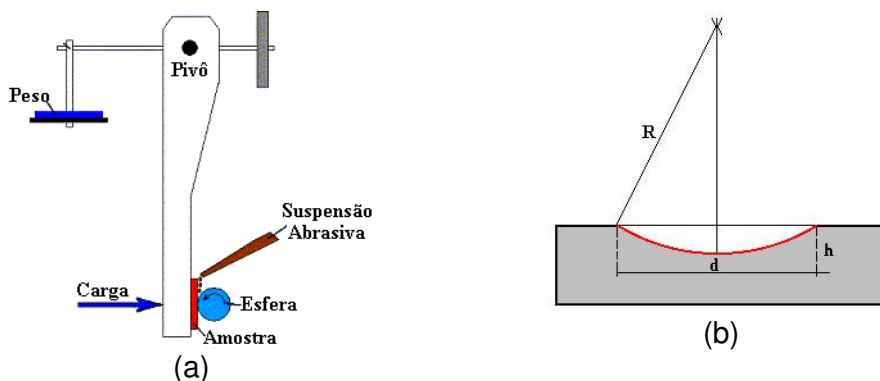


Figura 1: (a) Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio por microabrasão com esfera; (b) Calota esférica produzida pelo desgaste abrasivo na amostra

O volume de desgaste pode ser então deduzido como uma função da distância de rodagem e o coeficiente de desgaste K calculado a partir da Equação 1, onde d é o diâmetro da calota, R é o raio da esfera, L é a distância de rodagem e N é a carga normal aplicada à superfície da amostra.

$$K = \frac{\pi d^4}{64RLN} \text{ [m}^2\text{/N]} \quad (1)$$

A caracterização dos mecanismos de desgaste tem sido feita de acordo com as deformações observadas na superfície de desgaste das amostras nas várias condições de ensaio. O processo dominante é controlado pela natureza do movimento das partículas abrasivas na região de contato das duas superfícies. Se as partículas não têm movimento em relação à superfície da esfera, mas agem como indentadores fixos, movendo através da amostra, uma série de sulcos finos e paralelos é produzida sobre a superfície da amostra. Isto leva ao desgaste por microsulcamento ou abrasão a dois corpos. Se, por outro lado, as partículas abrasivas rolam entre as duas superfícies, múltiplas indentações, sem direcionamento evidente, são produzidas em um processo conhecido como microcorte ou abrasão por rolamento ou abrasão a três corpos.⁽¹²⁻¹⁹⁾ O mecanismo de desgaste dominante no ensaio depende não só das características da amostra, mas também da carga aplicada, fração volumétrica de abrasivo na suspensão, material abrasivo, material da esfera e condições da superfície da amostra e da esfera.⁽¹⁷⁻¹⁹⁾

De acordo com Zum-Gahr,⁽²⁰⁾ um modelo mais geral para descrever o desgaste abrasivo foi desenvolvido, fazendo distinção entre quatro tipos de interação entre as partículas abrasivas e a superfície de desgaste, a saber: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento. No caso ideal, o microsulcamento, produzido por uma única passada de uma partícula abrasiva, não resulta em qualquer arrancamento de material da superfície de desgaste. Uma rebarba é formada à frente da partícula abrasiva e o material é continuamente deslocado lateralmente, formando bordas adjacentes ao sulco produzido. A perda de massa pode ocorrer, entretanto, devido à ação de muitas partículas abrasivas ou repetidas ações de uma única partícula. O material pode ser sulcado para o lado repetidamente pela passagem das partículas e pode se quebrar por um ciclo de fadiga, isto é, microfadiga. O microcorte puro resulta na perda de massa por lascas iguais ao volume dos sulcos de desgaste. O microtrincamento ocorre quando tensões, altamente concentradas, são impostas pelas partículas abrasivas, particularmente sobre a superfície de materiais frágeis. Neste caso, grandes rebarbas (debris) de desgaste são arrancadas da superfície devido à formação e propagação de trincas. O microsulcamento e o microcorte são os processos dominantes nos materiais dúcteis, enquanto o microtrincamento torna-se importante para os materiais frágeis. A Figura 2 apresenta, de modo esquemático, os quatro tipos de interação entre as partículas abrasivas e a superfície de desgaste.

