

NOVA METODOLOGIA PARA MEDIR RESISTÊNCIA AO DESGASTE NO ENSAIO PINO-SOBRE-DISCO

José Divo Bressan¹
Leonidas M. Gilapa²
Deivid Paganini Daros³
Rafael A. Mesquita⁴

Resumo

O presente trabalho apresenta uma nova metodologia para medir a resistência ao desgaste ou taxa de desgaste em pinos ou esferas de metais, empregando-se o ensaio de pino-sobre-disco. Os testes de desgaste por abrasão e/ou deslizamento foram realizados num tribômetro do tipo pino-sobre-disco cujos pinos foram de aço ferramenta VWM2 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, empregando-se uma velocidade de deslizamento 0,6 m/s, cargas normais de 20 N e 30 N, distância total percorrida de 2400m e temperatura ambiente com umidade controlada de 25°C e 49% respectivamente. Os pinos de aço VWM2 foram submetidos ao mesmo tratamento térmico de tempera e revenimento com dureza final variando entre HV 705 a 759. Os discos foram de chapa de aço 1008 com diâmetro de 62 mm, dureza HV 91, ensaiados como recebido. A resistência ao desgaste do material do pino foi medida tanto pelo método convencional da medida da massa perdida como através de uma nova metodologia de medida da largura e da área da pista gasta na ponta do pino. Mediu-se também a largura da pista nos discos. Da análise dos gráficos de volume cumulativo perdido, largura da pista e área da pista versus distância percorrida observam-se as diferentes taxas de desgaste em função da carga normal aplicada. Como os pinos têm pequenas diferenças de dureza, eles apresentarem diferentes resistências ao desgaste. Verificou-se que razão de desgaste do material do pino pode ser avaliada através da medida da área desgastada da ponta do pino ou diâmetro maior da área elíptica que se forma na ponta do pino, com maior precisão da medida do desgaste.

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

Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM

*3º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes.
28 a 30 de Outubro/2005. São Paulo, S.P.*

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

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

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

⁴ *Engenheiro de Materiais, Mestre Ciência e Eng. Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A.,
Sumaré, SP, Brasil, e-mail: rafael.mesquita@villaresmetals.com.br.*

1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais aços ferramenta para a fabricação de punções e matrizes destacam-se os aços AISI M2, AISI D2, AISI D6 e o novo aço produzido pela Villares Metals, o VF800AT [1].

Os aços ferramenta para trabalho à frio são amplamente utilizados principalmente pelas indústrias do setor metal-mecânico por possuírem uma boa combinação de *resistência mecânica* e *resistência ao desgaste*. Entretanto, devido ao tipo de sollicitação que ocorrem nas ferramentas nas operações de corte e conformação de metais, é necessário também 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 interna 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.

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 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 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 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 selecionada constante, um determinado valor constante de carga normal sobre o pino, uma velocidade de deslizamento constante [3,4] e condições de temperatura e umidade controladas. A seguir, é feito uma breve revisão de alguns dos ensaios de desgaste de laboratório.

2 ENSAIOS DE DESGASTE EM LABORATÓRIO

As pesquisas científicas e tecnológicas sobre desgaste são um relevante tópico na seleção de materiais e no design, conseqüentemente, um grande número de testes de laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de medir a resistência ao desgaste sob condições controladas semelhantes às condições em serviço e de se classificar um elenco de materiais para aplicações tribológicas. A associação American Society for Testing Materials – ASTM, descreve mais de 30 métodos experimentais para se medir o desgaste [4]. Na Tabela 1 abaixo apresentam-se os ensaios de desgaste de acordo com a norma da ASTM.

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

Tabela 1. Ensaio de Desgaste ASTM [4].

