

INFLUÊNCIA DO REVENIMENTO NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO VILLARES D2

José Divo Bressan ¹
Leonidas M. Gilapa ²
Deivid Paganini Daros ³

Resumo

O presente trabalho investiga a influência do revenimento e, portanto, com diferentes valores de dureza e tenacidade, na resistência ao desgaste do aço ferramenta VILLARES D2, VD2. Os testes de desgaste por abrasão e/ou deslizamento foram realizados num tribômetro do tipo pino-sobre-disco cujos pinos foram de aço ferramenta VD2 com tratamento térmico de têmpera e revenimento. Os discos da contra face foram chapas de aço ABNT 1008 empregados na confecção de geladeiras. A resistência ao desgaste dos aços foi avaliada, usando-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. Os pinos de aço VD2 foram submetidos a mesmo tratamento térmico de têmpera, mas com dois revenimentos distintos nas temperaturas de 300°C, 400°C, 500°C e 550°C e com as respectivas durezas medidas. Os discos foram de chapa de aço 1008 de 1 mm de espessura e diâmetro de 62 mm, ensaiados como recebido. Da análise dos gráficos de volume perdido cumulativo versus distância percorrida, observam-se as diferentes taxas de desgaste dos pinos em função de: carga normal aplicada, tratamento térmico, dureza e tenacidade. Como os pinos têm dureza e tenacidade diferentes, verificaram-se diferentes resistências ao desgaste. Investigaram-se também os mecanismos de desgaste através do microscópio eletrônico de varredura. Pode-se afirmar que, o aumento da dureza no pino nem sempre produz uma maior resistência ao desgaste dos pinos. O melhor tratamento térmico para a maior resistência ao desgaste do aço VD2 foi o revenimento duplo a 300°C, propiciando maior desempenho para o uso em ferramentas de corte e conformação a frio de chapas metálicas.

Palavras-chave : Ensaio de desgaste; Aço-ferramenta; Tratamento térmico.

INFLUENCE OF TEMPERING ON THE WEAR RESISTANCE OF VD2 STEEL

Abstract

Present work investigates the wear resistance of AISI D2 (VD2) tool steel with different quenching temperatures and, therefore, various hardness and toughness. Wear tests by sliding and/or abrasion were carried out in a pin-on-disc tribometer which pins were VD2 tool steel with heat treatment. The discs or counterface ABNT 1008 steel sheet used in the fridge industry were used. The steel wear resistances were evaluated using sliding velocity of 0.6 m/s, normal load of 30 N, total sliding distance of 2,400 m and controlled room temperature and humidity at 27°C and 60%, respectively. The VD2 pins were submitted to the same quenching treatment but the tempering process had different temperatures of 300°C, 400°C, 500°C e 550°C and the hardness were measured. Discs of AISI 1008 steel sheets with 1 mm thickness and 62 mm in diameter and tested as received were used. From the analysis of plotted graphs of cumulative lost volume versus sliding distance, it was observed different wear rates as function of the normal load, heat treatment, hardness and toughness. Due to the pins hardness and toughness variations, different wear resistance were observed. The wear mechanisms were also investigated by scanning electron microscope. Increasing the pin hardness not allays correspond to an increase in the wear resistance. The best heat treatment for greater wear resistance of VD2 steel was the double quenching at 300°C, providing a better performance for cold shearing and stamping tools for cold sheet metals forming processes.

Key words : Wear test; Tool steel; Heat treatment.

¹ Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville – Campus Universitário, 89.223-100 –Joinville/SC – Brasil. (dem2jdb@joinville.udesc.br)

² Instituto Superior TUPY- IST, Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC, Rua Albano Schmidt, 3333, 89227-700 – Joinville/SC – Brasil. (leonidas@sociesc.com.br)

³ Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville - Campus Universitário, 89.223-100, Joinville/SC - Brasil. (dem6at@joinville.udesc.br)

I INTRODUÇÃO

Os processos industriais de conformação de metal a frio, como o corte e punçionamento de chapas, a estampagem, o embutimento profundo e o forjamento, são realizados usando-se aços ferramentas de alta resistência e dureza. Essas operações requerem aços de alto limite de escoamento, em tração ou compressão, a fim de resistirem às deformações plásticas em pontos de alta concentração de tensões no ferramental durante o processo de corte ou conformação. Adicionalmente, outros requisitos importantes e igualmente necessários são a resistência ao desgaste, a resistência ao impacto de cargas dinâmicas, a resistência ao choque térmico, a tenacidade à fratura e o baixo custo. Em geral, a dureza está relacionada com estas características.

