



RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO E ADESIVO DE AÇOS FERRAMENTA AVALIADA POR MEIO DO ENSAIO PINO-DISCO¹

José Divo Bressan²

Roberto Alexandre Schopf³

Resumo

O presente trabalho investigou a resistência e os mecanismos de desgastes abrasivo e adesivo de aços ferramentas, por meio de ensaios realizados em equipamento automatizado pino-disco cujo pino foram 9 tipos diferentes de aço ferramenta. No ensaio abrasivo, o contra-corpo foi um disco abrasivo de carboneto de silício e, no ensaio adesivo, o disco foi chapa de aço elétrico SAE 1008. Utilizou-se cargas normal de 5 N para o ensaio abrasivo e 29,5 N no ensaio adesivo, e para ambos ensaios a velocidade de deslizamento de 0,45 m/s, distancia total de deslizamento de 3000 m, temperatura e umidade controladas de 25°C e 50% a 60% respectivamente. A taxa de desgaste foi calculada por meio da equação de Archard. Ferramental de corte e conformação de metais utilizados sem lubrificação nestes processos de fabricação falha em decorrência destes dois tipos de desgaste. É comum relacionar a resistência ao desgaste como uma função dependente apenas da dureza dos materiais envolvidos, no entanto, existem outras variáveis que também influenciam no desgaste tais como: a tenacidade a fratura, o tipo de estrutura cristalina e a existência de precipitados duros na matriz metálica, e também a natureza dos mesmos. Por meio do presente estudo, analisaram-se os mecanismos atuantes no desgaste de ferramental e através de ensaios normalizados, e avaliou-se a resistência ao desgaste de nove diferentes aços ferramenta. Um rank de resistência ao desgaste foi feito, comparando-se aços convencionais normalmente utilizados em ferramental como o AISI H13 e AISI A2 em relação a aços fabricados por sinterização como Crucible CPM 3V, CPM 9V e CPM M4. Foram realizadas análises metalográficas da microestrutura do pino e avaliadas as microdurezas Vickers das amostras ensaiadas. Conclui-se com apresentação de uma classificação comparativa dos diferentes aços ferramentas com relação à resistência ao desgaste e ao custo-benefício de cada aço ferramenta. O melhor desempenho de resistência ao desgaste foi o aço CPM 9V e o pior foi o aço AISI H13.

Palavras-chave: Ensaio pino-disco; Aço ferramenta; Resistência ao desgaste; Mecanismos de desgaste.

ABRASIVE AND ADHESIVE WEAR RESISTANCE OF TOOL STEELS EVALUATED BY PIN-ON-DISK TESTING

Abstract

Present work investigated the abrasive and adhesive wear resistances and wear mechanisms of tool steels carried out by automated pin-on-disk equipment which pin were 9 different types of tool steels. In the abrasive testing, the counter-face was a silicon carbide milling disk, however, in the adhesive testing the disk was a SAE 1008 electric steel sheet. Normal load of 5N were used in the abrasive testing and 29,5N in the adhesive testing, and the same other conditions of sliding velocity of 0,45m/s, total sliding distance of 3000m, controlled temperature and humidity of 25 °C and 50 to 60% respectively. The wear rate was calculated by the Archard's equation. Tooling for metal cutting and forming employed without lubrication in these processes fails due to these two types of wear. It is common to relate wear resistance to material hardness only. However, there are other variables that also influence the wear such as: fracture toughness, type of crystalline microstructure and the occurrence of hard precipitate in the metallic matrix and also the nature of them. By the present investigation, the acting wear mechanisms were analyzed and by normalized testing, the wear resistance of nine different tool steel were evaluated. A comparison rank of wear resistance were made among the usual steel obtained by conventional metallurgy such as AISI H13 and AISI A2 in relation to tool steel fabricated by powder metallurgy sintering process such as Crucible CPM 3V, CPM 9V e CPM M4. Metallographic analysis of microstructure of pin and Vickers microhardness were performed in the specimens. It is concluded with the presentation of comparative classification or rank of the different tool steels in relation to the wear resistance and cost-benefice of each tool steels. The best wear resistance performance was the CPM 9V tool steel and the worst was the AISI H13.