ASTM	Material	Aplicações	Equipamentos
B611	Carbeto tungstênio	Abrasão úmida	Plano contra disco rebolo
C131	Agregado mineral	Resistência ao impacto	Moinho de bolas
C418	Concreto	Jateamento	Areia soprada com ar
C448	Cerâmica	Porcelana	Máquina de lapidação NBS
C501	Cerâmica	Azulejo, piso	
C585	Agregado mineral	Resistência a britagem	Moinho de bolas
C704	Cerâmica	Tijolo refratário	Jato erosivo à temp. ambiente
C779	Concreto	Impacto por deslizamento abrasivo	Vários equipamentos
C808	Carbono - grafite	Selos	
C944	Concreto	Corte rotativo	Pressionar com broca
D658	Revest. orgânico	Pintura, verniz	
D968	Revest. orgânico	Pintura, verniz	
D1395	Revest. orgânico	Revestimento de pisos	Como na D658 e D968
D1630	Borracha	Sola de sapato e saltos	Máquina abrasão a tambor NBS
D2714	Metal, Cerâmica e Plástico	Desgaste por escorregamento	Bloco sobre anel, Máquina Falex
D2981	Lubrificante umido	Deslizamento oscilante	Anel sobre bloco máquina Falex
D3181	Têxteis	Roupas	Dado humano subjetivo
D3702	Metais	Materiais auto-lubrificados	Máquina Falex p/ arruelas sob pressão
D3884	Têxteis	Resistência à abrasão	
D3885	Têxteis	Abrasão	Cilindro oscilante
D3886	Têxteis	Abrasão	
F510	Revest. orgânico	Revestimento de pisos	
G6	Isoladores	Revestimento em tubulações	Tambor giratório
G32	Metal, Cerâmica Plástico	Cavitação	Vibração em banho líquido
G56	Tecido	Cinta, faixa pintada	Tira enrolada em tambor
G65	Metais	Abrasão por areia seca	Fluxo de areia, roda de borracha
G73	Metal, Plástico	Erosão líquida	
G75	Metais	Abrasão p/ partícula em suspensão	Sobrep. alternada, abrasivo em suspensão
G76	Metal, Cerâmica e Plástico	Erosão	Partículas contra plano ou placa
G77	Metal, Cerâmica Plástico	Desgaste por escorregamento	Anel sobre bloco Máquina Falex
G81	Metais, compósitos	Desgaste em britador de mandíbulas	Placas de britador angulosas
G83	Metais	Desgaste p/ deslizamento	Cilindros cruzados
G99	Metal e cerâmica	Desgaste por deslizamento	Pino-sobre-disco
G105	Metais	Abrasão p/ part. em suspensão	Semelhante a G65

Os resultados experimentais do desgaste realizados em laboratório são analisados através da equação de Archard [5] ou de Rabinowicz [6] 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 [5],

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

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 ensaio de pino-sobre-disco o material mais mole é o disco. O volume perdido 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.

O desgaste pode ser classificado em “desgaste a dois corpos” ou a “três corpos” [7]. O desgaste é dito a “dois corpos” quando envolve somente dois sólidos em contato em movimento relativo, chamado de *desgaste por deslizamento*. Porém, no “desgaste a três corpos” ocorrem partículas duras entre as duas superfícies sólidas em movimento relativo e que produzem o *desgaste abrasivo*. Por sua vez, o desgaste abrasivo por partícula dura pode ser devido ao mecanismo de deslizamento da partícula ou ao mecanismo de indentação da mesma. O deslizamento da partícula produz os mecanismos de desgaste por micro-sulcagem ou micro-riscagem e a micro-usinagem (formação de micro-cavacos).

Quanto à natureza do fenômeno do desgaste, o mecanismo pode ser a *deformação plástica* (fenômeno mecânico) das rugosidades superficiais (produzindo a micro-sulcagem ou micro-usinagem), o *micro-trincamento* e a *aderência* (fenômeno químico) de material na superfície, transferindo material de um corpo para o outro.

Os objetivos do presente trabalho foram investigar a resistência ao desgaste do material do pino, aço VWM2, medindo-se tanto pelo método convencional de se medir a perda de massa do disco e do pino, como através de uma nova metodologia de medir a largura da pista e da área gasta na ponta do pino em função da distância percorrida no ensaio de desgaste Pino-sobre-disco.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

Os resultados de resistência ao desgaste 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 [2,3]. A Tabela 2 mostra os parâmetros empregados durante a execução dos ensaios. Para cada condição de carga normal foram feitos 2 ensaios, ou seja, quatro pinos de aço VWM2, sendo dois pinos com a mesa carga normal.

Tabela 2. Parâmetros empregados na realização dos ensaios de desgaste.

