

EFEITO DA DUREZA NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO INOXIDÁVEL ENDURECÍVEL POR PRECIPITAÇÃO 17- 4 PH¹

*José Divo Bressan²
Alexandre Sokolowski³
Celso Antonio Barbosa⁴
Rafael Agnelli Mesquita⁵
Deivid Paganini Daros⁶*

Resumo

O presente trabalho investiga a resistência ao desgaste do aço inoxidável endurecível por precipitação 17- 4 PH ou AISI 630, com diferentes durezas e tenacidades. Os aços PHs são uma linha interessante de aços para aplicar em moldes pelas suas características de tratamento térmico, baixa distorção, excelente soldabilidade e relativa alta dureza, chegando a 49 HRc. Os testes de desgaste por deslizamento e/ou abrasão foram realizados num tribômetro do tipo pino-sobre-disco cujos pinos com diferentes durezas (43 HRc, 37 HRc, 36 HRc e 33 HRc) que foram obtidas variando-se o tratamento térmico de envelhecimento. Os discos da contra face foram do mesmo aço, mas com dureza de 43 HRc. A resistência ao desgaste dos aços foi avaliada, empregando-se uma velocidade de deslizamento 0,6 m/s, carga normal de 30 N, distância total percorrida de 2.400 m e temperatura ambiente com umidade controlada de 27°C e 60% respectivamente. Da análise dos gráficos de volume perdido cumulativo dos discos e pinos versus distância percorrida observam-se as diferentes taxas de desgaste em função do tratamento térmico e da dureza. Como os pinos têm dureza e tenacidade diferentes, a resistência ao desgaste variou com a dureza. Investigam-se também os mecanismos de desgaste através do microscópio eletrônico de varredura. Pode-se afirmar que a diminuição da dureza do pino produzirá um maior desgaste dos mesmos. É feito um ranqueamento da resistência ao desgaste dos aços em função de sua dureza e coeficiente de desgaste, comprovando-se os melhores tratamentos térmicos que minimizam o desgaste desses materiais para trabalhos a frio.

Palavras-chave: Ensaio de desgaste; Aços para moldes; Aços inoxidáveis PH; Tratamento térmico.

¹ Trabalho apresentado no 4º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2 a 5 de maio de 2006, Joinville, SC.

² Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville – Campus Universitário, 89.223-100 – Joinville/SC – Brasil. email: dem2jdb@joinville.udesc.br

³ Engenheiro Químico, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: alexandre.sokolowski@villaresmetals.com.br

⁴ Engenheiro Metalurgista, Gerente de Tecnologia da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: celso.barbosa@villaresmetals.com.br.

⁵ Engenheiro de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: rafael.mesquita@villaresmetals.com.br

⁶ Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville - Campus Universitário, 89.223-100- Joinville/SC - Brasil. email: dem6at@joinville.udesc.br

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a seleção de aço para moldes de injeção de polímeros teve início com o uso do AISI 1020, evoluindo para o AISI 4140 que permite maior dureza com tratamento térmico. Em seguida, veio o AISI P20 e variantes com dureza superior e boa combinação de propriedades mecânicas e baixo custo.⁽¹⁾

Atualmente, os aços PHs são uma nova linha interessante de aços para aplicar em moldes pelas suas características de tratamento térmico, baixa distorção, excelente soldabilidade e relativa alta dureza, 49 HRC. Esses aços são classificados em função da composição química e das diferentes fases na microestrutura.

O aço 17-4 PH (AISI Type 630 ou UNS S17400) é um aço inoxidável martensítico endurecível por precipitação a base de cromo-níquel-cobre. Ele pode ser produzido na forma de produtos trabalhados (deformados) como barras, arames, chapas e peças forjadas de diversas formas, produtos fundidos, e produtos obtidos por metalurgia do pó. Em aciarias ele é obtido (fundido) geralmente por fusão em forno elétrico ao ar e fornos de indução ao ar ou a vácuo. Ainda, para aplicações na indústria aeronáutica ou quando a aplicação requer ótimas propriedades mecânicas, ele é normalmente submetido a um processo de refino por refusão VAR (vacuum arc remelting) ou ESR (electroslag remelting). É um aço versátil que apresenta uma boa combinação de alta resistência, tenacidade, resistência à corrosão e ao desgaste, e soldabilidade. Sua resistência à corrosão é comparável a do aço inoxidável austenítico 304 em muitos meios, e sua resistência à oxidação é superior a do aço inoxidável martensítico 410. Sua metalurgia permite que ele seja trabalhado por usinagem na condição de tratamento térmico de solubilização quando então apresenta dureza relativamente baixa. Posteriormente, ele pode ser endurecido para uma boa gama de propriedades mecânicas através de um tratamento térmico de precipitação na faixa de temperatura entre 480 a 620 °C. O aumento de dureza e resistência decorre de uma transformação martensítica (tratamento de solubilização com resfriamento rápido) e posterior envelhecimento. Sua dureza de utilização está normalmente na faixa de 34 a 45 HRc. O endurecimento é conseguido pela precipitação de uma fase intermetálica, submicroscópica, rica em cobre em uma matriz martensítica de baixo carbono e estável na temperatura ambiente.

