AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE AÇOS FERRAMENTA SINTERIZADOS TRATADOS TERMICAMENTE A VÁCUO

TOOL STEEL WEAR RESISTANCE EVALUATION PRODUCED BY POWDER METALLURGY, HEAT TREATED VACUUM.

PAZ, Vinicius de Freitas*; TREVISAN, Lisiane²; REGULY, Afonso³

^{1,3} Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Laboratório de Metalurgia Física.

Av. Osvaldo Aranha, 99/610, CEP 90035-190, Porto Alegre – RS, Brasil
(fone: +55 51 3308 4251; fax: +55 51 3308 3988)

² Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, CEP 95180-000 - Farroupilha, RS - Brasil
(fone: +55 54 3035 1432)

* Autor correspondente

e-mail: viniciuspaz_rs@hotmail.com

Received 16 January 2016; received in revised form 16 April 2016; accepted 18 April 2016

RESUMO

A determinação da taxa de desgaste é fundamental para estimativa de vida útil de ferramentas tratadas termicamente, utilizadas em processos de conformação mecânica pela indústria metalmeccânica. Sendo assim, o objetivo principal deste artigo é determinar a taxa de desgaste de cinco tipos de aço ferramentas, produzidos por metalurgia do pó e um por lingotamento convencional, tratados termicamente pelo processo de têmpera a vácuo e revenidos triplamente. Para tanto, utilizou-se método de ensaio “Pino e disco”, para o ensaio foram usados três corpos de prova para dois acabamentos superficiais distintos (retificado e polido) e carga de ensaio de 10N. Os resultados mostraram que a taxa de desgaste sofre alteração para os diferentes acabamentos superficiais estudados. Sugere-se que para trabalhos futuros, possam ser mensurados o efeito de diferentes cargas de ensaio em aços ferramenta, bem como ensaiar revestimentos de engenharia sobre a superfície desses materiais.

Palavras-chave: Desgaste, aços ferramenta, metalurgia do pó, tratamento térmico a vácuo.

ABSTRACT

Determination of wear rate is fundamental to life estimation tools heat treated, used in metal forming processes for the metalworking industry. Thus, the main purpose of this article is to determine the five types wear rate of tool steel produced by powder metallurgy and one by conventional casting, heat-treated by vacuum hardening process and triple tempered. To this end, we used test method "pin and drive", were used for testing three specimens for two different surface finishes (ground and polished) and 10N test load. The results showed that the wear rate will change for different surface finishes studied. It is suggested for further work can be measured the effect of different loads test tool steels, as well as engineering tested coatings on the surface of these materials.

Keywords: Wear, tool steel, powder metallurgy, Vacuum heat treatment.

INTRODUÇÃO

Tribologia é definido como a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo e os fenômenos que decorrem desta interação. Segundo Budinski (1998) esse conceito foi definido cientificamente pelo comitê de cooperação econômica e desenvolvimento no reino unido em 1967. A palavra tribologia é derivada do grego “tribos” que significa fricção ou desgaste (STACHOWIAK, 2005). Outra definição de tribologia, é a ciência que estuda os fenômenos do desgaste, atrito e lubrificação e, os relacionam com os aspectos físicos, químicos, mecânicos e metalúrgicos do movimento relativo entre superfícies (HUATCHINGS, 1992).

Desgaste pode ser definido como remoção de material de uma superfície sólida, ocasionada em uma reação entre superfícies, podendo ocasionar falha mecânica ou operacional de um componente (BOTH, 2011). Os mecanismos e taxa de desgaste dependem extensivamente da composição química, microestrutura, das cargas de carregamento e das propriedades de superfície do material em análise (BAHRAMI, 2004). Por outro lado, no processo de desgaste, geralmente ocorrem reações entre as asperezas das superfícies, devido à influência do carregamento termomecânico aplicado em situações com movimento relativo. Isso, pode modificar a topografia da superfície e a interação entre os materiais envolvidos (YOUSIF, 2013)

Pode-se classificar o desgaste em diferentes modos de falha como o abrasivo, adesivo, fadiga na superfície e reações triboquímicas. Os modos de desgaste podem ser divididos em maiores e diferentes, dependendo dos mecanismos de falha envolvidos no sistema tribológico (SANNA-ALA, 2007).