Velocidade linear (m/s)	Carga 20N (Kgf)	Carga 30N (Kgf)	Distância Percorrida (m)	Raio da pista (mm)
0,6	1,930	2,953	2400	14,3

3.1 Obtenção dos Corpos de Prova (cdp's)

Pinos. Para a obtenção dos pinos foram utilizados cilindros de uma barra de aço ferramenta VWM2. 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) de acordo com a finalidade de utilização como ferramental para aumento de sua dureza e resistência mecânica. A Tabela 3 apresenta as durezas obtidas experimentalmente em cada pino medida após o tratamento térmico e antes do desgaste. A Tabela 4 apresenta a condições de tratamento térmico e as respectivas durezas obtidas.



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

Tabela 3. Valores experimentais da dureza Vickers de cada pino de aço VWM2.

	Pino 1 (20N)	Pino 2 (20N)	Pino 3 (30N)	Pino 4 (30N)
Dureza HV (Kgf/mm ²)	719	709,5	705	759

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

Tratamento Térmico	VWM2
Têmpera	
preaquecimento	800 °C
austenitização	970 °C
martêmpera	540 °C (banho sais)
Revenimento	500 °C
Dureza	58 HRC

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 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 HV 91.

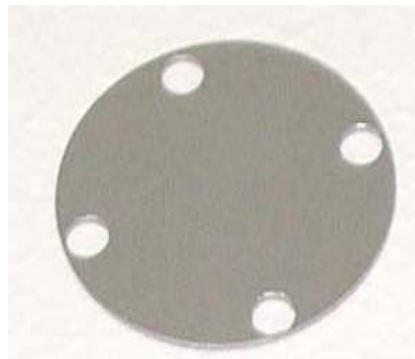


Figura 2. Disco de aço 1008 ou contra face.

3.2 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 resultados, podendo desta forma ser avaliada a perda de massa real dos CDPs. Foram ensaiados 4 discos de aço 1008 numa das faces, sendo um pino para cada disco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A massa perdida do pino e disco foi convertida em volume perdido através da divisão pela densidade, eq. 3. Os resultados vistos nas Figuras 3 e 4 referem-se aos valores da perda de volume dos quatro pinos de aço VWM2 e discos dos ensaios realizados para cada pino deslizando contra chapa de aço 1008, percorrendo a distância total de 2400 m com cargas normais sobre o pino de 20N e 30N.