As aplicações típicas deste aço incluem componentes estruturais de aviação (aviões), diversos componentes aeroespaciais, pás de turbinas a vapor, partes de válvulas hidráulicas, instrumentos cirúrgicos, rolamentos de alta precisão que podem trabalhar até 300 °C, corpo de bomba de alta pressão, eixos de bombas e de barcos. Na indústria farmacêutica e de alimentos, indústria química, petroquímica, papel e celulose, prospecção de petróleo. Na indústria mecânica e naval encontra aplicações como molas, grampos, parafusos, prisioneiros e mecanismos de transmissão de movimento.

Nas aplicações citadas acima e outras como nas ferramentas, punções, moldes, matrizes, engrenagens, eixos, mancais e componentes sujeitos ao desgaste, é desejável ter alta dureza na superfície combinado com um núcleo tenaz. Através de tratamento térmico ou termoquímico dos aços PH é possível se obter uma boa combinação de *resistência mecânica* e *resistência ao desgaste*.

A resistência mecânica é normalmente definida como sendo a tensão limite de escoamento ou a tensão limite de resistência. Por sua vez, o *desgaste* é definido como sendo a “*perda progressiva de massa da superfície de um sólido em movimento relativo, levando ao dano ou a falha*”. O desgaste pode ser tanto *brando* como *severo*, dependendo das condições de contato entre as superfícies, da

pressão, temperatura de contato e das durezas dos materiais. A condição de contato ou *severidade do contato* é definido por uma equação que relaciona estas variáveis.

A resistência ao desgaste dos materiais é usualmente obtida através da realização de ensaios de desgaste num equipamento de laboratório chamado Tribômetro. Um dos ensaios padrão de laboratório que simula as condições severas do desgaste em componentes mecânicos é o ensaio de “pino-sobre-disco”, de acordo com a norma ASTM G99-95.⁽²⁾ Neste equipamento, o ensaio é realizado com uma distância total de deslizamento selecionada constante, um determinado valor constante de carga normal sobre o pino, uma velocidade de deslizamento constante e condições de temperatura e umidade controladas.⁽³⁾

O objetivo do presente trabalho foi investigar a resistência ao desgaste de amostras de aço 17-4 PH com diferentes tratamentos térmicos e, conseqüentemente diferentes durezas e tenacidades, utilizando-se o ensaio de desgaste de pino-sobre-disco e de acordo com a norma ASTM G99-95. Tanto a contraface ou discos como os pinos foram confeccionados em aço 17- 4 PH.

2 ENSAIOS DE DESGASTE EM LABORATÓRIO

A resistência ao desgaste é um relevante tópico na seleção de materiais para moldes e matrizes e, conseqüentemente, testes de laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de se medir a resistência ao desgaste sob condições controladas semelhantes às condições em serviço. Através dos ensaios podem-se investigar os mecanismos de desgaste e classificar os materiais para essas aplicações.

A correlação entre os ensaios de simulação de laboratório e sua aplicação no projeto de moldes e matrizes e componentes mecânicos é de grande importância para a tribologia prática. Entretanto, as diversas variáveis que influenciam no desgaste tornam esta correlação as vezes um tanto difícil. A resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito não são propriedades características de um material, mas depende tanto das propriedades do material e da topografia da superfície quanto dos parâmetros do processo de desgaste como carga, temperatura, velocidade de deslizamento e meio ambiente.