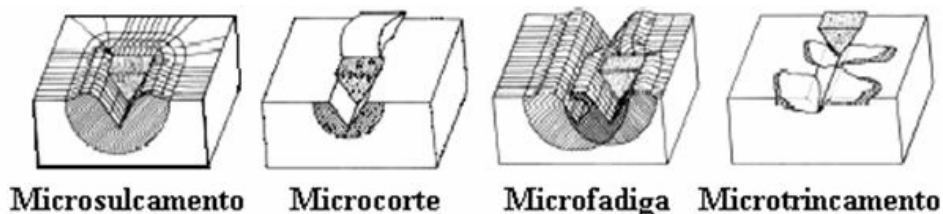


Figura 2 - Representação esquemática da interação entre as partículas abrasivas e a superfície de desgaste.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material usado para análise foi o aço baixa-liga fundido ao cromo e molibdênio, cuja composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço utilizado

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Mín.	0,70	0,80	0,30	-	-	2,00	-	0,40	-	0,025
Máx.	0,85	1,40	0,90	0,035	0,035	2,40	0,60	0,80	0,40	0,050

As amostras do aço foram submetidas a tratamentos térmicos na seguinte seqüência:

(a) tratamento de normalização: todas as amostras foram submetidas ao tratamento de normalização a uma temperatura de 900°C por 2 horas;

(b) tratamento de têmpera: após o tratamento de normalização as amostras do aço foram submetidas ao tratamento de têmpera à temperatura de 950°C, por 2 horas, com resfriamento em três meios diferentes: em água, em óleo e ao ar.; e

(c) tratamento de revenimento: após o tratamento de têmpera as amostras foram submetidas ao tratamento de revenimento à temperatura de 400°C por 2 horas.

Após a seqüência de tratamentos térmicos, as amostras foram preparadas para análise metalográfica, de acordo com os procedimentos padrão e caracterizadas microestruturalmente por meio de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, ensaios de dureza (Rockwell C) e microdureza (Vickers). Os valores apresentados para a dureza (HR_c) e microdureza Vickers (HV - Carga de 100 gf) correspondem à média de 10 medições. A quantificação dos constituintes presentes na microestrutura foi feita utilizando-se o programa de análise de imagens QWin acoplado a um microscópio ótico quantitativo Leica RX.

As amostras do aço, submetidas aos tratamentos de têmpera e revenimento em cada um dos meios de resfriamento, foram avaliadas quanto à resistência ao desgaste abrasivo em ensaio por microabrasão com esfera. A escolha deste tipo de ensaio foi, principalmente, devido a sua facilidade de execução, repetibilidade e reprodutibilidade. Além disso, a determinação do coeficiente de desgaste é feita a partir do diâmetro da calota de desgaste formada (de fácil medição) e não da perda de massa que, em alguns casos, por ser muito pequena, exige balanças de grande precisão. Para cada amostra foram feitos cinco ensaios e calculado o diâmetro médio das calotas. Os parâmetros de ensaio foram:

- carga aplicada: 1N;
- velocidade de rotação da esfera: 100 rpm;
- distância de rodagem: 180 m; e
- suspensão abrasiva: pó de sílica em água ($0,035 \text{ g/cm}^3$).

O equipamento usado para o ensaio de desgaste pertence ao Laboratório de Tratamentos de Superfícies e Processamento de Materiais por Laser do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Microestrutural

Na análise microestrutural, após tratamentos térmicos com resfriamento nos diferentes meios, as amostras apresentaram uma microestrutura constituída de martensita e bainita, como pode ser observado nas Figuras 3, 4 e 5 para os meios de resfriamento: ar forçado, óleo e água, respectivamente.