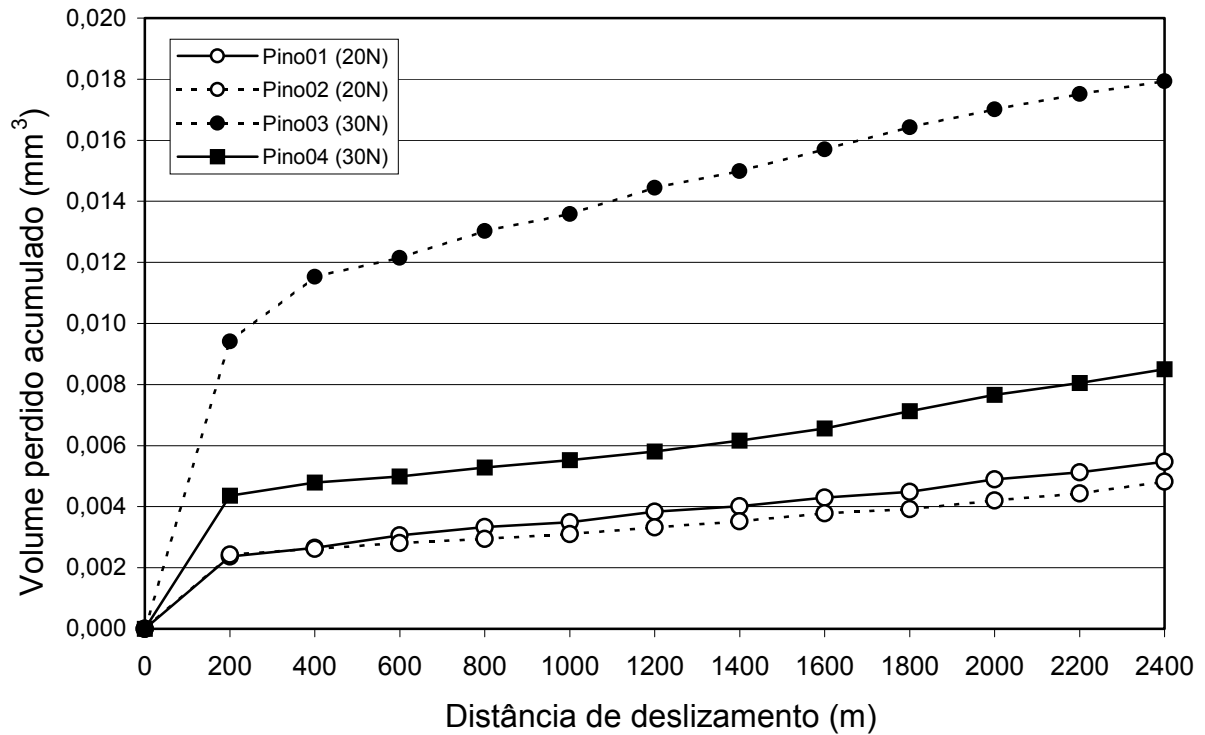


Figura 3. Evolução da perda acumulada de volume dos discos. Cargas 20N e 30N.

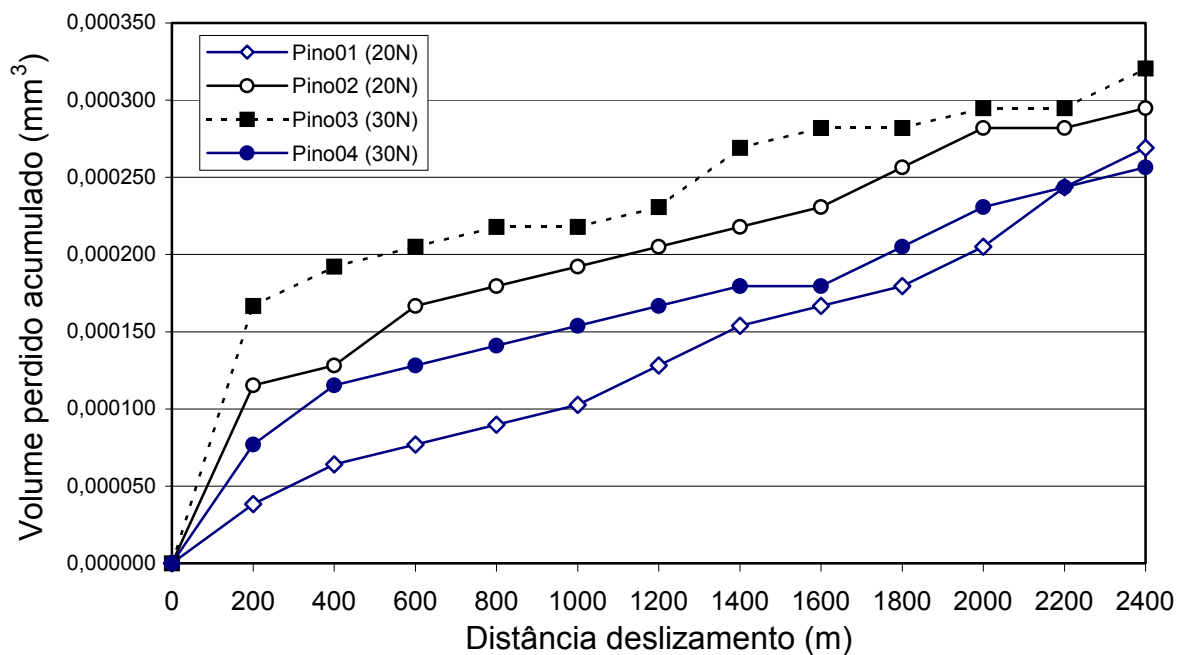


Figura 4. Evolução da perda acumulada de volume dos pinos. Cargas 20N e 30N.