Os resultados experimentais do desgaste realizados em laboratório são analisados através da equação de Archad⁽⁴⁾ ou de Rabinowicz⁽⁵⁾ que avalia a razão de desgaste e o coeficiente de desgaste, relacionando o volume perdido acumulado por unidade de deslizamento com a resistência ao desgaste através da equação linear (4),

$$Q = \frac{V}{S} = K \frac{F_N}{H} \quad (\text{mm}^3/\text{m}) \quad (1)$$

onde Q é o parâmetro que mede a razão de desgaste ou “taxa de desgaste” (volume perdido acumulado V ou massa perdida por unidade de deslizamento S), F_N é a carga normal aplicada, H é a dureza do material mais mole e K é o coeficiente de desgaste: é adimensional e menor que 1. Em geral, a *resistência ao desgaste* é definida como sendo $1/K$. Portanto, o *coeficiente de desgaste* é dado por,

$$K = \frac{Q \cdot H}{F_N} = K_S \cdot H \quad (2)$$

onde K_S é o *coeficiente específico de desgaste* ($K_S = Q/F_N$) cuja unidade é $\text{mm}^3/\text{m} \cdot \text{N}$.

Nota-se que ambos os coeficientes referem-se ao material mais mole. No presente ensaio de desgaste de pino-sobre-disco o material mais mole foi o pino. O volume perdido cumulativo é obtido por,

$$V = m/\rho \quad (m = \text{massa} ; \rho = \text{densidade}) \quad (3)$$

O coeficiente de desgaste K é de importância fundamental e provê um valioso meio de comparação do rigor dos processos de desgaste em diferentes sistemas tribológicos. Portanto, a equação de desgaste de Archard fornece valiosos parâmetros que descrevem o rigor do desgaste através do coeficiente K, mas a sua validade não pode ser usada para afirmar a existência ou não de um determinado mecanismo de remoção de material. É necessário o uso do microscópio ótico ou eletrônico para identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

Os resultados de resistência ao desgaste do aço 17-4 PH foram obtidos através da realização de ensaios de desgaste em equipamento de pino-sobre-disco com uma distância total selecionada constante, um determinado valor constante de carga normal sobre o pino e uma velocidade de deslizamento também constante (3,6). A Tabela 1 mostra os parâmetros empregados durante a execução dos ensaios. Para cada condição de dureza do pino foram feitos 3 ensaios, ou seja, um total de 12 pinos de aço 17-4 PH e 4 durezas distintas, sendo 3 pinos com a mesma dureza.

Tabela 1. Parâmetros empregados na realização dos ensaios de desgaste.

Velocidade deslizamento (m/s)	Carga 30 N (Kgf)	Distância total Percorrida (m)	Raio da pista (mm)
0,6	2,953	2400	14,3



Figura 1. Disco ou contra face e pino de aço 17- 4 PH ou AISI 630.

3.1 Obtenção dos Corpos de Prova (cdp's)

Pinos. Para a obtenção dos pinos foram utilizados cilindros de uma barra de aço 17-4 PH (V630). A confecção dos pinos foi realizada seguindo os métodos convencionais de usinagem, isto é, torneamento e retifica até a obtenção do formato desejado com a ponta arredondada de raio aproximadamente 10 mm conforme mostrado na Figura 1. Após o processo de solubilização, os pinos foram usinados e submetidos a tratamento térmico de envelhecimento ou precipitação de acordo com a finalidade de utilização como ferramental para aumento de sua dureza e resistência mecânica. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas, para cada tipo de pino, obtidas experimentalmente após o tratamento térmico correspondente. A Tabela 3 apresenta a condições de tratamento térmico e as respectivas durezas.

Tabela 2. Valores experimentais das propriedades mecânicas dos pinos aço 17-4 PH

Propriedade	1A, 1B, 1C	2A, 2B, 2C	3A, 3B, 3C
LE _{0,2%} (MPa)	1237	1096	921
LR (MPa)	1332	1140	1017
Alongamento %	14,2	15,0	18,0

Tabela 3. Condições do tratamento térmico dos pinos e respectiva dureza obtida.