Figura 3: Estrutura do aço baixa-liga tratado e resfriado ao ar forçado

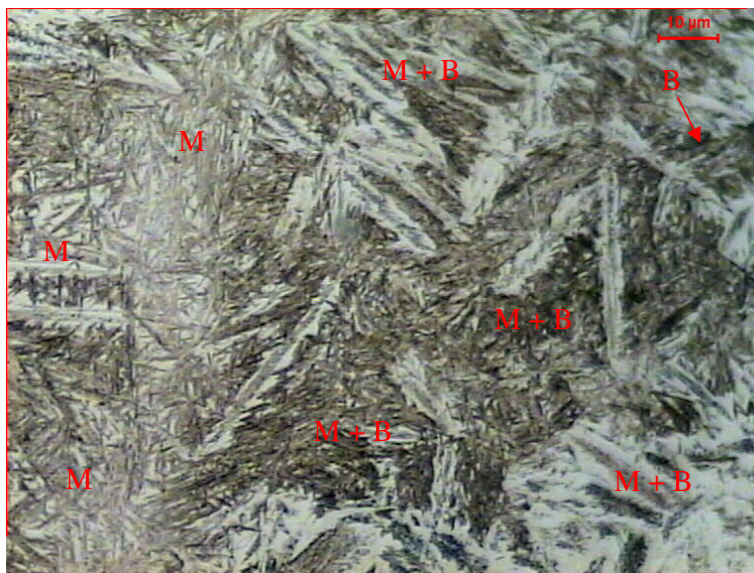


Figura 4: Estrutura do aço baixa-liga tratado e resfriado em óleo

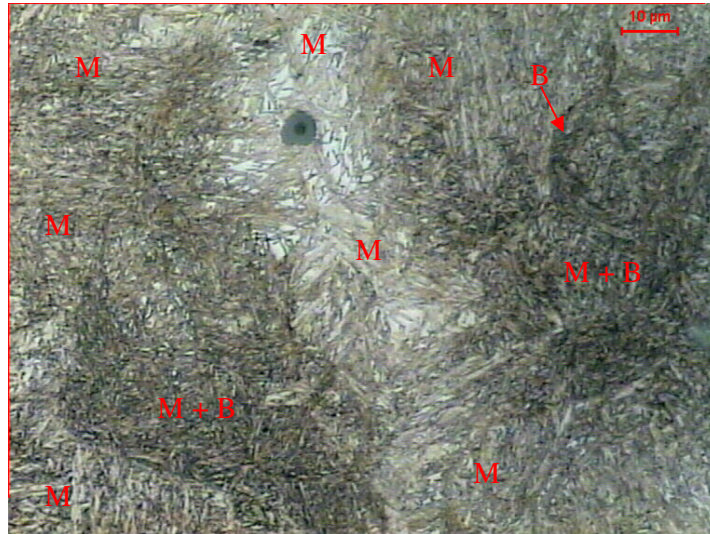


Figura 5: Estrutura do aço baixa-liga tratado e resfriado em água

Foi observado o refinamento da estrutura em função do aumento da taxa de resfriamento, bem como uma diminuição do teor de bainita, de acordo com os resultados encontrados na quantificação dos microconstituintes para cada um dos meios de resfriamento utilizados. Na Tabela 2 são apresentados os resultados da quantificação dos microconstituintes.