Key-words: Pin-on-disc; Tool steel; Wear resistance; Wear mechanisms.

¹ Contribuição técnica ao 10º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 8 a 10 de agosto de 2012, São Paulo, SP.

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

³ Doutorando do Departamento de Engenharia Mecânica – CCT - Udesc Joinville - Campus Universitário. 89.223-100 – Joinville/SC – Brasil. email:roberto_a_schopf@yahoo.com.br



1 INTRODUÇÃO

A definição mais elementar de “desgaste” é a “*perda de material de uma ou de ambas as superfícies de contato quando submetidas ao movimento relativo*”.^(1,2)

Geralmente, o desgaste é medido por meio da perda de material da superfície com a distancia de deslizamento ou tempo. No presente trabalho será enfatizada esta forma de avaliação, devido à natureza do desgaste envolvido no presente estudo sugerir a predominância do mesmo. No entanto, deve-se considerar que o desgaste também pode ocorrer por dano superficial sem que resulte desprendimento de partículas, estas podem simplesmente deformar-se, agrupar-se e continuar presentes na periferia da região danificada.

Stachowiak e Batchelor⁽¹⁾ classificam os diferentes tipos de desgaste em componentes e peças de acordo com os mecanismos que produzem a retirada de material da superfície como a seguir:

- desgaste abrasivo;
- desgaste adesivo;
- desgaste por fadiga;
- desgaste por *fretting* (fadiga de contato);
- desgaste erosivo e por cavitação; e
- desgaste corrosivo e por oxidação.

1.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é definido como a perda de material provocada pela passagem de uma partícula dura sobre uma superfície de material mais mole.^(1,3) Vários fatores devem ser considerados na análise de um sistema tribológico, pois o desgaste ou retirada de material é resultante de uma grande quantidade de variáveis, o que torna seu estudo complexo. De modo geral, a dureza e a microestrutura são dois dos principais fatores que influenciam no desgaste abrasivo.

Conforme Zum Gahr,⁽⁴⁾ com o aumento da dureza, a perda por desgaste pode aumentar em até duas ordens de grandeza. Neste caso, a transição de desgaste brando para severo ocorre quando a dureza da partícula abrasiva passa a ser igual ao do material desgastado, isto ocorre tanto para materiais puros, quanto para os materiais multifásicos.

O desgaste abrasivo pode ser decorrente de um processo mecânico a dois ou a três corpos:

- *Desgaste por rolamento a três corpos*: o desgaste é causado por partículas duras que estão livres para rolar ou deslizar entre duas superfícies;
- *Desgaste por deslizamento a dois corpos*: o desgaste é causado por partículas que estão incrustadas ou rugosidades duras de uma das superfícies que corta e arranca material da outra superfície mais mole.

Em aços ferramentas, contudo, a micro-estrutura destaca-se como fator chave no desgaste resultante. O percentual de carbono de um aço está diretamente ligado à endurecibilidade da liga, o que o torna um elemento determinante na obtenção de estruturas com elevada resistência ao desgaste. Entretanto, para obtenção de excepcionais resultados, se faz necessário a utilização de elementos de liga adicionais que propiciam a formação estruturas ainda mais resistentes, principalmente através da formação de carbeto simples ou complexos.

Zum Gahr⁽⁴⁾ relacionou ainda quatro possíveis tipos de interação entre a partícula abrasiva e o material desgastado: microsulcamento, microcorte, microfadiga e



microtrinca. A seguir, o estudo apresentado contemplará a morfologia dos desgastes abrasivos apresentados nas superfícies dos corpos de prova, buscando identificar estes tipos de interação.

1.2 Desgaste Adesivo

Em função de afinidades químicas, distância e pressão de contato nas superfícies, muitos sólidos tendem a aderir a outros. No entanto, em contatos eventuais em metais, este efeito é suprimido em função, principalmente, da existência de camadas de óxido e outras impurezas como lubrificantes ou água. Estas camadas, muito finas e geralmente imperceptíveis evitam o contato real entre as superfícies metálicas.