Dentre os principais aços ferramenta para a fabricação de punções e matrizes⁽¹⁾ destacam-se os aços AISI M2, AISI D2, AISI D6 e o novo aço produzido pela Villares Metals, o VF800AT.⁽²⁾ O metal duro ou carbeto de tungstênio WC também é muito utilizado, porém, de custo elevado, produzido pela Villares Metals, o VF800AT.⁽²⁾ Através dos processos de tratamento superficial como a nitretação, o TRD (*Toyota Diffusion Process*) e os revestimentos de camadas cerâmicas duras por PVD e CVD, é possível aumentar a vida útil do ferramental.

O aço AISI D2 ou Villares D2 apresentam um alto elevado teor de elementos de liga e geralmente é recomendado pelos ferramenteiros como material para punção e matriz no processo de corte de chapas a frio.⁽¹⁾ Por outro lado, o aço AISI D6 possui propriedades mecânicas semelhantes e é um material com potencial de substituir o D2, embora tenha composição química diferente e custo alto.

Durante os processos de fabricação de peças por corte ou conformação plástica, seja no forjamento, extrusão ou ainda a partir de corte, estampagem e embutimento de chapas metálicas, o desgaste do punção e da matriz, devido aos fenômenos de contato entre as superfícies deslizantes, são: contato entre as rugosidades, a presença de microcavacos e à presença de partículas duras provenientes da microestrutura ou partículas duras externas contaminantes.

Durante as operações de conformação de metais pode-se verificar cinco tipos básicos de mecanismos de falha nas ferramentas para conformação à frio que são: *desgaste, lascamento, deformação plástica, trinca catastrófica e caldeamento ou aderência*. Portanto, o desempenho de aços ferramenta para trabalho a frio está diretamente relacionado com as seguintes propriedades mecânicas: resistência ao desgaste, tensão limite de escoamento, tenacidade à fratura e módulo de elasticidade. Logo, em função do tipo de solicitação que ocorre nas ferramentas nas operações de corte e conformação de metais, é necessário que o material tenha propriedades como alta dureza e elevada tenacidade à fratura, pois nessas operações são produzidas cargas de impacto e os materiais do ferramental podem apresentar microtrincas superficiais ou internas na microestrutura oriundas da usinagem ou do tratamento térmico, ocasionando as quebras. Essas microtrincas podem ser consideradas estáveis se a propriedade mecânica tenacidade à fratura for suficientemente elevada.

O desgaste é geralmente definido como sendo a “perda progressiva de massa da superfície de um sólido em movimento

relativo sobre outra, levando ao dano ou falha da superfície”.⁽³⁾ Pode ser tanto brando como severo, dependendo das condições de contato entre as superfícies, da pressão e temperatura de contato, e das durezas dos materiais. A severidade do contato pode ser definida por uma equação que relaciona estas variáveis.

A vida em serviço de um ferramental para conformação a frio depende, portanto, da resistência ao desgaste. Na fase de seleção do material do ferramental, a resistência ao desgaste é um dos importantes parâmetros de projeto e, conseqüentemente, foram desenvolvidos testes de laboratório com o objetivo de se medir a resistência ao desgaste sob condições controladas, semelhantes às condições em serviço. A correlação entre os ensaios de simulação de laboratório e sua aplicação no projeto de ferramental de corte e conformação é de grande importância para a tribologia prática. Porém, a resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito não são propriedades características de um material, mas depende das propriedades do material, da topografia da superfície, dos parâmetros de processo como pressão de contato, presença de partículas duras, temperatura, velocidade de deslizamento e meio ambiente.

A equação fenomenológica que geralmente é utilizada na análise dos resultados experimentais do ensaio de desgaste de laboratório é a equação de Archad,⁽³⁾ que avalia a razão de desgaste e o coeficiente de desgaste pela equação linear:

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

em que 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 Vickers 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 $1/K$. Então, o *coeficiente de desgaste* é dado por:

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

em que K_s é o *coeficiente específico de desgaste* ($K_s = K/H = Q/F_N$) cuja unidade é $\text{mm}^3/\text{N.m}$. Ambos os coeficientes K e K_s referem-se ao material mais mole. No ensaio de pino-sobre-disco, o material mais mole geralmente é o disco. O volume perdido acumulado é calculado por:

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

O objetivo do presente trabalho foi investigar a resistência ao desgaste de aço Villares