Foram observados na estrutura, também, pequenos carbonetos dispersos (apresentados na área em destaque da Figura 6), defeitos de fundição (porosidade) e inclusões, principalmente de sulfeto de manganês, conforme indicado pelas setas nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Tabela 2: Resultados da quantificação dos microconstituintes (%)

Ar Forçado				Óleo				Água			
Bainita	DP	Martensita	DP	Bainita	DP	Martensita	DP	Bainita	DP	Martensita	DP
40%	7,06	60%	7,11	29%	3,62	71%	3,62	26%	4,14	74%	4,09

DP – Desvio Padrão



Figura 6: Região de carbonetos dispersos presentes na estrutura

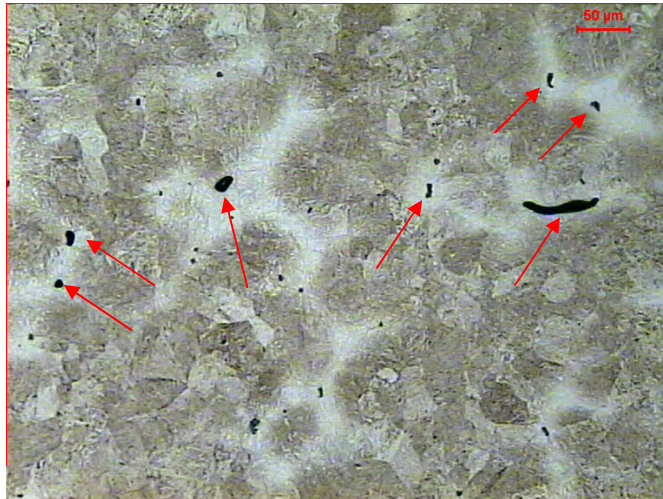


Figura 7: Defeitos de fundição: porosidade

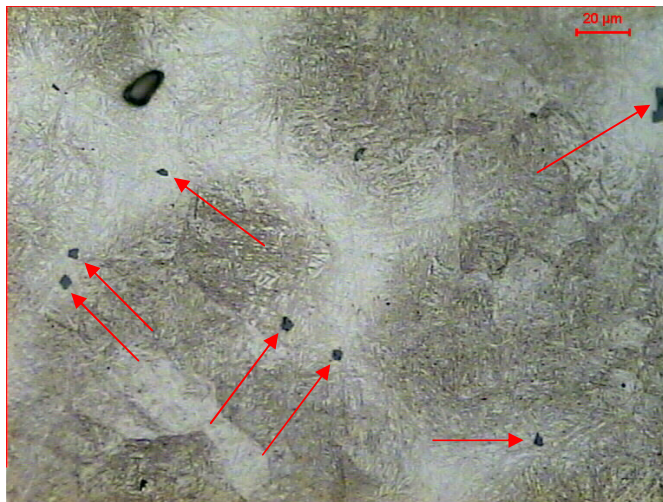


Figura 8: Inclusões: sulfeto de manganês

Os valores de dureza Rockwell C (média de 10 medições) encontrados para as amostras são apresentados na Tabela 3. Já os valores de microdureza Vickers medidos nos constituintes bainita e martensita são apresentados na Tabela 4. Como era de se esperar, os valores de microdureza das amostras resfriadas ao ar forçado foram menores, comparativamente às amostras resfriadas em água e óleo. Entretanto, os valores de microdureza das amostras resfriadas em óleo foram maiores que aqueles apresentados para as amostras resfriadas em água, apesar da taxa de resfriamento maior e conseqüente refino maior da estrutura.

Tabela 3 – Valores de dureza Rockwell C (HRc) das amostras analisadas

Ar Forçado		Óleo		Água	
Dureza	DP	Dureza	DP	Dureza	DP
44,9	4,11	46,8	0,78	49,5	1,63

DP – Desvio Padrão

Tabela 4 – Valores de microdureza Vickers (HV) dos constituintes

Ar Forçado				Óleo				Água			
Bainita	DP	Martensita	DP	Bainita	DP	Martensita	DP	Bainita	DP	Martensita	DP
326	14,9	706	17,3	529	39,9	896	54,9	401	45,9	861	32,1

DP – Desvio Padrão

3.2 Resistência ao Desgaste

Os diâmetros das calotas formadas nos ensaios de desgaste foram medidos utilizando os recursos do programa de análise de imagens acoplado a um microscópio ótico. A partir dos diâmetros medidos (média de cinco resultados), foram calculados os coeficientes de desgaste (K) das amostras, de acordo com a Equação (1). Os valores são apresentados na Tabela 5 e mostram que a maior resistência ao desgaste abrasivo, nas condições de ensaio, foi obtida para a amostra resfriada ao ar forçado, seguida pelas amostras resfriadas em água e em óleo.

