

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE AÇO VD2 COM DIFERENTES REVENIMENTOS¹

José Divo Bressan²
Leonidas M. Gilapa³
Deivid Paganini Daros⁴

Resumo

O presente trabalho investiga a resistência ao desgaste de aço ferramenta VD2 com diferentes temperaturas de revenimento e, portanto, diferentes durezas e tenacidades. 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 tempera 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, empregando-se uma velocidade de deslizamento 0,6m/s , carga normal de 30 N, distância total percorrida de 2400 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 tempera, mas 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 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 da carga normal aplicada, tratamento térmico, dureza e tenacidade. Como os pinos têm dureza e tenacidade diferentes, verificaram-se diferentes resistências ao desgaste. Investigou-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; Aços ferramenta; 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 Instituto Superior TUPY- IST, Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC, Rua Albano Schmidt, 3333, 89227-700 – Joinville/SC – Brasil. email: leonidas@sociesc.com.br

⁴ Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville - Campus Universitário, 89.223-100- Joinville/SC - Brasil. email: dem6at@joinville.udesc.br

1 INTRODUÇÃO

Os processos industriais de conformação de metal a frio como o corte e puncionamento de chapa, 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 as 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 a fratura e 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⁾ Através dos processos de tratamento superficial como a nitretação, TRD e os revestimentos de camadas cerâmicas duras por PVD e CVD é possível aumentar a vida útil do ferramental.

O aço AISI D2 ou VD2 tem um alto conteúdo de elementos de liga e geralmente é recomendado como material para punção e matriz no processo de corte por estampagem de chapas a frio.⁽¹⁾ Por outro lado, o aço AISI D6 tem propriedades mecânicas semelhantes e é um material com potencial de substituir o D2, embora tenha composição química diferente.

Durante os processos de fabricação de peças por conformação plástica seja no forjamento, extrusão ou ainda a partir de corte, estampagem e embutimento de chapas metálicas, o desgaste do punção e matriz é devido aos fenômenos de contato entre as superfícies deslizantes: contato entre as rugosidades, a presença de microcavacos e devido 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 à frio está diretamente relacionado com as seguintes propriedades mecânicas: resistência ao desgaste, tensão limite de escoamento, tenacidade à fratura e módulo de elasticidade.

Portanto, devido ao tipo de solicitação que ocorrem 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 nas operações de corte ou conformação plástica 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 definido como sendo a “*perda progressiva de massa da superfície de um sólido em movimento relativo, levando a ruptura ou falha*”. 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 condição de contato ou severidade do contato é definido 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, testes de laboratório foram desenvolvidos 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 tanto das propriedades do material e da topografia da superfície quanto 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 realizados em laboratório é a equação de Archad⁽³⁾ que avalia a razão de desgaste e o coeficiente de desgaste através da equação linear,

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

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 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,

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

onde K_S é o *coeficiente específico de desgaste* ($K_S = Q/F_N$) cuja unidade é $\text{mm}^3/\text{m} \cdot \text{N}$. 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 ferramenta 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 tempera 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 são usualmente 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.⁽⁴⁾ O presente resultados experimentais foram obtidos através da realização de ensaios de pino-sobre-disco conforme 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 2 ensaios, ou seja, um total de oito pinos.

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

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

2.1 Obtenção dos Corpos de Prova (cdp's)

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 10mm conforme mostrado na Figura 1. Após o processo de usinagem, os pinos confeccionados 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 3 mostra as durezas obtidas experimentalmente em cada pino medida após o tratamento térmico e antes do desgaste. A Tabela 2 apresenta a condições de tratamento térmico.



Figura 1. Pinos utilizados nos ensaios de desgaste Pino-sobre-disco.