VD2 com diferentes temperaturas de revenimento e, portanto, diferentes durezas e tenacidades, buscando-se a otimização das propriedades. Os testes de desgaste por deslizamento e/ou abrasão foram realizados num tribômetro do tipo pino-sobre-disco cujos pinos foram de aço ferramenta VD2 com tratamento térmico de têmpera e revenimento. Os discos da contra face foram chapas de aço ABNT 1008 empregados na confecção de geladeiras.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

A resistência ao desgaste dos materiais é usualmente obtida pela 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.⁽⁴⁾ Os presentes resultados experimentais foram obtidos pela realização de ensaios de pino-sobre-disco conforme especifica a norma ASTM G99.⁽⁵⁾ A Tabela 1 mostra os parâmetros empregados durante a execução dos ensaios. A carga normal selecionada foi de 30 N para todos os ensaios. Para cada condição de tratamento térmico foram realizados dois ensaios, ou seja, um total de oito pinos.

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

Velocidade linear (m/s)	Carga (kgf)	Distância percorrida (m)	Raio da pista (mm)
0,6	2,953	2400	14,3

2.1 Obtenção dos Corpos-de-prova

Pinos: Para a obtenção dos pinos foram utilizados cilindros de uma barra de aço ferramenta VD2. 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 extremidade arredondada de raio aproximadamente 10 mm, conforme mostrado na Figura 1. Após o processo de usinagem, os pinos foram submetidos a tratamento térmico (temperado e revenido) para aumento de sua dureza e resistência mecânica e de acordo com a finalidade de utilização do ferramental. A Tabela 2 apresenta a condições de tratamento térmico. A Tabela 3 mostra as durezas obtidas experimentalmente em cada pino medida após o tratamento térmico e antes do desgaste.

Discos: A contra-face ou disco (Figura 2) foi obtida pelo corte da chapa de aço 1008 como utilizada na indústria e com o diâmetro médio de 62 mm e espessura de 1 mm. Este disco foi usinado nas dimensões estabelecidas e foram executados 4 furos de 8 mm para a sua fixação no suporte para dar sustentação à chapa de

Tabela 3. Condições do revenimento de cada pino de aço VD2 e dureza obtida.

Tratamento térmico	Tempo	CDP A1	CDP A2	CDP A3	CDP A4	CDP A5	CDP A6	CDP A7	CDP A8
		Temper.							
1º Revenimento	02:00	530°C	530°C	280°C	280°C	280°C	280°C	280°C	280°C
Resfriamento	02:00	Ar							
2º Revenimento	02:00	550°C	550°C	400°C	400°C	300°C	300°C	500°C	500°C
Dureza HRc		54	54	57	57	57	57	58	58



Figura 1. Pinos de aço Villares VD2 utilizados nos ensaios de desgaste.

Tabela 2. Condições do tratamento térmico da têmpera de todos os pinos de aço VD2.

Tratamento térmico	VD2	
	Temperatura	Tempo (h)
1ª pré-aquec.	450°C	01:00
2ª pré-aquec.	800°C	00:15
Austenitização	1020°C	00:30
Resfriamento	180°C	00:05
Resfriamento	Ar	02:00

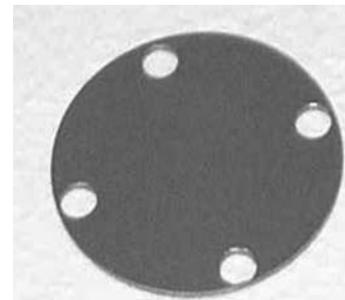


Figura 2. Disco de aço 1008 ou contra face.

aço 1008. A dureza média do disco deste aço foi de 93 HV; entretanto, um dos discos teve dureza mínima de 87 HV e está indicado no gráfico dos resultados.

2.2 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 de voltas que foi programado para interromper o ensaio a cada 200 m percorridos para