Tabela 5 – Coeficiente de desgaste, K , das amostras analisadas

Resfriamento	Coeficiente de desgaste	DP
Ar Forçado	$K = 3,323 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	$1,830 \times 10^{-14}$
Óleo	$K = 3,862 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	$3,094 \times 10^{-14}$
Água	$K = 3,587 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	$2,317 \times 10^{-14}$

DP – Desvio Padrão

Era de se esperar que a amostra com estrutura de maior dureza apresentasse uma resistência ao desgaste maior, visto que as amostras apresentaram a mesma estrutura básica. Entretanto, sabe-se que a análise apenas da dureza falha em prever o resultado da resistência ao desgaste porque ela não pode caracterizar as interações entre as partículas abrasivas e a superfície do material a ser desgastado, conforme Hutchings.⁽⁶⁾

A análise, por microscopia eletrônica de varredura, das superfícies de desgaste das amostras revelou que:

1) Nas amostras tratadas e resfriadas ao ar forçado a superfície de desgaste apresentou uma série de sulcos, paralelos à direção de deslizamento das partículas abrasivas, evidenciando o mecanismo de desgaste por microsulcamento (Figura 9).

2) Nas amostras tratadas e resfriadas em água (Figura 10) e em óleo (Figura 11) as superfícies de desgaste apresentaram além de sulcos na direção de deslizamento das partículas abrasivas, regiões deformadas com múltiplas indentações sem direcionalidade e regiões com arrancamento de partículas, sendo que nas amostras resfriadas em óleo o tamanho das partículas arrancadas foi maior. Nestes casos, ocorreu uma associação dos mecanismos de microsulcamento e microcorte (sulcos e indentações) além do mecanismo de microtrincamento devido à formação e propagação de trincas em regiões mais frágeis das amostras, acarretando o arrancamento de partículas. Este comportamento pode estar relacionado com a baixa tenacidade da estrutura martensítica de maior dureza e em maior quantidade nestas amostras, ou ainda à fragilização da estrutura devido ao tratamento de revenimento com a segregação de impurezas e carbonetos nos contornos de grão. A fragilização pelo revenimento acarreta a mudança do

mecanismo de fratura frágil de clivagem para fratura intergranular, ao longo dos contornos de grão da austenita anterior.

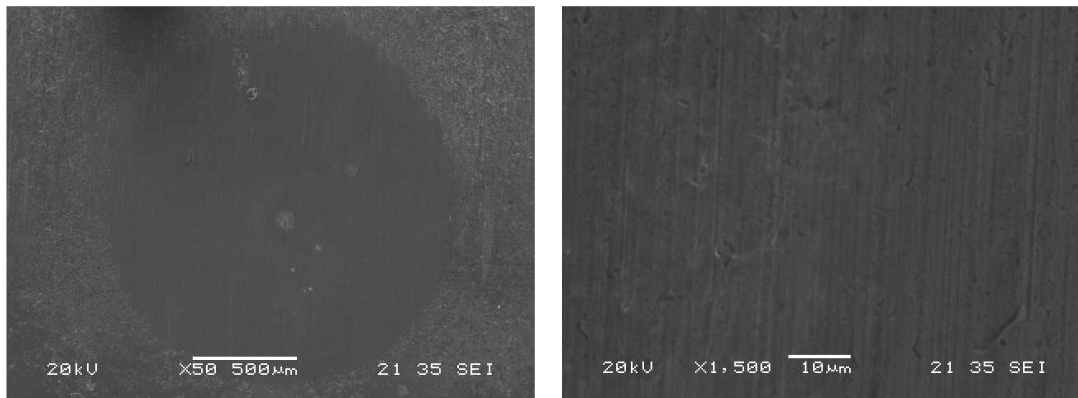


Figura 9: Calota e superfície de desgaste da amostra tratada e resfriada ao ar forçado: sulcos paralelos em toda a superfície