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

Tratamento Térmico	VD2	
	Temperatura	Tempo
1 ^o pré-aquec.	450° C	01:00
2 ^o pré-aqcec.	800° C	00:15
Austenitização	1020° C	00:30
Resfriamento	180° C	00:05
Resfriamento	Ar	02:00

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

Tratamento Térmico	CDP 1		CDP 2	CDP 3	CDP 4
	Tempo	Temperatura	Temper.	Temper.	Temper.
1º Revenido	02:00	530° C	530° C	280° C	280° C
Resfriamento	02:00	Ar	Ar	Ar	Ar
2º Revenido	02:00	550° C	550° C	400° C	400° C
Dureza HRc		54	54	57	57

Tratamento Térmico	CDP 5		CDP 6	CDP 7	CDP 8
	Tempo	Temperatura	Temper.	Temper.	Temper.
1º Revenido	02:00	280° C	280° C	280° C	280° C
Resfriamento	02:00	Ar	Ar	Ar	Ar
2º Revenido	02:00	300° C	300° C	500° C	500° C
Dureza HRc		57	57	58	58

Discos. A contra-face ou disco, Figura 2 abaixo, foi obtido 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 a chapa de aço 1008. A dureza média do disco deste aço foi de 93 HV, mas um disco teve 87 HV.



Figura 2. Disco de aço 1008 ou contra face.

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 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 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 evitar que o solvente empregado na limpeza influenciasse nos

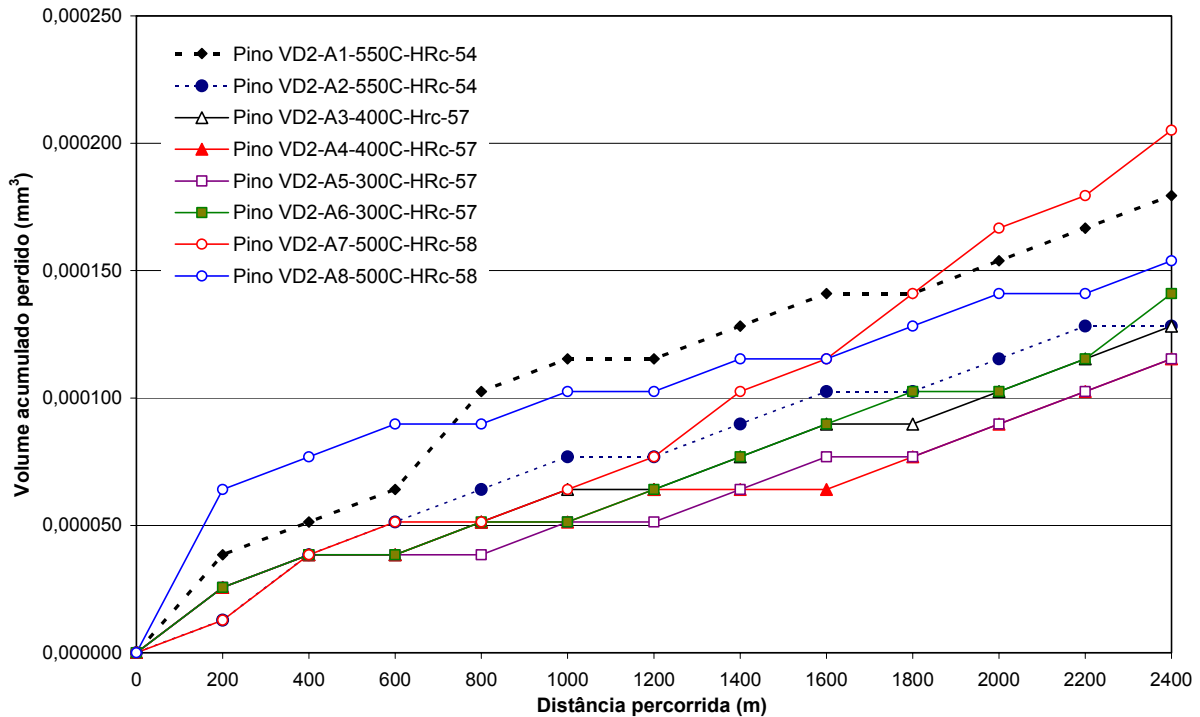


Figura 3. Evolução do volume acumulado perdido dos pinos de aço VD2 em função da distância de deslizamento percorrida. Carga normal de 30 N.