um total de 2.400 m, de modo a permitir as tomadas de medida intermediárias da perda de massa do pino e do disco. Estas medições foram precedidas sempre de uma completa limpeza dos corpos-de-prova, usando ar comprimido e depois passado álcool etílico absoluto 99,5% e um pano. Antes de cada pesagem os corpos-de-prova foram submetidos à secagem em estufa a 80°C para eliminar o solvente empregado na limpeza, podendo desta forma ser avaliada a perda de massa real. Foram ensaiados discos de aço 1008 em ambas as faces, sendo dois pinos de mesma dureza para cada disco. O equipamento possui uma campânula onde se controlam as condições de temperatura e umidade ambiente. Nos presentes ensaios as condições foram 27°C e 60% de umidade relativa. O pino A1 foi ensaiado contra o disco A1, o pino A2 foi contra o disco B1 (face I) e o pino A3 contra o disco B2, e assim por diante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 apresentam-se os resultados experimentais dos pinos do ensaio de desgaste de pino-sobre-disco do aço Villares VD2. Embora a dureza do pino tenha variado muito pouco, entre 54 a 58 HRc, a taxa de desgaste variou razoavelmente devido às diferentes resistências ao desgaste. Ou seja, o coeficiente de desgaste e a taxa de desgaste do aço VD2 dependem do tratamento térmico, ou seja da temperatura do revenimento e não somente da sua dureza. Portanto, o tratamento térmico também deve ser escolhido de modo a otimizar a resistência ao desgaste. Na Tabela 4 apresentam-se os resultados da taxa de desgaste e coeficiente de desgaste de todos os pinos com as diferentes temperaturas de revenimento. Observa-se que o tratamento térmico que produziu a maior dureza de 58 HRc, pinos A7 e A8, também produziu a menor resistência ao desgaste ou seja, o pino A7 apresentou a maior taxa de desgaste de aproximadamente $Q = 7,90 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ e coeficiente de desgaste $K = 1,72 \times 10^{-5}$. Por outro lado, o tratamento térmico dos pinos

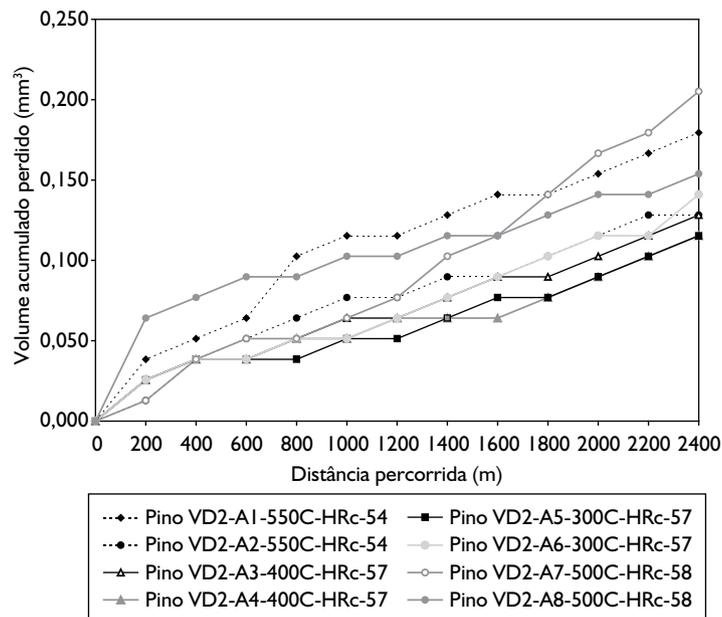


Figura 3. Evolução do volume acumulado perdido dos pinos de aço VD2 revenido, em função da distância de deslizamento percorrida. Carga normal de 30 N.

Tabela 4. Resumo dos valores de taxa de desgaste e coeficiente de desgaste dos pinos.

Pino VD2	Dureza HRc	Dureza HV (kgf/mm ²)	Taxa de Desgaste Q (mm ³ /m)	Coefficiente de desgaste K
A1	54	580	6,12E-05	1,18E-05
A2	54	580	4,29E-05	8,29E-06
A3	57	640	3,95E-05	8,43E-06
A4	57	640	3,75E-05	8,00E-06
A5	57	640	3,75E-05	8,00E-06
A6	57	640	5,08E-05	1,08E-05
A7	58	652	7,90E-05	1,72E-05
A8	58	652	3,80E-05	8,26E-06

A4 e A5, temperaturas de revenimento de 400°C e 300°C, respectivamente, e dureza de 57 HRc, apresentaram a menor taxa de desgaste do aço VD2 de $Q = 3,75 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ (em torno de 50% menos) e coeficiente de desgaste $K = 0,80 \times 10^{-5}$.

Na Figura 4 observam-se os resultados do volume perdido dos discos de aço 1008 de dureza entre 87,2 e 93,6 HV. A taxa de desgaste é mais acentuada na fase inicial até os primeiros 200 m, também chamada de rodagem inicial ou *run in*; após isso, é linear. Excluindo-se o disco A1, de menor dureza 87 HV, as demais curvas estão próximas e têm uma taxa média de desgaste para o aço 1008 de $Q = 2,30 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$.