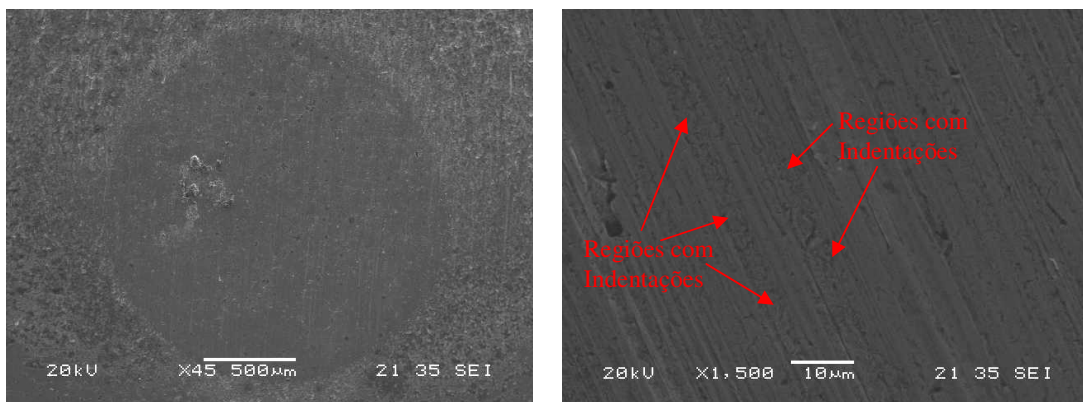


Figura 10: Calota e superfície de desgaste da amostra tratada e resfriada em água

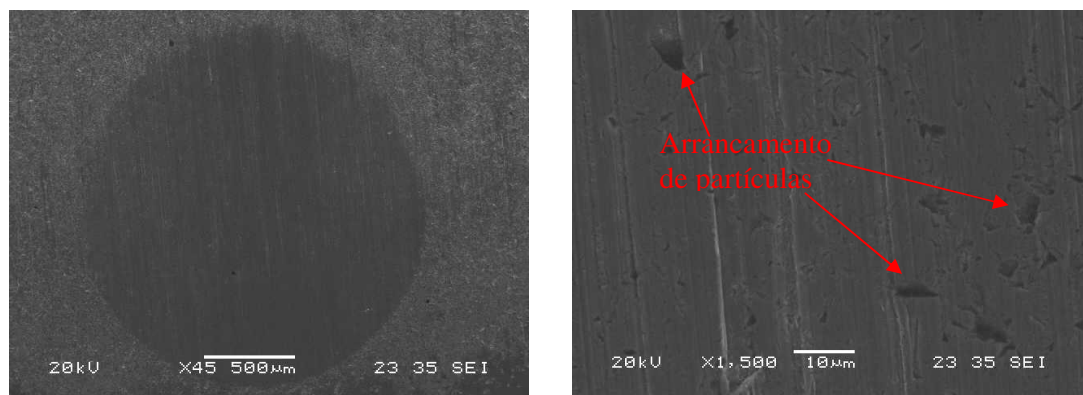


Figura 11: Superfície de desgaste da amostra tratada e resfriada em óleo

4 CONCLUSÕES

a) A microestrutura das amostras apresentou basicamente uma matriz formada de martensita e bainita e carbonetos dispersos.

b) Na análise microestrutural das amostras, foi observado o refinamento da estrutura em função do aumento da taxa de resfriamento, de acordo com o meio

utilizado, sendo a amostra resfriada em água a que apresentou a estrutura mais refinada.

c) A amostra resfriada ao ar forçado apresentou a melhor resistência ao desgaste abrasivo com predominância do mecanismo de desgaste por microsulcamento.

d) Nas amostras resfriadas em água e em óleo foram observados os mecanismos de microsulcamento, microcorte e microtrincamento nas superfícies de desgaste, provavelmente associados à baixa tenacidade da estrutura martensítica e ao fenômeno de fragilização pelo revenimento promovendo o surgimento de trincas que acarretaram o arrancamento de material da superfície de desgaste pelo mecanismo de microtrincamento.

e) Será necessário um aprofundamento na análise microestrutural das amostras para que se possa fazer uma melhor associação entre a microestrutura e os mecanismos de desgaste apresentados.