resultados, podendo desta forma ser avaliada a perda de massa real dos CDPs. Foram ensaiados discos de aço 1008 em ambas as faces, sendo dois pino de mesma dureza para cada disco. O equipamento possui uma campânula onde se controla 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 1) e o pino A3 contra o disco B2, e assim por diante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 apresentam-se os resultados experimentais dos pinos do ensaio de desgaste de pino-sobre-disco do aço VD2. Embora a dureza do pino tenha variado muito pouco, entre 54 a 58 HRc, a taxa de desgaste variou razoavelmente devido as diferentes resistências ao desgaste. Ou seja, o coeficiente de desgaste e a taxa de desgaste do aço VD2 depende do tratamento térmico e não somente da sua dureza. Portanto, o tratamento térmico também deve ser escolhido de modo a otimizar a resistência ao desgaste. Na Figura 3 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, apresentou a maior taxa de desgaste de aproximadamente $Q = 72,9 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{m}$. Por outro lado, o tratamento térmico dos pinos A5 e A6, dureza 57 HRc, apresentaram a menor taxa de desgaste do aço VD2 de $Q = 52,1 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{m}$ (em torno de 50% menos).

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, as curvas estão próximas e tem uma taxa média de desgaste para o aço 1008 de $Q = 3.333,31 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{m}$.

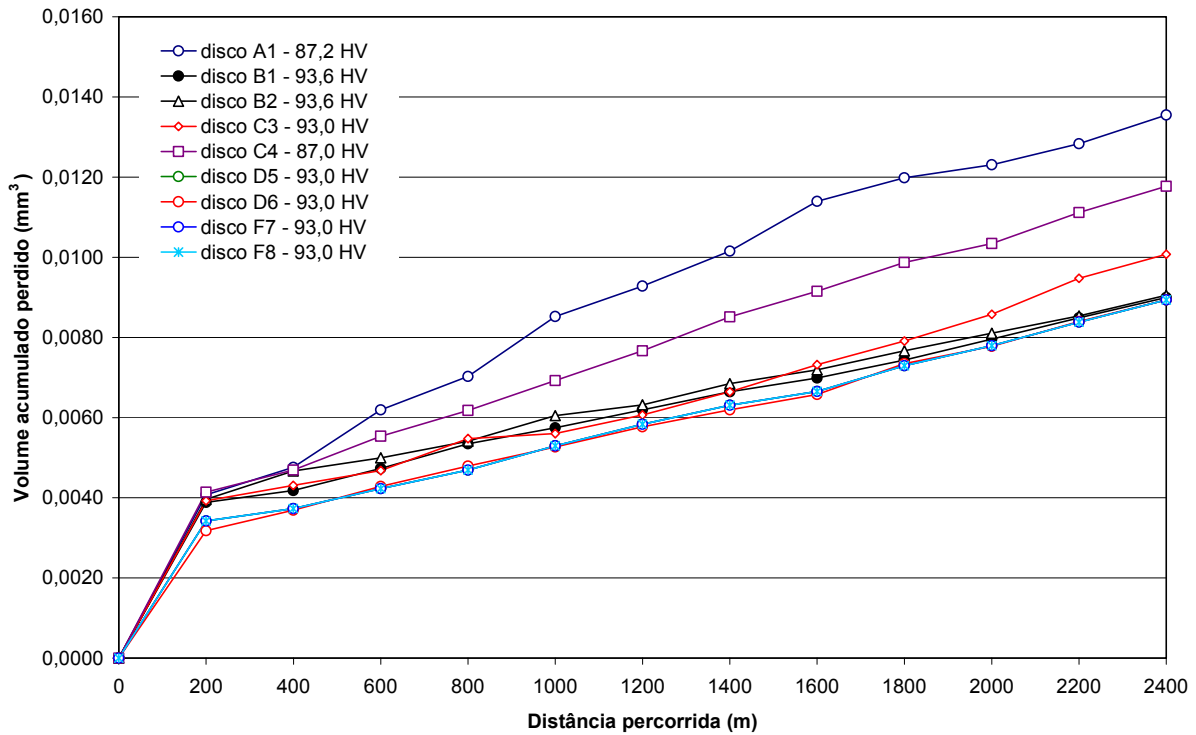


Figura 4. Evolução do volume acumulado perdido dos discos de aço 1008 em função da distância de deslizamento percorrida. Dureza HV do disco indicada.