Também por isso, o fenômeno da adesão apenas pôde ser observado com maior clareza após o desenvolvimento de sistemas de vácuos que permitem que as superfícies estejam livres destes agentes.⁽¹⁾

Entre as várias formas de combinação, o contato metal-metal é a que apresenta a maior força de adesão, isto pode ser explicado pela maior presença de elétrons livres nestes materiais. Outra característica importante nos pares que influencia na força de adesão é a carga mínima necessária para o escoamento plástico, pois é a partir desta condição que se estabelece um contato real entre os picos das rugosidades das superfícies.

Como a adesão é um fenômeno difícil de se observar, ele é observado principalmente com o auxílio do MEV e sonda EDX que mostram a camada formada aderida na superfície.

Schemmel et al.⁽⁵⁾ citam em seu estudo os resultados que indicam um decrescente efeito do desgaste adesivo com o aumento da quantidade de carbeto na matriz dos aços ferramenta. A presença destes carbeto superduros, além de conferirem uma maior resistência ao desgaste em função da sua elevada dureza, geralmente apresentam menor afinidade química com o metal da contra-face. Desta forma, quando se aumenta a quantidade ou o tamanho dos carbeto, ocorre conseqüentemente uma redução dos espaços entre estes carbeto, reduzindo-se a probabilidade de formação de uma área de contato real entre a matriz, de dureza inferior, e a contra-face e desta forma minimiza a propensão ao desgaste adesivo.

Budinski⁽⁶⁾ encontrou uma boa correlação entre a resistência à abrasão de aços ferramenta e o parâmetro estrutural "A" que é o tamanho do carbeto primário multiplicado pela fração de volume de carbeto e pela dureza do carbeto (Figura 1).

O presente estudo comparativo utilizou nove diferentes aços ferramenta, comerciais e com tratamento térmico apropriado, que são usualmente utilizados na fabricação de moldes e matrizes, mas que também são utilizados em outras aplicações que exigem elevada tenacidade e resistência ao desgaste, sem o emprego de lubrificantes. Dentre os aços estudados, cinco foram obtidos através do processo de sinterização com microestrutura mais homogênea. Os outros quatro tipos de aço foram obtidos por processo metalúrgico convencional.

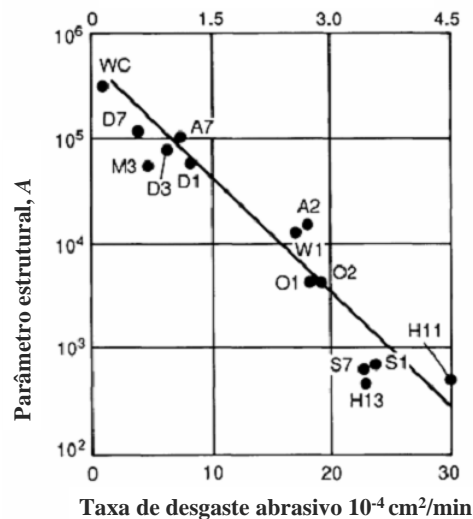


Figura 1. Resistência à abrasão de aços ferramenta em função do parâmetro estrutural.⁽⁶⁾

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Materiais

Os corpos de prova de aços ferramentas selecionados foram usinados, utilizando-se dos mesmos equipamentos de usinagem e retífica, bem como tratados termicamente na mesma empresa, seguindo as recomendações de cada fornecedor. A Tabela 1 apresenta a composição química e o processo de fabricação dos aços considerados no estudo.

Tabela 1. Composição química e processo de fabricação dos aços ferramenta ensaiados

Aço Ferramenta	C (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)	W (%)	Mn (%)	Co (%)	Processo
K190 Microclean	2,30	0,40	12,50	1,10	4,00		0,40		Sinterizado
K360 Isodur	1,25	0,90	8,75	2,70			0,35		C
W360 Isobloc	0,50	0,20	4,50	3,00	0,55		0,25		C
AISI A2	1,00	0,30	5,30	1,10	0,20		0,60		C
AISI H13	0,40	1,00	5,20	1,30	1,05		0,35		C
Sinter 30	1,29		4,20	5,00	3,10	6,30		8,40	Sinterizado
Crucible CPM 3V	0,80		7,50	1,30	2,80				Sinterizado
Crucible CPM 9V	1,90		5,25	1,30	9,10				Sinterizado
Crucible CPM M4	1,42		4,00	5,25	4,00	5,50	0,30		Sinterizado

C: metalurgia convencional.