REFERÊNCIAS

- 1 Colaço, R., Vilar, R. Abrasive wear of metallic matrix reinforced materials. *Wear*, v. 255, p. 643-650, 2003.
- 2 Jha, A.K., Prasad, B.K., Modi, O.P., Das, S., Yegneswaran, A.H. Correlating microstructural features and mechanical properties with abrasion resistance of a high strength low alloy steel. *Wear*, v. 254, p 120-128, 2003.
- 3 Hanguang, F., Xiao, Q., Hanfeng, F. Heat Treatment of multi-element low alloy wear-resistant steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 396, p. 206-212, 2005.
- 4 Hertzberg, R.W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. USA: John Wiley & Sons, 4ed. 1996.
- 5 ASM Metals Handbook, Failure analyses and prevention, v. 11, 1996.
- 6 Hutchings, I. M. Tribology: friction and wear of engineering materials. London: Edward Arnold, 1992.
- 7 Zum Gahr, K.-H. Microstructure and wear of materials. Tribology Series, v.10, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1987
- 8 Xu, P., Bai, B., Yin, F., Fang, H., Nagai, K. Microstructure control and wear resistance of grain boundary allotriomorphic ferrite/granular bainite duplex steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 385, p. 65–73, 2004.
- 9 Rabinowicz, E. Friction and Wear of Materials. New York: John Wiley & Sons, 1965
- 10 Rutherford, K.L., Hutchings, I.M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. *Journal of Testing Evaluation of the American Society of Test Materials*, v. 25, n. 2, p. 250 – 260, 1997.
- 11 Hutchings, I.M. Abrasive and erosive wear test for thin coatings: a unified approach. *Tribology International*, v. 31, n. 1-3, p. 269-279, Jan-Mar 1998.
- 12 Kassman, A., Jacobson, S., Erikson, L., Hedenqvist, P., Olsson, M. A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 50, p. 75 – 84, 1991.
- 13 Gee, M.G., Gant, A., Hutchings I.M., Bethke, R., Schiffman, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., von Stebut, J. Progress towards standardization of ball cratering. *Wear*, v. 255, p. 1–13, 2003.
- 14 Rutherford, K.L., Hutchings, I.M. Micro-scale abrasive wear testing of PVD coatings on curved substrates. *Tribology Letters*, v. 2, p 1–11, 1996.
- 15 Rutherford, K.L., Hutchings, I.M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. *Surface and Coatings Technology*, v. 79, p. 231–239, 1996.
- 16 Staia, M.H., Enriquez, C.E., Puchi, E.S., Lewis, D.B., Jeandin, M. Application of ball cratering methods to study abrasive wear. *Surface and Coatings Technology*, v. 14, n. 1, p. 49–54, 1998.

- 17 Allsopp, D.N., Hutchings, I.M. Micro-scale abrasion and scratch response of PVD coatings at elevated temperatures. *Wear*, v. 251, p 1308–1314, 2001.
- 18 Trezona, R.I., Allsopp, D.N., Hutchings, I.M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test condition in the micro-scale abrasive wear test. *Wear*, v. 225-229, p 205–214, 1999.
- 19 Trezona, R.I., Hutchings, I.M. Three-body abrasive wear testing of soft materials. *Wear*, v. 233-235, p. 209–221, 1999.
- 20 Zum Gahr, K.-H. Wear by hard particles. *Tribology International*, v. 31, n. 10, p. 587–596, 1998.