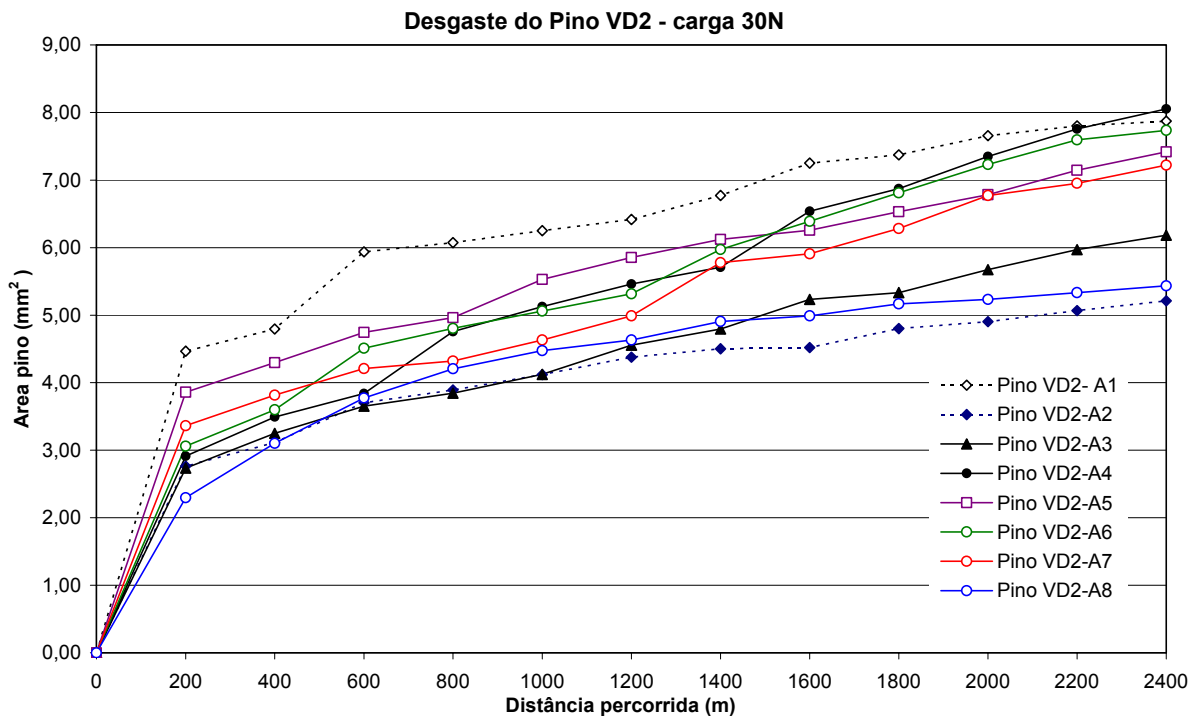


Figura 5. Evolução da área da marca na ponta dos pinos de aço VD2 em função da distância de deslizamento percorrida no ensaio pino-sobre-disco.

Na Figura 5 mostram-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 tem 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 distancia 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 ($1/H_e = 1/H_{disco} + 1/H_{pino}$). As curvas dos pinos A5 e A6 são superiores aos pinos A7 e A8, contrário as curvas de evolução dos volumes.

Na Figura 6, apresentam-se a relação 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 de volume é estimado em $26 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$ (0,2 mg).