Tratamento Térmico	Pinos 1A, 1B, 1C	Pinos 2A, 2B, 2C	Pinos 3A, 3B, 3C
Têmpera			
Solubilização (1h)	1040°C	1040°C	1040°C
resfriamento água	25 °C	25 °C	25 °C
Precipitação			
aquecimento	480°C - 1h	550°C - 4h	600°C - 4h
resfriamento ar	25 °C	25 °C	25 °C
Dureza HRc	43	37	33

Discos. A contra-face ou disco, Figura 1, foi obtido pelo corte e pré-usinagem de barra de aço 17-4 PH na condição de solubilizado, obtendo-se o diâmetro médio de 50 mm e espessura de 3 mm. Todos os disco foram usinados nestas dimensões estabelecidas. Em seguida, foi feito o tratamento térmico de precipitação ou envelhecimento. Em seguida, os discos foram retificados e polidos. A dureza média final dos discos foram todos de 43 HRc.

Tabela 4. Condições do tratamento térmico dos discos e respectiva dureza obtida.

Tratamento Térmico	Discos
Têmpera	
Solubilização (1h)	1040°C
resfriamento água	25 °C
Precipitação	
aquecimento (1h)	480°C
resfriamento ar	25 °C
Dureza HRc	43

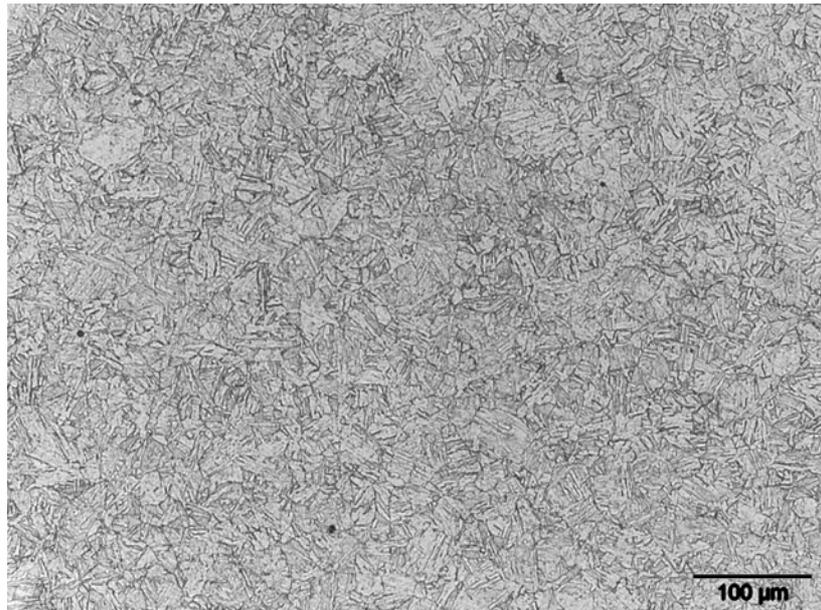


Figura 2. Microestrutura na secção transversal dos pinos de aço 17-4 PH com dureza de 37,0 HRc. Pinos do jogo 2A, 2B, 2C.

3.2 Microestrutura dos Aços 17- 4 PH

Na Figura 2 observa-se a microestrutura da secção transversal dos pinos da série 2A, 2B e 2C. A microestrutura é constituída de martensita revenida (revenida por envelhecimento). O ataque químico metalográfico utilizado foi o reativo de Vilella por imersão. A composição química dos discos e pinos está na Tabela 5.

Tabela 5. Composição química dos pinos e discos de aço 17-4 PH.

Elemento	%C	%Si	%Mn	% Cr	% Ni	% Cu	% Nb	% P	% S	%Mo
ASTM A564	0,07	1,0	1,0	15-17	3,0-5,0	3,0-5,0	,15-,45	0,04	0,03	---
Valor obtido	0,035	0,42	0,65	15,2	4,32	3,37	0,23	0,025	0,025	0,21

3.3 Procedimentos do Ensaio de Pino-sobre-disco

Os corpos de prova seguiram um rigoroso procedimento de preparação a fim de eliminar quaisquer vestígios de sujeira ou oxidação. Em seguida, pino e disco foram pesados numa balança analítica com resolução de 0,1 mg para determinação de sua massa inicial antes do ensaio.

Foram ajustados o raio da pista de deslizamento, a rotação do porta amostra (disco) e o contador do número de voltas que foi programado para interromper o ensaio a cada 200 m percorridos para um total de 2400 m, de modo a permitir as tomadas de medida intermediarias da perda de massa do pino e do disco. Estas medições foram precedidas sempre de uma completa limpeza dos corpos de prova, passando um pano seco e depois usando jato de ar comprimido. Antes de cada pesagem os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 80°C para evitar que a umidade influenciasse nos resultados, podendo desta forma ser avaliada a perda de massa real dos CDPs. Tanto o pino como o disco sempre foi colocado na mesma posição e orientação através de uma marca inicial. Foram ensaiados discos de aço 17-4 PH em ambas faces, sendo 3 pinos para cada dureza.