Todos os aços foram tratados termicamente na empresa Brasimet. As temperaturas e tempos de austenitização e revenimento foram determinados utilizando-se curvas de referência informadas pelos fabricantes, de modo a maximizar a dureza e a tenacidade das amostras. Os parâmetros da têmpera e revenimentos de cada aço ferramenta estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros de tratamento térmico dos aços ferramenta

Aço	Temperatura de Austenitização (°C)	Resfriamento	Temperatura de Revenimento (°C)	Tempo de Revenimento (h)	Ciclos de revenimento
K190 Microclean	1050	Pressão de N2 - 3,5bar	500	2	3X
K360 Isodur	1050	Pressão de N2 - 3,5bar	500	2	2X
W360 Isobloc	1050	Pressão de N2 - 3,5bar	540	2	3X
AISI A2	960	Pressão de N2 - 3,5bar	300	2	2X
AISI H13	1030	Pressão de N2 - 3,5bar	540	2	2X
Sinter 30	1180	Pressão de N2 - 3,5bar	540	2	3X
CPM 3V	1060	Pressão de N2 - 3,5bar	520	2	3X
CPM 9V	1180	Pressão de N2 - 3,5bar	560	2	3X

2.2 Procedimento Experimental

2.2.1 Ensaio de dureza

As amostras tiveram suas durezas medidas por meio do ensaio de microdureza Vickers em durômetros com cargas de 1000g. As microdurezas foram medidas diretamente no pino fabricado para ensaio pino-disco abrasivo e no pino do ensaio pino-disco adesivo. Enquanto que o disco de chapa de aço elétrico no ensaio pino-disco adesivo foi medido a microdureza Vickers com carga de 300g.

2.2.2 Análise metalográfica

Foram realizadas análises metalográficas em microscópio óptico nos corpos de prova dos aços ferramenta a fim de caracterizar suas microestruturas. As amostras foram atacadas com reagente nital 5%.

2.2.3 Ensaio de Resistência ao Desgaste

- **Pino-disco abrasivo:**

O ensaio de resistência ao desgaste abrasivo foi realizado num equipamento pino-disco com carga de 5 N, velocidade de deslizamento constante de 0,455 m/s, distancia total de 3000 m, seguindo o padrão estabelecido na norma ASTM G99-95,⁽⁷⁾ sob condição de atmosfera normal de 20°C e umidade relativa entre 54-60%. A cada 300 m foi realizada a medição do coeficiente de atrito e perda de massa no pino com uma balança analítica cuja precisão era de 0,1 mg.

Adotou-se no ensaio um pino com extremidade plana e circular conforme apresentado na Figura 2, aumentando assim a área de contato com o disco que correspondia a 12,57 mm². Esta condição foi escolhida para permitir a reutilização do mesmo pino em testes confirmatórios ou em outras condições. Para evitar vibração do pino durante o ensaio, o pino foi fixo no equipamento através de uma camisa que possuía um batente interno e permitia a regulagem do comprimento do pino fora da camisa. Foram ensaiadas três amostras de cada material.

Rebolos de carbeto de silício, 39C100K, da Norton de mesmo lote de fabricação, foram utilizados como contra-face (disco). Esta especificação de rebolo foi escolhida por apresentar alta resistência ao desgaste e elevada capacidade de penetração.