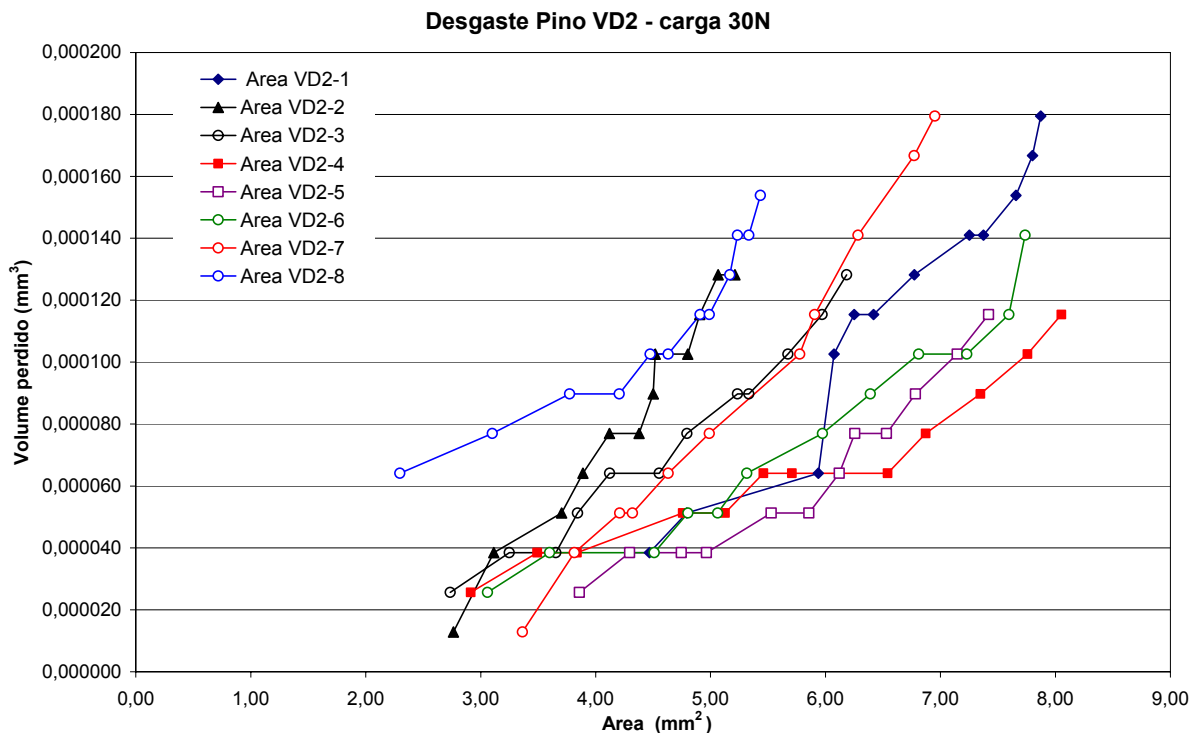


Figura 6. Evolução do volume acumulado perdido dos pinos de aço VD2 em função da área da marca na ponta dos pinos no ensaio pino-sobre-disco.

5 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, tendo a dureza de 58 HRc e taxa de desgaste de aproximadamente $Q = 72,9 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{m}$. O melhor tratamento térmico em relação a resistência ao desgaste foi de $Q = 52,1 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{m}$ (em torno

de 50% menor) obtido com tempera e revenimento duplo a 280 °C e 300 °C, dando a dureza de 57 HRc pouca coisa menor que o tratamento térmico anterior.

Como todos os pinos tem dureza variando pouco, esta diferença é devido possivelmente aos mecanismo severo de desgaste por microlascamento e adesão do aço VD2. Uma 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 microlascamento 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 a menor pressão real de contato pino-disco com a formação do sulco da pista no 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, do tratamento térmico que otimiza a resistência ao desgaste é o 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 gostariam de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq, da FAPESC, da Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC, e a Villares Metals pelo material dos pinos doados.

REFERÊNCIAS

- 1 ASM INTERNATIONAL. **Forming and forging**. Metals Park, 1988. p. 483 (ASM Handbook, v.14).
- 2 MESQUITA, R.A.; ANDRIJAUSKAS, P.S.; FRANÇA, L.C.; ABREU, D.Q. E 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...** [S.n.t.]. p.72-79.
- 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. [S.n.t.]
- 5 ASTM. , Designation: G99-95; Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, p. 336-390, 1995.
- 6 BRESSAN, J.D.; GILAPA, L.C.M. ; PAGANINI, D. E 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. 1 CD-Rom.

STUDY OF THE WEAR RESISTANCE OF VD2 STEEL WITH DIFFERENT QUENCHING

*José Divo Bressan
Leonidas M. Gilapa
Deivid Paganini Daros*

Abstract

Present work investigates the wear resistance of AISI D2 (VD2) tool steel with different quenching temperatures and, therefore, various hardness and toughness. The 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 were ABNT 1008 steel sheet used in the fridge industry. 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. 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 measured. The discs were AISI 1008 steel sheets with 1 mm thickness and 62 mm in diameter and tested as received. From the analysis of plotted graphs of cumulative lost volume versus sliding distance, it was observed the 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 wear 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 forming tools of sheet metals.

Key words : Wear test; Tool steel; Heat treatment; VD2 steel.