KARLSSON cita que operações conformação a frio em aços inoxidáveis frequentemente sofrem com desgaste e, geralmente são caracterizados pela transferência do material metálico que fora conformado, na superfície do aço ferramenta da matriz. Assim, um dos principais mecanismos de transferência de material para a matriz em aço ferramenta é o desgaste adesivo, podendo ser acompanhado por desgaste abrasivo (KARLSSON, 2011).

Sendo assim, o objetivo principal deste

trabalho fora determinar a taxa de desgaste de 5 qualidades diferentes de aços ferramenta, sinterizados e convencional, tratados termicamente sob tempera a vácuo e triplo revenido. Para podermos avaliar a influência do acabamento superficial, foram determinadas inicialmente carga de 10N, nas condições de acabamento superficial retificado e polido. Sendo que para cada condição foram ensaiados 3 corpos de prova.

O estudo destas ligas de aços ferramenta sinterizados, justifica-se no sentido de que são materiais produzidos por uma rota metalúrgica moderna (Metalurgia do pó) e, estão cada vez mais sendo utilizadas industrialmente em matrizes de processos de conformação mecânica, como estampagem, cunhagem, corte e dobra de aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, ligas de alumínio e titânio.

Kennedy cita propriedades metalúrgicas que influenciam no modo de desgaste, como dureza, estrutura cristalina, resistência à nucleação de trincas, reatividade química e física, capacidade de deformação, resistência à propagação de trincas e módulo de Young, como fatores que também influenciam na resistência ao desgaste (KENNEDY, 1998).

A Figura 1 evidencia as principais variáveis que estão relacionadas à análise do processo de desgaste.

Figura 1. Propriedades metalúrgicas que afetam o desgaste entre superfícies. (KENNEDY, 1998)

Em termos microestruturais, os carbonetos desempenham um papel importante na resposta mecânica de um aço ferramenta, uma vez que atuam como partículas duras na matriz do aço e colaboram na resistência ao desgaste. O controle da morfologia e tamanho dos carbonetos influencia diretamente no desempenho frente ao desgaste e fadiga dos aços ferramenta (CASELLAS, 2007).

Carbonetos primários e secundários

possuem fundamental importância no controle microestrutural e consequentemente na resposta tribológica desses materiais. Nesse caso, mecanismos de desgaste, podem ser reduzidos pela melhor distribuição de carbonetos na matriz dos aços, evitando bandas de carbonetos e, minimizando assim a formação de partículas aderidas na interface matriz de aço/metal de trabalho por essas regiões (FONTALVO, 2005).

Pode-se afirmar que, os aços ferramenta produzidos pelo processo da metalurgia do pó produzem uma microestrutura com espaçamento uniforme e regular entre os carbonetos nas diversas direções da microestrutura no aço, propiciando maior resistência ao desgaste destes materiais (ARSLAN, 2011).

Já em relação a carga utilizado no ensaio de desgaste, quanto maior a força normal sobre a superfície, maiores serão os pontos de contato e consequentemente a tendência ao desgaste adesivo entre as partes. Para materiais dúcteis que possuem o alongamento pronunciado, normalmente ocorre maior área de contato, favorecendo ao início de mecanismos de desgaste (MATTA, 2001; HATAMI, 2010).

MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais utilizados na etapa experimental foram cinco tipos de aços ferramenta, quatro fabricados pelo processo da metalurgia do pó e um pela rota convencional.

O processo de fabricação por metalurgia do pó, produz aços ferramenta de maior resistência ao desgaste, tenacidade e homogeneidade microestrutural, em função de seu processo de fabricação siderúrgico suprimir a segregação na solidificação, pois a taxa de resfriamento do aço é muito elevada em relação ao processo convencional, proporcionando uma microestrutura com carbonetos finamente dispersos e distribuídos na microestrutura do aço ferramenta.

As ligas metálicas utilizadas para a etapa experimental são: os aços DIN 1.2767 do fabricante *Schmolz-Bickembach*, os aços Vanadis 10, Vanadis 4, aço S390V, Vancron 40 do fabricante *Bohler-Uddeholm*. A composição química está descrita na Tabela 1. O aço DIN 1.2767 é produzido por lingotamento convencional, enquanto os outros materiais são

fabricados por metalurgia do pó.

Tabela 1. Composição química dos aços estudados.