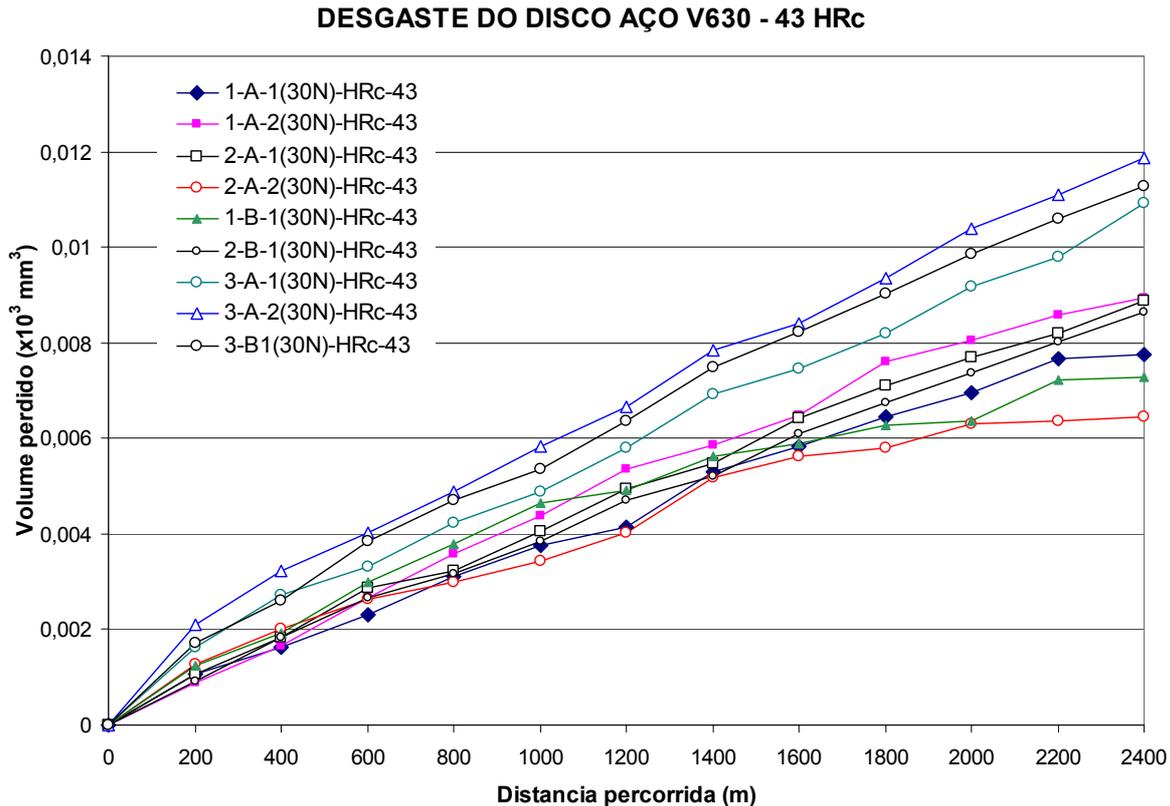


Figura 3. Evolução da perda de volume acumulada do disco versus distância percorrida no deslizamento do ensaio pino-sobre-disco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 apresentam-se os resultados experimentais dos discos do ensaio de desgaste de pino-sobre-disco do aço 17-4 PH. Embora a dureza do disco seja constante e igual a 43 HRc, a taxa de desgaste variou consideravelmente devido as diferentes durezas dos pinos. Os discos do jogo 1 (1A-1, 1A-2 e 1B-1) foram ensaiados contras os pinos de dureza 43 HRc, mas os discos do jogo 3 (3A-1, 3A-2 e 3B-1) foram contra os pinos de dureza 33 HRc e assim por diante. Em geral, a taxa de desgaste $Q (= V/S)$ do disco se manteve constante ou linear, mas aumentou com a diminuição da dureza do pino, ou seja, o desgaste foi mais severo a medida que aumentou a diferença de dureza entre pino e disco. Portanto, no caso do material duro, o disco, na equação (1) de desgaste deve-se substituir a dureza H por uma dureza equivalente H_e ($1/H_e = 1/H_{\text{disco}} + 1/H_{\text{pino}}$). Certamente, os mecanismos de aderência no pino e microlascamento no disco foi mais acentuado contra os pinos do mesmo material e menor dureza como observado na Figura 5.