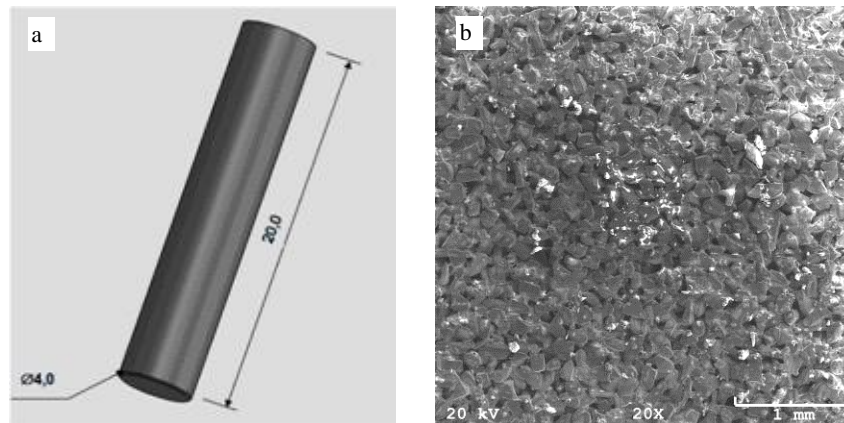


Figura 2. a) Geometria do pino e dimensões em mm do ensaio abrasivo pino-disco; b) superfície do disco de carbeto de silício, SiC.

- **Pino-disco adesivo:**

Para realização do ensaio de desgaste adesivo foi utilizado o mesmo equipamento pino-disco do teste abrasivo: mesma velocidade de deslizamento de 0,455 m/s, mesmo intervalo de medições a cada 300 m e distância total de 3.000 m. A cada 300 m foi realizada a medição do coeficiente de atrito, da perda de massa no pino e no disco. Foi registrada em cada medição, a variação do diâmetro da marca de desgaste no pino através de um estereoscópio dotado de escala microsimal. A perda de massa no pino foi medida através de uma balança analítica de precisão 0,1 mg KERNABS. A perda de volume foi calculada dividindo-se a perda de massa medida pela densidade de cada respectivo aço.

Para este teste utilizou-se um pino com ponta arredondada de raio 10 mm conforme mostrado na Figura 3. A carga normal aplicada foi de 29,5 N. Para contraface, ou disco, adotou-se chapa de aço para fins elétricos E230, fornecido pela Arcelor Mittal, fixado sobre uma base de outro disco rígido de alumínio.

Todos os discos foram fabricados de uma mesma chapa de espessura 0,50 mm e apresentavam rugosidades entre 0,2 μm e 0,4 μm . As amostras foram tratadas termicamente na mesma batelada em um forno contínuo. Este tratamento é realizado para fins de aumento das propriedades eletromagnéticas do aço.



Figura 3. Geometria do pino e disco do ensaio adesivo pino-disco.



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Metalografia

As microestruturas dos aços estudados são apresentadas na Fig. 4 abaixo. Pode-se observar que todos os aços ferramenta apresentam uma grande quantidade de carbeto finos dispersos na matriz metálica. Os aços obtidos por metalurgia convencional W360, AISI A2 e AISI H13 apresentam carbeto primários pequenos e grandes, indicando uma previsão de uma maior taxa de desgaste em relação aos outros aços ferramentas sinterizados, conforme visto acima na Figura 1.⁽⁶⁾

3.2 Dureza

A Tabela 3 apresenta os respectivos valores médios de dureza dos pinos de aços ferramenta ensaiados: 5 repetições dos ensaios de microdureza para cada aço. A dureza média medida nos discos de aço elétrico foi de 187 mHV.

Tabela 3. Microdureza Vickers, carga de 1000 g, dos aços ferramenta investigados

Aço	Microdureza (mHV) 1000 g	
	Pino abrasivo	Pino adesivo
K190 Microclean	814	775
K360 Isodur	765	732
W360 Isobloc	809	675
AISI A2	821	693
AISI H13	687	664
Sinter 30	1091	925
Crucible CPM 3V	723	725
Crucible CPM 9V	727	684
Crucible CPM M4	881	982

3.3 Ensaio Pino-Disco e Resistência ao Desgaste

A taxa de desgaste Q dos aços ferramentas ensaiados foram calculadas, utilizando-se a equação 1 de Archard do desgaste. A equação fenomenológica de Archard^(8,9) geralmente é utilizada na análise dos resultados experimentais do ensaio de desgaste de laboratório e avalia o coeficiente de desgaste K por meio da razão de desgaste calculada experimentalmente,