	S390 V	Vanadi s 4	Vanadi s 10	Vancro n 40	DIN 1.2767
%C	1,40	1,40	2,90	1,15	0,50
%Si	0,60	0,40	1,00	0,40	0,25
%Mn	0,30	0,40	0,50	0,40	0,35
%Cr	4,8	4,7	8,00	4,80	1,30- 1,50
%Mo	2,00	3,50	1,50	3,20	0,20
%W	10,40	-	-	3,70	-
%V	4,80	3,70	9,80	8,50	-
%Co	8,00	-	-	-	-
%N	-	-	-	1,80	-
%Ni	-	-	-	-	4,00

O processo de tratamento térmico de escolhido foi têmpera em forno a Vácuo, com resfriamento forçado por Nitrogênio sob alta pressão. Na etapa de tratamento térmico de têmpera e revenimento, foi utilizado um forno a Vácuo TAV- H5, com capacidade de 500 kg de carga. Os ciclos de austenitização e resfriamento foram realizados sob vácuo, no interior do forno. Após o tempo adequado para austenitização de cada aço, realizou-se a etapa de resfriamento com Nitrogênio gasoso, sob pressão de 5 Bar absolutos.

Foram confeccionados e tratados termicamente, corpos de prova com diâmetro de 30 mm e altura de 6 mm para realização dos ensaios de desgaste com tolerâncias dimensionais conforme especificadas pela norma NBR ISO 2768-1, através da usinagem mecânica em torno universal e fresadora horizontal.

Para o acabamento retificado, o processo foi realizado em máquina retificadora plana, para o desbaste da superfície dos corpos de prova. Já para o acabamento polido, utilizou-se o procedimento metalográfico de preparo da superfície, com lixamento plano superficial nas lixas de granulometria #120, #220, #320, #400, #600, # 1200 e polimento em duas etapas, primeiramente com pasta de diamante 1µm e sílica coloidal na etapa final.

Para quantificar a rugosidade superficial de cada acabamento, utilizou-se um rugosímetro *Taylor Hobson* modelo *Precision*, segundo a norma JIS B0601 (2001).

Os ensaios de dureza foram realizados com auxílio de um durômetro universal Keckert,

na escala HRC - 150Kgf, segundo norma ABNT NBR ISO 6508-1 (2008).

Para os ensaios de desgaste utilizou-se as especificações conforme norma ASTM G99-05 (2010), para o ensaio de desgaste com uso do “Pino e disco”, esquemático é demonstrado na Figura 2.

Figura 2. Descrição do sistema de ensaio “Pino e disco”, conforme a norma ASTM G99-05 (2010).

Os ensaios de desgaste foram realizados em um tribômetro padrão marca CSM tribometer, do Laboratório de Cerâmicos (LACER) da UFRGS, mostrados na Figura 3. Os parâmetros para ensaio utilizados foram: frequência de 100 Hz, velocidade de ensaio 100 rpm e tempo de 1(uma) hora de ensaio.

Figura 3. Tribômetro CSM tribometer.

Para realização do ensaio, deve se observar a temperatura local, a carga utilizada em Newtons (N), a velocidade de ensaio em rotações por minutos (rpm), a distância percorrida no ensaio em milímetros/metros e a atmosfera em que os ensaios foram realizados. Além disso, é importante considerar o uso de lubrificação ou não durante o ensaio. No caso específico do trabalho, os ensaios foram

realizados sem lubrificação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de rugosidade superficial, podem ser observados, conforme a Tabela 2, qual apresenta os valores de Ra para os dois tipos de acabamento ensaiados: polido e retificado.

Tabela 2. Resultados de rugosidade superficial (Ra), valor médio para os três corpos de prova.

Tipo de Aço	Polido	Retificado
S390V	0,099 µm	0,202 µm
Vanadis 4	0,098 µm	0,299 µm
Vancron 40	0,101 µm	0,347 µm
Vanadis 10	0,102 µm	0,288 µm
DIN 1.2767	0,103 µm	0,584 µm

É possível identificar, a partir dos resultados apresentados na Tabela 2, que os valores de Ra para a condição polido encontram-se próximos quando comparados entre si. Já para a condição retificado, os valores possuem diferenças razoáveis entre si, destacando-se DIN 1.2767 com maior Ra entre os materiais. Possivelmente isto está relacionado ao seu processo de fabricação e consequentemente sua microestrutura final.

Os valores de dureza obtidos é de 60 HRC para os aços sinterizados e 58 HRC no aços convencional com tolerância de + 2 HRC, visando atingir faixas de trabalho próximo às condições de projeto de ferramentas para conformação a frio.