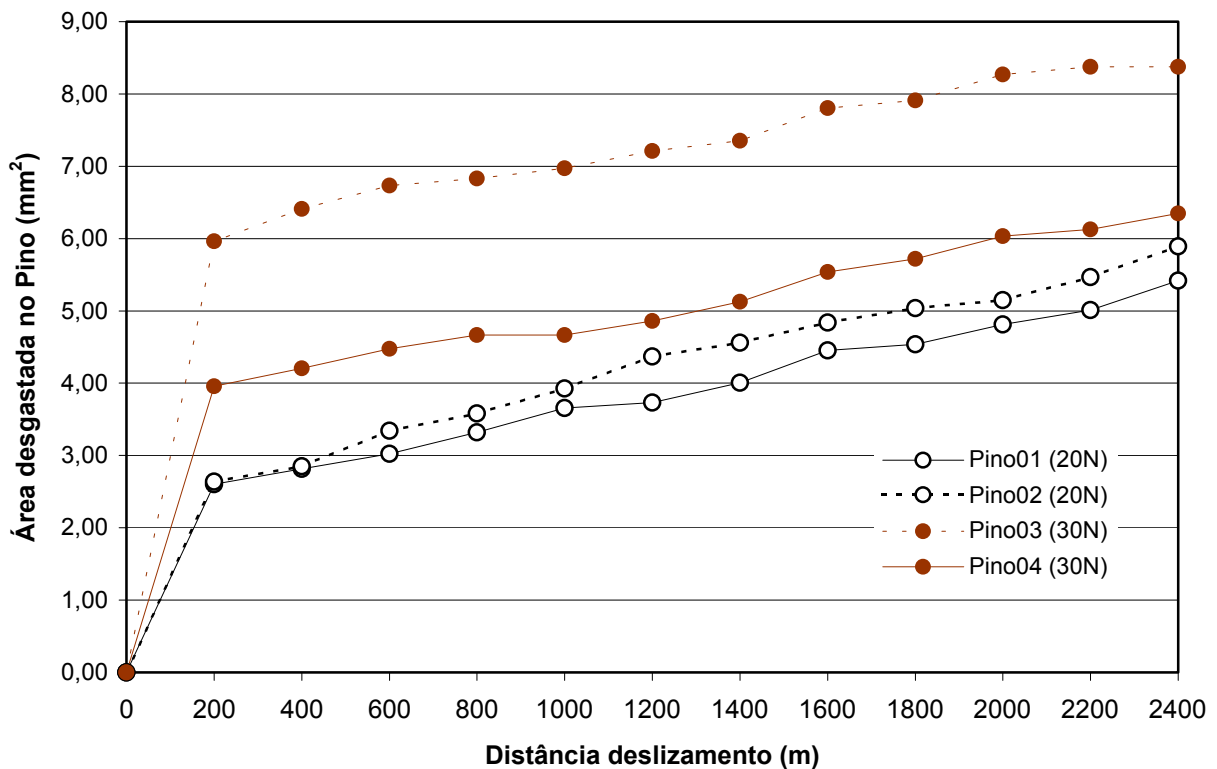


Figura 5. Evolução da área desgastada na ponta dos pinos. Cargas 20N e 30N.

Nas Figuras 3 e 4 observa-se que a razão de desgaste Q é bastante elevada no início do processo de desgaste e depois se torna aproximadamente constante após os 200 m. Este processo inicial transitório se chama rodagem ou “run in” devido ao rompimento dos picos das rugosidades da superfície do pino e disco e também devido a diminuição da pressão real de contato pino-disco com a formação do sulco da pista no disco e do desgaste da ponta do pino. Na Figura 3, nota-se que as curvas da perda de volume do disco 1 e 2, curvas para os pinos 01 e 02 com carga normal de 20 N, são praticamente idênticas, enquanto que para o disco 2 e 3 com carga de 30 N, pinos 03 e 04, as curvas são bem distintas. Isto deve-se provavelmente a menor dureza do disco 3 em relação aos outros discos e também a maior carga normal no pino de 30 N. Na Figura 4, o pino 03 também apresenta um maior desgaste ao longo da distância de deslizamento percorrida contra o disco 3.