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

onde K é o *coeficiente de desgaste*: é adimensional e menor que 1. Q é o parâmetro que mede a razão de desgaste ou “taxa de desgaste” (Q = 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 (Kg/mm^2). Em geral, a **resistência ao desgaste** é definida como sendo $1/Q$. Alguns autores empregam esta equação para calcular o *coeficiente específico de desgaste* K_s ,

$$K_s (\text{mm}^3/\text{mN}) = \frac{K}{H} = \frac{Q}{F_N} \quad (2)$$

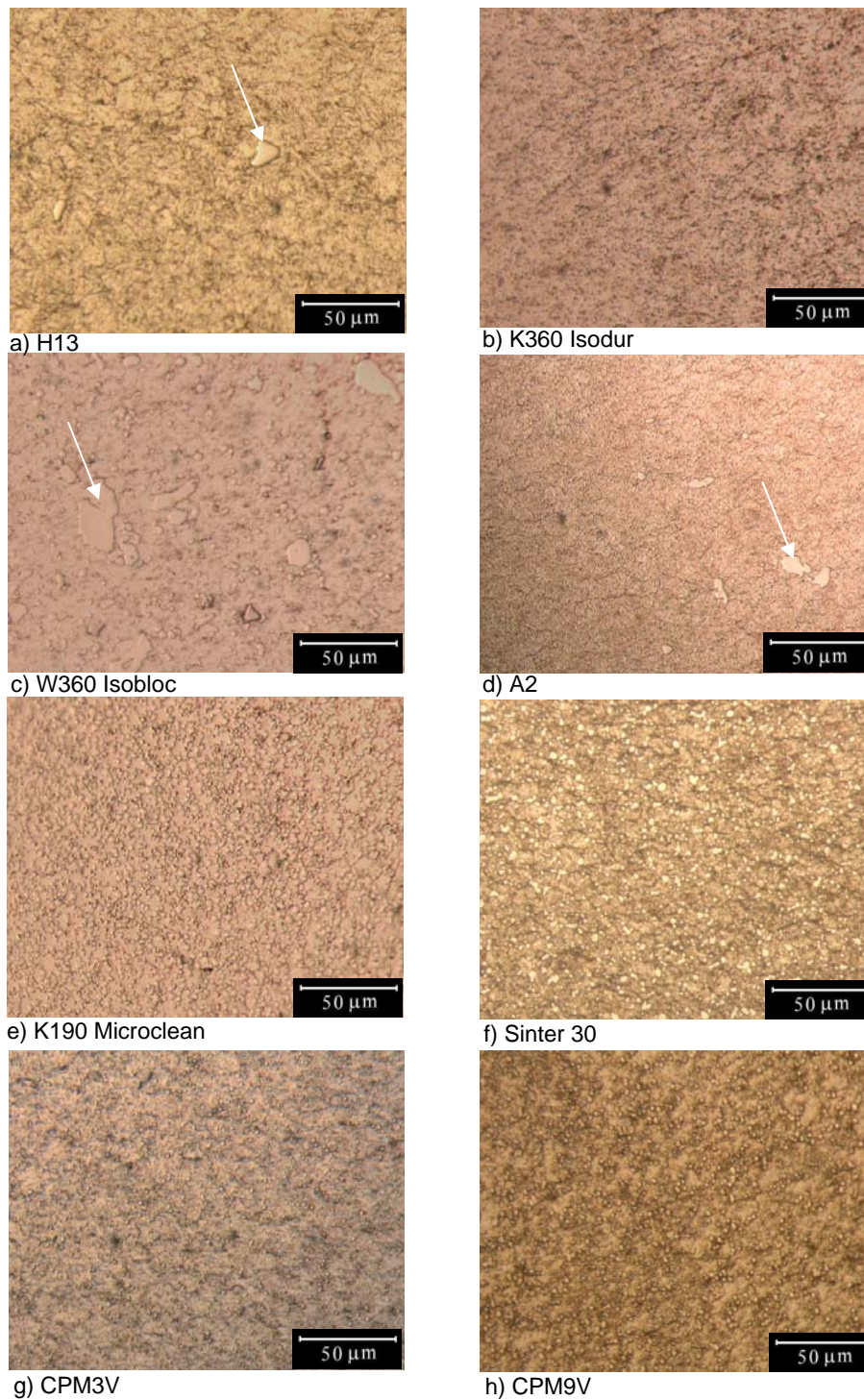


Figura 4. Micrografias dos aços ferramenta ensaiados. Aumento de 500x. Ataque nital 5%.