Por outro lado, na Figura 4, observam-se as taxas de desgaste dos pinos. Quanto maior é a sua dureza menor é a taxa de desgaste, ou seja a curva V versus S situa-se mais abaixo, concordando com a previsão da equação (1). A faixa das variações das taxas de desgaste são maiores que dos discos.

Na Figura 5 apresentam-se as micrografias no MEV tiradas da área desgastada da ponta do pino. Foram tiradas fotografias antes do desgaste do pino e após 50 m e 100 m a fim de se identificar os mecanismos de desgaste atuantes. Notam-se a existência de mecanismos de microsulcagem, aderência e microlascamento ou delaminação.⁽⁷⁾ No microlascamento, pequenos flocos de material são arrancados da superfície durante a passagem do pino sobre o disco.

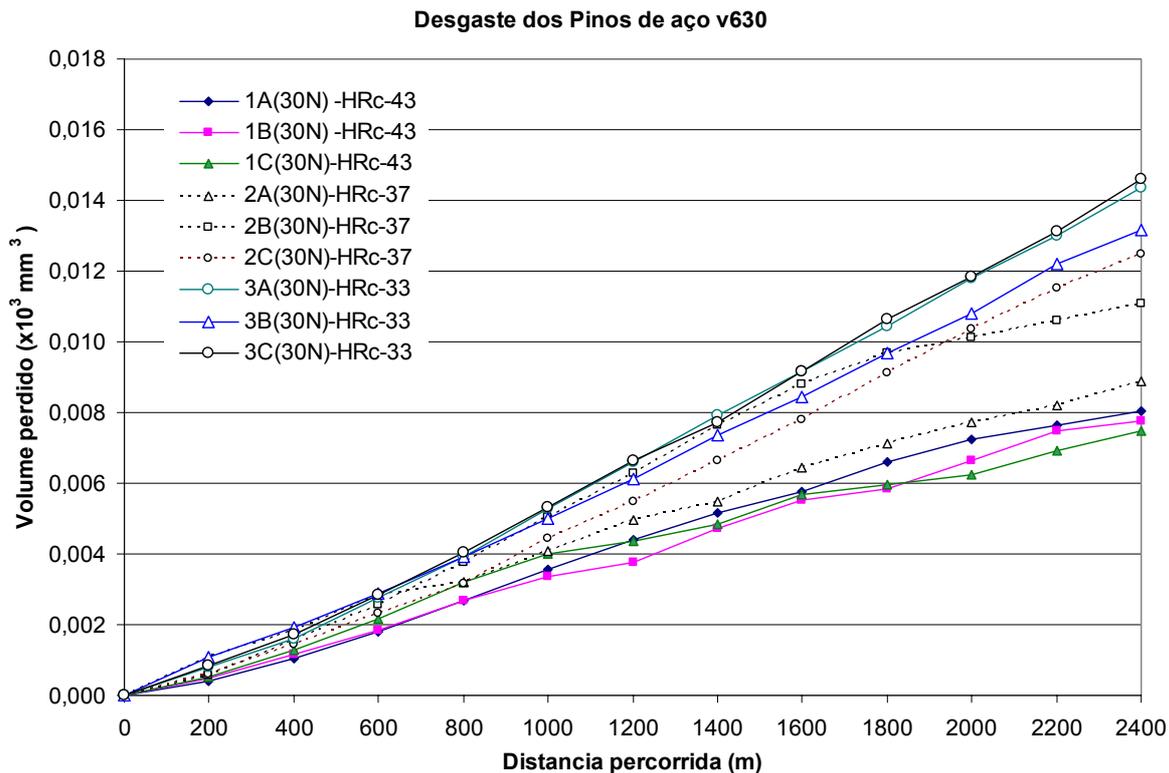


Figura 4. Evolução da perda de volume acumulado do pino versus distância percorrida no deslizamento do ensaio pino-sobre-disco.