De acordo com a previsão da equação de Archad, o desgaste no pino será maior para uma menor dureza e mesma carga. Portanto, o pino 04 deverá ter maior dureza. Isto está confirmado na tabela 3: pino 04 tem dureza 759 HV e o pino 03 tem dureza 705 HV. Entretanto, este pino 04 com carga de 30 N apresentou desgaste menor que o pino 02 sob carga menor de 20 N. Esta constatação requer uma avaliação mais cuidadosa da medida de desgaste desses pinos para se verificar os erros de medida na massa perdida do pino ou a mecanismo de aderência. A maior razão de desgaste ocorreu com o pino cuja dureza era de 705 HV sob carga normal de 30 N e a menor razão de desgaste foi para o pino cuja dureza era 719 HV sob carga normal de 20 N. Sob a carga de 30 N a menor razão de desgaste ocorreu no pino cuja dureza era maior, 759 HV. Desprezando-se o processo inicial de rodagem, as razões de desgaste Q dos discos são de $Q(20N) = 1,14 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$ e $Q(30N) = 3,5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$. Por outro lado, a razão de desgaste médio dos pinos de WM2 foi bem menor, aproximadamente $8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{m}$, ou seja 100 vezes menor que o disco.

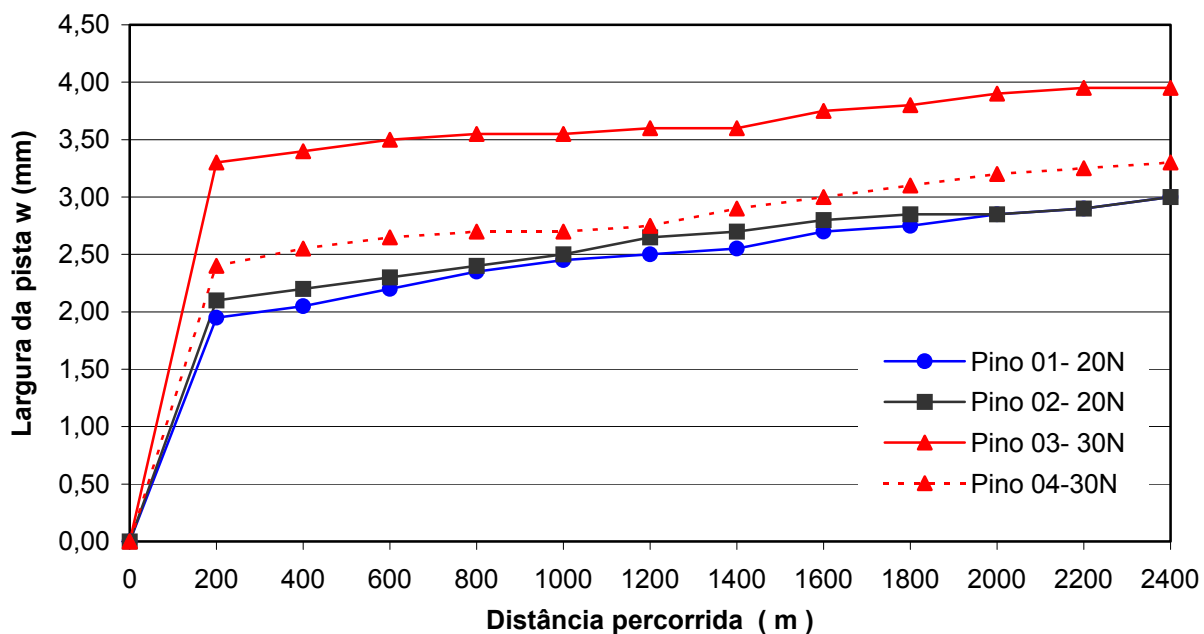


Figura 6. Evolução do diâmetro maior w da área elíptica desgastada na ponta dos pinos. Cargas 20N e 30N.

O método proposto para se medir experimentalmente o desgaste do pino é medir a área ou o diâmetro maior da área elíptica desgastada que surge na ponta do pino. Na Figura 5 apresenta-se a área desgastada do pino, calculada através da fórmula da área da elipse ($A = \pi d_1 d_2 / 4$), em função da distância percorrida. Os diâmetros d_1 e d_2 foram medidos experimentalmente através de um microscópio ótico com escala na ocular e precisão de 0,01 mm. Portanto, na Figura 5, as curvas de desgaste obedecem a previsão de maior desgaste para uma maior carga normal.