A taxa de desgaste será calculada com base na Equação de Rabinovitz (HUCTCHINGS, 1992), descrita na Equação 1.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{(K \cdot PV)}{H} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo $\frac{dW}{dt}$ a taxa de desgaste medida em

$\frac{mm^3}{N \cdot m}$, K é o coeficiente de desgaste, V é a velocidade de ensaio (m/s), t é tempo em segundos, P é a força normal exercida sobre o disco no ensaio (N) e H é a dureza do material

ensaiado (HRC). O coeficiente de desgaste (K), a velocidade de ensaio e o tempo foram controlados com auxílio do *software* Instrum X-versão 4.4 do tribômetro.

Os resultados mostrados nas Tabelas 3 e 4 mostram os valores da taxa de desgaste calculados para os três corpos de prova ensaiados sob as mesmas condições para cada material metálico.

Os valores apresentados na Tabela 3 mostram valores próximos entre si, independente da diferença existe entre composição química e microestrutura.

Em ordem decrescente, o DIN 1.2767 apresentou maior taxa de desgaste quando comparados aos outros tipos de aço. A diferença entre o aço com maior taxa de desgaste e o aço Vanadis 4 (menor taxa de desgaste) é 0,098, valor representa 18% da maior taxa de desgaste. Esta diferença nos valores da taxa de desgaste possivelmente, tem origem em função das diferentes microestruturas de cada material ensaiado.

Para os valores de desvio-padrão encontrados, os valores apresentaram um valor médio de 15% do valor médio encontrado da taxa de desgaste. Esse valor poderia ser reduzido se fossem ensaiados maior número de corpos de prova para cada material metálico.

A Tabela 4 mostra os valores da taxa de desgaste para os corpos de prova com acabamento superficial retificado ensaiados sob a mesma carga de 10N.

Conforme demonstrado na Tabela 4, o DIN 1.2767 apresentou maior taxa de desgaste também com o acabamento retificado quando comparado ao acabamento polido.

O S390V apresentou a menor taxa de desgaste para a condição retificada e força de 10N, o mesmo que aconteceu com a condição superficial polida.

Além disso, a condição retificada apresentou maior diferença entre os materiais com maior e menor taxa de desgaste, 0,237, o que representa aproximadamente 39% do maior valor.

Com isso é possível concluir que para a força de 10N, a condição retificada influência de maneira mais significativa o desgaste do material frente aos esforços aos quais foi submetido.

Para todos os tipos de aço com carga de 10N a taxa de desgaste foi menor para condição retificada do que o acabamento polido.

CONCLUSÕES

Conforme observado experimentalmente, os ensaios realizados com a carga de 10N apresentaram variação dos valores de taxa de desgaste para as diferentes acabamentos superficiais: retificado e polido.

Observou-se que a influência do tipo de acabamento superficial no valor da taxa de desgaste é mais significativa para o acabamento superficial retificado. Provavelmente essa influência ocorre devido aos diferentes valores de Ra medidos na superfície dos corpos de prova retificados.

Os materiais sinterizados apresentaram melhor resistência ao desgaste, no dois acabamentos ensaiados, em relação ao aço ferramenta convencional DIN 1.2767. Esse melhor desempenho ocorre, muito provavelmente em função da microestrutura dos materiais metálicos comparados neste trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se investigar a resistência ao desgaste dos aços ferramenta obtidos por metalurgia do pó e, revestidos com camadas de engenharia, para estudar e compreender os mecanismos de desgaste predominante neste sistema tribológico.

Além disso, mostrou-se interessante correlacionar a rugosidade superficial do material, anterior e posterior a realização dos ensaios, para que assim seja possível relacionar matematicamente a rugosidade superficial (acabamento superficial) com a taxa de desgaste obtida experimentalmente.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Cerâmicas LACER, pelo suporte técnico na execução experimental; Ao Laboratório de Metalurgia Física LAMEF/UFRGS.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G99-05: Standard Test

- Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, Pennsylvania, 2010.
2. ARSLAN, F.K., *et. al*, Characterization of cryogenic heat treated Vanadis 4 PM cold work steel. *Vacuum* N°86. P. 370-373. 2011.
 3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 2768-1 – Tolerâncias Gerais - Parte 1: Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual. Rio de Janeiro, 2001.
 4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 6508-1 – Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Rio de Janeiro, 2008.
 5. BAHRAMIA, A. *et.al*. Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel. *Wear*. N° 258. p. 846–851. 2005.
 6. BOTH, G.B., Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste, para aplicação em ferramentas de conformação à frio. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais PPG3M-Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 2011.
 7. BUDINSKI, K.G. Surface engineering for wear resistance. Prentice Hall 1°ed. 1988. 384 p.
 8. CASELLAS, Daniel. *et.al*. Fracture toughness of carbides in tool steels evaluated by nanoindentation. *Acta Materialia*. N° 55. P. 4277–4286. 2007.
experiments under dry/wet condition. *Materials and design* N°48. P. 2-13 2013.
 9. FONTALVO, G.A. *et.al*. Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels. *Wear* N° 260. P.1028-1034 2005.
 10. STACHOWIAK, G. W. Engineering Tribology. Elsevier Inc. 3°ed. 2005.
 11. HATAMI, Spehr. *et.al*. Galling related surface properties of powder metallurgical tool steels alloyed with and without nitrogen. *Wear* N° 269. P. 229-240 2010.
 12. HUOTCHINGS, I.M. Tribology-Friction and wear of engineering material. 1°Edition, London 1992.
 13. JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. JIS B0601. Surface Roughness. Tokyo : Japanese Standards Association, 2001.
 14. KARLSSON, Patrik. *et.al*. Galling resistance and wear mechanisms for cold-work tool steels in lubricated sliding against high strength stainless steel sheets. *Wear*. P.92-97. 2012.
 15. KENNEDY, David. *et. al*. Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk Materials. *Journal of Materials Processing Technology* N° 77. P.246-253 1998.
 16. MATTAR, Taha. *et.al*. Improving the wear resistance of M41 steel by nitrogen alloying and ESR. *Materials Characterization*. p. 407-415. 2007.
 17. SANNA ALA-Kleme, *et.al*. Abrasive wear properties of tool steel matrix composites in rubber wheel abrasion test and laboratory cone crusher experiments. *Wear*. N° 263. P. 180–187. 2007
 18. SUCHÁNEK, J. KUKLÍK, V. Influence of heat and thermochemical treatment on abrasion resistance of structural and tool steels. *Wear*. N° 267. P. 2100-20108. 2009.
 19. YOUSIF, B.F. Design of newly fabricated tribological machine for wear and frictional Experiments under dry/wet condition. *Materials and design* N°48. P. 2-13. 2013.

Tabela 3. Taxa de desgaste calculados para os corpos de prova ensaiados com carga de 10N e acabamento superficial polido.

Tipo de Aço	CP	Taxa de Desgaste ($\frac{mm^3}{N.m}$)
S390V	CP 1	0,35
	CP 2	0,47
	CP 3	0,39
	Média	0,40
	Desvio-Padrão	0,06
Vanadis 4	CP 1	0,42
	CP 2	0,44
	CP 3	0,40
	Média	0,42
	Desvio-Padrão	0,02
Vancron 40	CP 1	0,54
	CP 2	0,46
	CP 3	0,46
	Média	0,49
	Desvio-Padrão	0,05
Vanadis 10	CP 1	0,44
	CP 2	0,44
	CP 3	0,52
	Média	0,47
	Desvio-Padrão	0,05
DIN 1.2767	CP 1	0,52
	CP 2	0,49
	CP 3	0,54
	Média	0,52
	Desvio-Padrão	0,03

Tabela 4. Taxa de desgaste calculados para os corpos de prova ensaiados com acabamento superficial retificado.

Tipo de Aço	CP	Taxa de Desgaste ($\frac{mm^3}{N.m}$)
S390V	CP 1	0,34
	CP 2	0,35
	CP 3	0,43
	Média	0,37
	Desvio-Padrão	0,05
Vanadis 4	CP 1	0,34
	CP 2	0,39
	CP 3	0,43
	Média	0,39
	Desvio-Padrão	0,05
Vancron 40	CP 1	0,43
	CP 2	0,45
	CP 3	0,47
	Média	0,45
	Desvio-Padrão	0,02
Vanadis 10	CP 1	0,41
	CP 2	0,41
	CP 3	0,39
	Média	0,40
	Desvio-Padrão	0,01
DIN 1.2767	CP 1	0,62
	CP 2	0,63
	CP 3	0,58
	Média	0,61
	Desvio-Padrão	0,03