5 CONCLUSÕES

Dos resultados experimentais do ensaio de desgaste de pino-sobre-disco apresentados nos gráficos de volume perdido versus distância de deslizamento de discos e pinos de aço 17-4 PH e das observações no MEV da superfície desgastada, pode-se concluir com as seguintes afirmações :

1- Em geral, a tendência da curva da taxa de desgaste dos discos com a distância percorrida é constante e linear após a fase inicial. Ou seja, a razão instantânea de desgaste (tangente à curva) se manteve aproximadamente constante. A curva do disco apresenta duas fases ou regimes distintos: fase 1 inicial até 200 m ou de rodagem inicial (run in) e a fase 2 de razão de desgaste constante.

2- Entretanto, a taxa de desgaste do disco aumentou com a diminuição da dureza do pino. Neste caso, para o material mais duro, o disco, a equação (1) da taxa de desgaste deve ser reformulada, substituindo-se a dureza H pela dureza equivalente H_e ($1/H_e = 1/H_{\text{disco}} + 1/H_{\text{pino}}$). Ou seja, $Q = K \cdot F_N / H_e$, a taxa de desgaste do disco aumenta com o aumento da diferença de dureza entre pino e disco.

3- A tendência da curva da taxa de desgaste dos pinos com a distância percorrida é aproximadamente constante e linear. Entretanto, na fase final, alguns pinos tiveram a tendência de diminuir a taxa de desgaste. Isto deve-se a diminuição da pressão real de contato com o aumento da área de contato do pino e/ou aumento da dureza na pista do disco.

4- Os mecanismos de desgaste observados no MEV são a microsulcagem, a aderência e o microlascamento ou delaminação.