Os resultados dos ensaios de desgaste pino-disco foram traçados num gráfico, indicando a perda de volume acumulado de cada aço, média de três amostras, em função da distância percorrida no deslizamento do pino contra o disco.

A Figura 5 apresenta as curvas médias das medições de três amostras realizadas de cada aço. Todos os aços apresentaram uma taxa de desgaste mais



acentuada nos primeiros 600m ou *primeiro estágio* do desgaste ou “*estágio de rodagem inicial*”. Atribui-se a esse comportamento transitório o fato da maior pressão

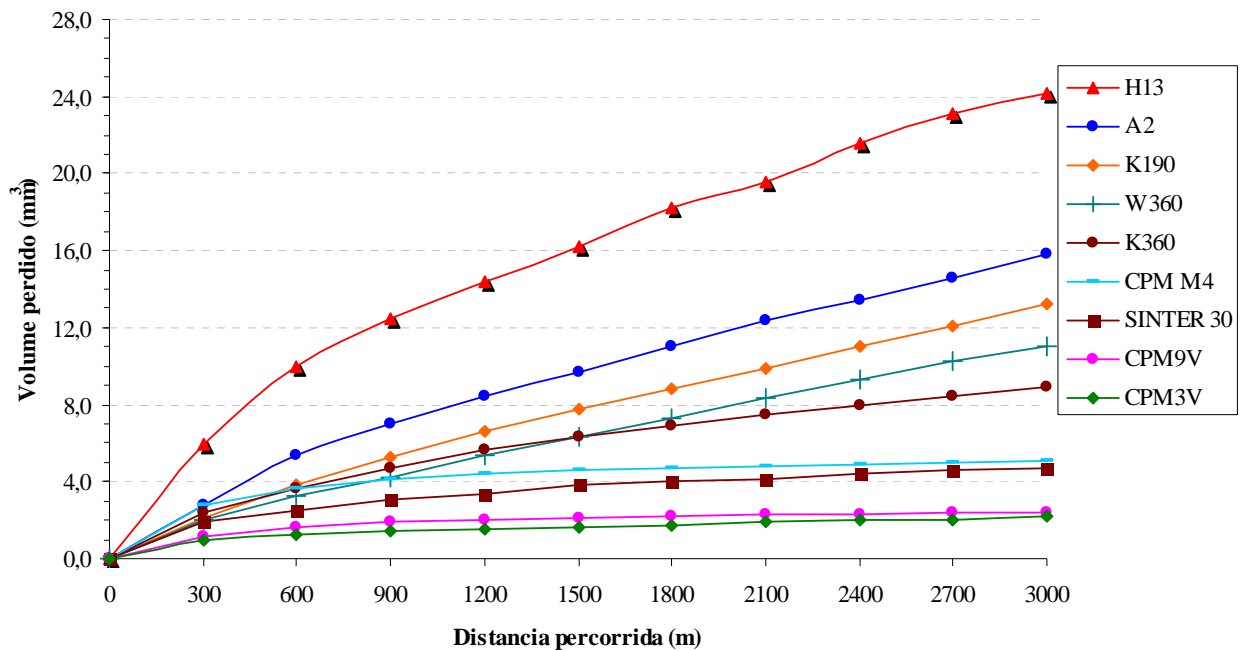


Figura 5. Resultados do ensaio abrasivo pino-disco: volume perdido acumulado em função da distância de deslizamento percorrida. Carga normal de 5 N.

na área real de contato entre as partículas duras de carbeto de silício e a superfície do pino de aço. Também devido estarem as arestas dos grãos de carbeto de silício do disco mais agudas no estágio transitório inicial do ensaio, conforme pode se observar na Fig. 2. No *segundo estágio de regime permanente* da perda de volume do pino, a curva é aproximadamente linear com a taxa de desgaste constante. Portanto, o padrão de comportamento da curva do desgaste abrasivo pino-disco com o emprego de disco abrasivo de carbeto de silício é semelhante as curvas de desgaste por deslizamento de pino de aço ferramenta contra chapa de aço verificado por Bressan e Hesse⁽¹⁰⁾ experimentalmente em outros trabalhos de pesquisa.