Na Figura 5 apresenta-se a evolução da área de desgaste na ponta dos pinos. Tendo em vista a necessidade de um método alternativo de se medir o desgaste dos pinos, investiga-se como a área desgastada na ponta dos pinos evolui e se possui relação com o volume perdido dos pinos, conforme trabalho apresentado anteriormente.⁽⁶⁾ As curvas são aproximadamente lineares, exceto a fase inicial de rodagem onde se verificam os aplainamentos dos picos de rugosidades. Entretanto, a razão de desgaste medida da razão de área desgastada pela distância percorrida é menor para o pino de menor dureza, pino A2, contra disco de mesma dureza 93 HV, com exceção do disco A1 de dureza 87 HV. Como o pino é o material de maior dureza no par pino-disco, a Equação 1 de Archad deve ser reescrita, substituindo-se a dureza H por uma dureza equivalente H_e ($1/H_e = 1/H_{\text{disco}} + 1/H_{\text{pino}}$). As curvas dos pinos A5 e A6 são superiores aos pinos A7 e A8, contrário às curvas de evolução dos volumes.

Na Figura 6, apresentam-se as relações entre o volume perdido medido do pino versus a área de desgaste na ponta do pino, a fim de se investigar se existe uma relação direta entre essas medidas de desgaste. Aparentemente, a dispersão dos resultados é grande, não apresentando uma correlação única entre área desgastada e volume perdido do pino. É importante lembrar que o erro nas medidas é estimado em $26 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$ (0,2 mg).

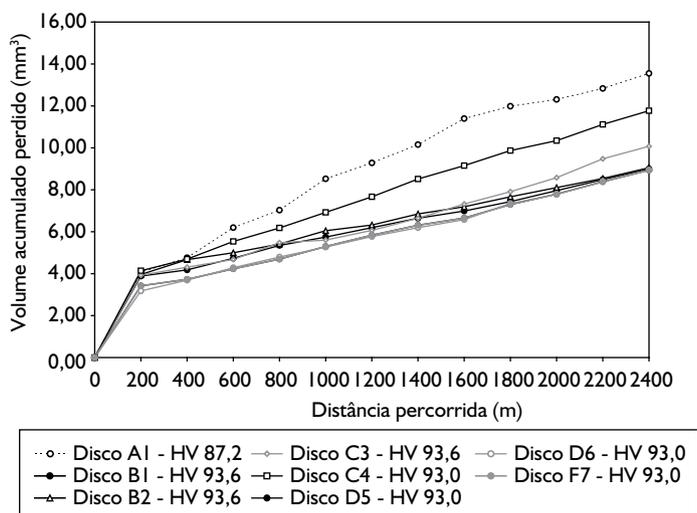


Figura 4. Evolução do volume acumulado perdido dos discos de aço 1008, em função da distância de deslizamento percorrida. Dureza HV do disco indicada.

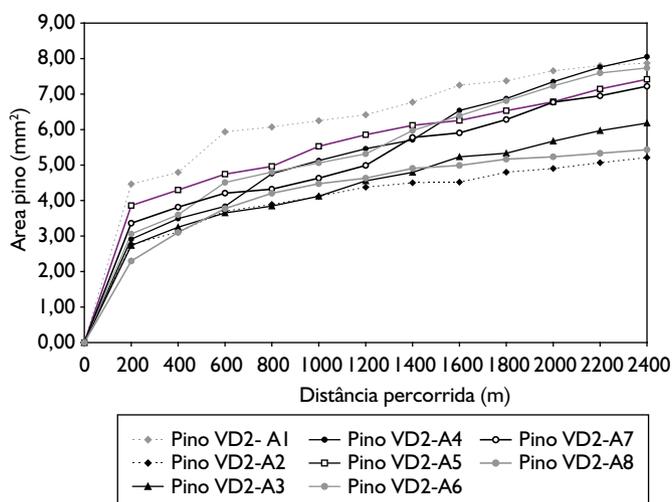


Figura 5. Evolução da área desgastada na ponta dos pinos de aço VD2 revenido, em função da distância de deslizamento percorrida no ensaio pino-sobre-disco. Carga 30 N