A diferença das curvas do desgaste dos pinos 03 e 04 deve-se a sua dureza diferente: pino 04 tem dureza maior, 759 HV, e o pino 03 tem dureza 705 HV.

A razão de desgaste depende tanto da dureza do disco como da dureza do pino, ou seja, a resistência ao desgaste depende da dureza equivalente do contato pino-disco. Portanto, na equação de Archad deve-se usar uma dureza equivalente.

Na Figura 6, o diâmetro maior w da área elíptica desgastada no pino é apresentado em função da distância percorrida pelo pino no ensaio. As curvas apresentam-se paralelas com resultado semelhante e mesma tendência do gráfico das áreas desgastadas, embora a inclinação das curvas sejam menores.

5 CONCLUSÕES

Dos resultados experimentais do ensaio de desgaste de pino-sobre-disco apresentados nos gráficos de volume perdido versus distância de deslizamento, podemos concluir as seguintes observações:

1- O comportamento ao desgaste está dividido em duas fases. Nos 200 m da fase inicial ocorreu uma maior razão (taxa) de desgaste em ambos discos e pinos de VWM2. Na segunda fase, a curva é aproximadamente linear e a taxa de desgaste é menor, mas é constante até o final, tanto para a carga de 20N como 30N. Esta fase inicial é devida possivelmente ao processo inicial de rodagem (“run in”) com aplainamento e retirada dos picos das rugosidades da superfície do pino e a menor pressão real de contato pino-disco com a formação do sulco da pista no disco.

2- A razão de desgaste do material do pino pode ser avaliada através da medida da área desgastada da ponta do pino ou do diâmetro maior da área elíptica que se forma na ponta do pino, com maior precisão da medida do desgaste que o método convencional de medida da massa perdida no ensaio de desgaste.

3- O método proposto de medir o desgaste do pino é adequado, pois o método convencional pode ter os dados mascarados pelo mecanismo de desgaste adesivo.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 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: IV Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Gramado/RS, outubro/2001, p.72-79.
- 2 ASTM, Designation: G99-95; 1995, Standard test method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, p. 386-390.
- 3 Bressan, J.D. e Hesse, R., Construction and validation tests of a pin-on-disc equipment. In. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM 2001, Uberlândia/MG, dezembro/2001.
- 4 Williams, J.A., The laboratory simulation of abrasive wear. Tribotest Journal, 3-3, p.267-306, 1997.
- 5 Hutchings, I.M., Tribology: Friction and wear of engineering materials. Arnold, 1995.
- 6 Rabinowicz, E. ; Dunn, L.A. e Russe, P.Q. , A study of abrasive wear under three-body conditions, Wear , v. 4, p. 345-355, 1961.
- 7 Zum Gahr, K.H., Wear by hard particles. Tribology International, 31, p.587-596, 1998

NEW METHODOLOGY TO MEASURE WEAR RESISTANCE IN THE PIN-ON-DISC TEST

*José Divo Bressan
Leonidas M. Gilapa
Deivid Paganini Daros
Rafael A. Mesquita*

Abstract:

Present work propose a new methodology to investigate the wear resistance of pin and sphere metals, using the pin-on-disc apparatus. The wear tests by sliding and/or abrasion were performed in a pin-on-disc whose pins were tool steel made from VWM2 with quenching and tempering heat treatment. The discs were ABNT 1008 steel sheet used in the fridge industry. The wear resistance of tool steels were evaluated, using a sliding velocity of 0.6m/s, normal loads of 20N and 30N, total sliding distance of 2400m and controlled conditions of temperature and humidity 25°C e 49% respectively. The pin materials were heat treated at the same conditions attaining hardness between HV 705 and 759. The discs were 1008 steel sheets with 62mm of diameter, hardness HV 91, and were tested as received. The pin material wear resistance was calculated by the conventional method of measuring the lost mass and by a new methodology to measure the larger diameter of the worn area at the pin tip. From the plotted graphs of cumulative lost volume, diameter and area versus sliding distance, it was observed the different wear rate as function of the applied load. As the pin have slightly different hardness they presented diverse wear ratio values. It was verified that the pin material wear ratio can be better evaluated from the worn area at the pin tip or from the worn elliptic area larger diameter..

Key-words: Wear test; Tool steel VWM2; Cold forming.