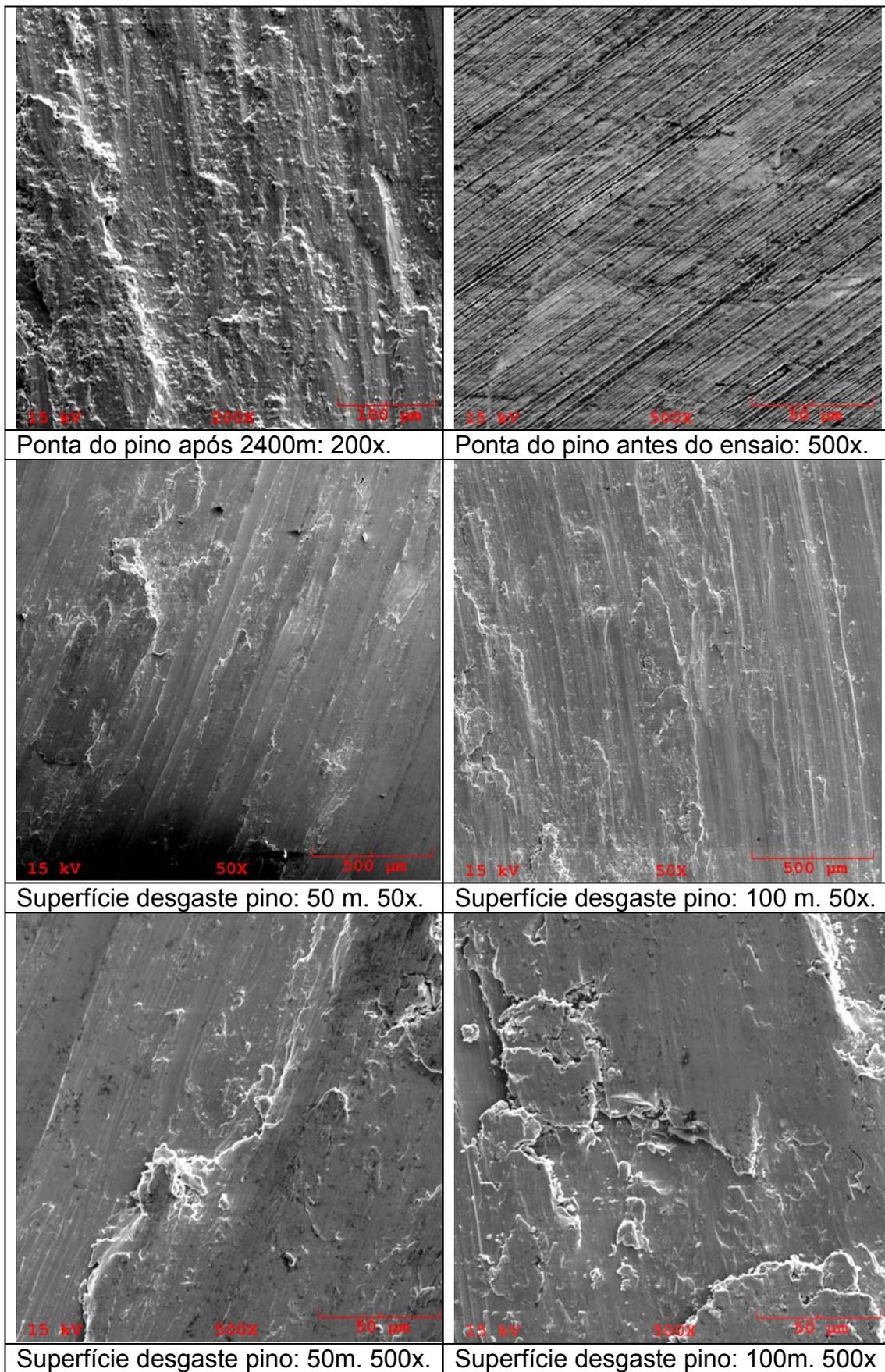


Figura 5. Micrografias no MEV da morfologia da superfície de desgaste na ponta do pino antes e após 50 m, 100 m e 2400 m percorridos. Aumentos 50x e 500x.

5- A taxa média de desgaste dos pinos com carga de 30 N e dureza 33 HRc (325HV) foi de $6,36 \times 10^{-3}$ mm³/m e com dureza de 43 HRc (424HV) foi $3,33 \times 10^{-3}$ mm³/m. Isto resulta num coeficiente de desgaste $K = 69 \times 10^{-3}$ e $K = 47 \times 10^{-3}$ respectivamente.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq na forma de bolsa de pesquisa e de iniciação científica, como também a Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC e a Villares Metals pelo material do disco e pino doados.

REFERÊNCIAS

- 1 GERSON, F.T. **Fresh approaches to mould steel selection**. Canadá : Nickel Development Institute-NiDI, 1991. p.1-5. (Technical Series n. 10.062)
- 2 ASTM. Designation: G99-95; Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, 1995. p. 336-390.
- 3 BRESSAN, J.D.; HESSE, R. Construction and validation tests of a pin-on-disc equipment. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA (COBEM 2001), 16., 2001, Uberlândia/MG. [S.n.t.]
- 4 HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London : Edward Arnold, 1995.
- 5 RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. New York : Wiley; 1965.
- 6 WILLIAMS, J.A. The laboratory simulation of abrasive wear. **Tribotest Journal**, v. 3, n.3, p. 267-306, 1997.
- 7 ZUM GAHR, K.H. Wear by hard particles. **Tribology International**, v.31, n.10, p. 587-596, Oct. 1998.

INFLUENCE OF HARDNESS ON THE WEAR RESISTANCE OF 17- 4 PH STAINLESS STEEL HARDENED BY PRECIPITATION

*José Divo Bressan
Alexandre Sokolowski
Celso Antonio Barbosa
Rafael Agnelli Mesquita
Deivid Paganini Daros*

Abstract

Present work investigates the wear resistance of AISI 630 or 17-4 PH stainless steel hardened by precipitation or aging, for various hardness and toughness. The PHs steel are a interesting line of steels for applying in moulds for its heat treatment characteristics, low distortion, excellent weldability and relative high hardness, attaining 49 RHc. The wear tests by sliding and/or abrasion were performed in a pin-on-disc tribometer which pins had different hardness (43 HRc, 37 HRc, 36 HRc e 33 HRc) obtained by varying the precipitation hardening treatment. The counterface discs were machined from the same steel and had 43 HRc. The steel wear resistances were evaluated, using sliding velocity of 0.6 m/s, normal load 30 N, total sliding distance of 2400 m and controlled room temperature and humidity at 27°C and 60% respectively. From the analysis of plotted graphs of cumulative lost volume versus sliding distance, it was observed the different wear rates as function of the heat treatment and hardness. Due to the pins different hardness and toughness, the wear resistance varied substantially. The wear mechanisms were also investigated through the scanning electron microscope. It can be asserted that the decrease in the pin hardness yields a greater wear in them. It is set a rank of wear resistance, proving the best heat treatment that minimize the wear in these materials for cold work.

Key words: Wear test; Mould steels; PH stainless steel; Heat treatment.