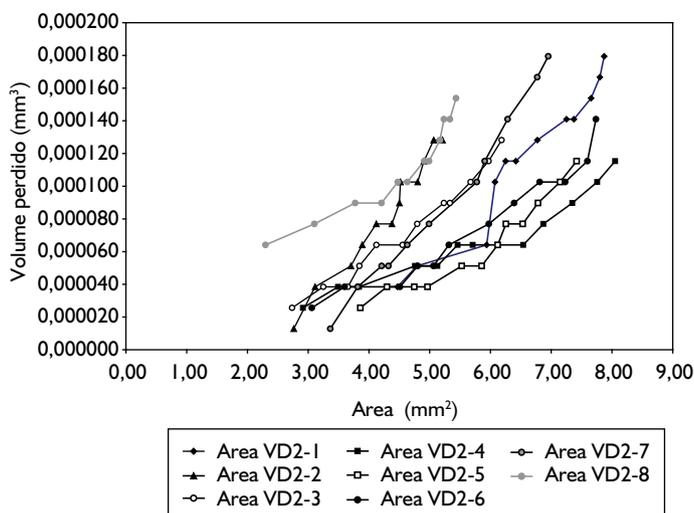


Figura 6. Evolução do volume acumulado perdido dos pinos de aço VD2 revenido em função da área de desgaste na ponta dos pinos no ensaio pino-sobre-disco. Carga 30 N

4 CONCLUSÕES

Da análise dos gráficos de volume perdido versus distância percorrida observa-se que ocorreu um maior desgaste dos pinos AISI D2 ou VD2 com tratamento térmico de revenimento duplo a 280°C e 500°C, com dureza final de 58 HRc e taxa de desgaste de aproximadamente $Q = 7,90 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ e coeficiente de desgaste $K = 1,72 \times 10^{-5}$. O melhor tratamento térmico em relação à resistência ao desgaste foi obtido com têmpera e revenimento duplo a 280°C e 300°C, produzindo a dureza final 57 HRc, apresentando taxa de desgaste $Q = 3,75 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ (em torno de 50% menor) e coeficiente de desgaste $K = 0,80 \times 10^{-5}$.

Como todos os pinos possuem durezas próximas, esta diferença na resistência ao desgaste é devido possivelmente aos mecanismos severos de desgaste por microlascamento e adesão do aço VD2. Outra explicação possível, para a maior resistência ao desgaste, é a maior tenacidade do aço em função do tratamento térmico. A menor tenacidade favorece o mecanismo de micro-lascamento ou delaminação presentes no desgaste por deslizamento ou abrasivo no ensaio de pino-sobre-disco, aumentando a taxa de desgaste para aço com menor tenacidade.

Observa-se, também, que a taxa de desgaste dos discos é aproximadamente linear e constante até o final, exceto na fase de rodagem inicial do ensaio: nos primeiros 200 m, onde a taxa é elevada. Isto é devido possivelmente ao processo de rompimento dos picos de rugosidades da superfície do pino e também devido à menor pressão real de contato pino-disco com a formação do sulco na pista de desgaste do disco.

Aparentemente, não existe uma relação única entre a área de desgaste na ponta do pino e o volume acumulado perdido do pino.

Finalizando, no caso específico do aço VD2, o tratamento térmico que otimiza a resistência ao desgaste é a têmpera seguida de revenimento duplo a 300°C, propiciando maior desempenho para o uso em ferramentas de corte e conformação a frio de chapas metálicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro recebido do CNPq, FAPESC, Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC, e à Villares Metals, pela doação do material dos pinos.

REFERÊNCIAS

- 1 SELECTION of material for blanking and piercing dies. In: ASM INTERNATIONAL. **Metals handbook**. Metals Park, Oh: ASM International, 1988. v.14: Forming and forging. p. 483-6.
- 2 MESQUITA, R. A.; ANDRIJAUSKAS, P. S.; FRANÇA, L. C.; ABREU, D. Q.; BARBOSA, C. A. Um novo aço para trabalho a frio de alta tenacidade–VF800AT. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 4., 2001, Gramado, RS. **Anais...** São Paulo: ABM, 2001. p.72-9.
- 3 HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. London: Edward Arnold, 1995.
- 4 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. Uberlândia: ABCM, 2001.
- 5 ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G99-95**: Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. West Conshohocken, PA, 1995.
- 6 BRESSAN, J. D.; GILAPA, L. C. M.; PAGANINI, D.; MESQUITA, R. A. Nova metodologia para medir resistência ao desgaste no ensaio pino-sobre-disco. In: ENCONTRO DE INTEGRANTES DA CADEIA PRODUTIVA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 3., 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2005. p.59-60.

Recebido em: 8/02/07

Aceito em: 28/10/07

Proveniente de: ENCONTRO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 4., 2006, Joinville, SC. São Paulo: ABM, 2006.