Os resultados do presente trabalho de investigação revelam a existência de dois grupos distintos de aços ferramenta quanto ao comportamento da taxa de desgaste abrasivo Q: os aços ferramentas convencionais e os aços sinterizados. Os aços convencionais são o AISI A2, AISI H13, Bohler W360, Bohler K360 e os aços sinterizados por metalurgia do pó são o Crucible CPM 3V, CPM 9V, CPM M4, Bohler K190 e Sinter 30. De modo geral, com exceção de K190, os aços sinterizados apresentaram uma maior resistência ao desgaste (1/Q) como visto na Figura 8. A maior taxa de desgaste foi do aço H13, $Q = 5,21 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$, e a menor taxa de desgaste foi do aço CPM 9V, $Q = 2,15 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$, ou seja, 20 vezes menor que o aço H13.

Os valores calculados da taxa de desgaste e microdureza de cada aço estão mostrados na Figura 6. Apesar da grande variação na taxa de desgaste, a microdureza superficial dos pinos é aproximadamente constante em torno da média 850 mHV. Portanto, o coeficiente de desgaste K não é uma constante dos aços ferramenta.



A Figura 7 apresenta em ordem decrescente a taxa de desgaste adesivo dos pinos de aço ferramenta contra disco de aço elétrico. Mostra também que a microdureza Vickers dos pinos aumenta. Os resultados revelam também dois grupos distintos de resistência ao desgaste: os aços sinterizados e os aços convencionais.

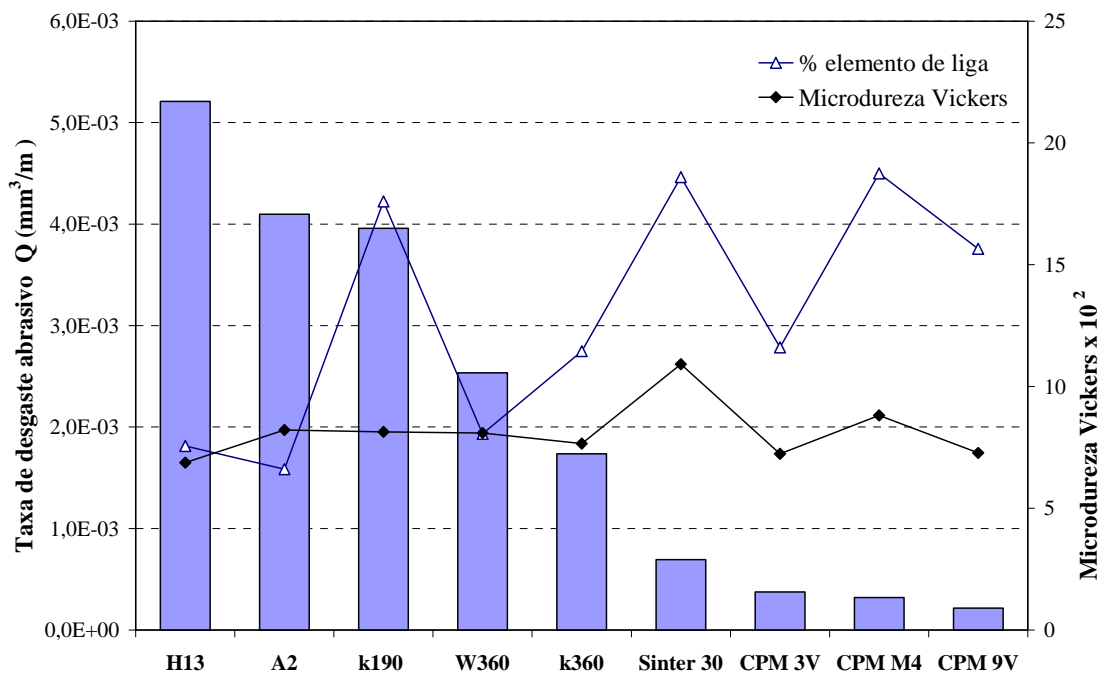


Figura 6. Taxa de desgaste abrasivo do pino no ensaio pino-disco abrasivo, microdureza Vickers e porcentagem de elemento de liga (Cr+Mo+W+V) em função do tipo de aço ferramenta.

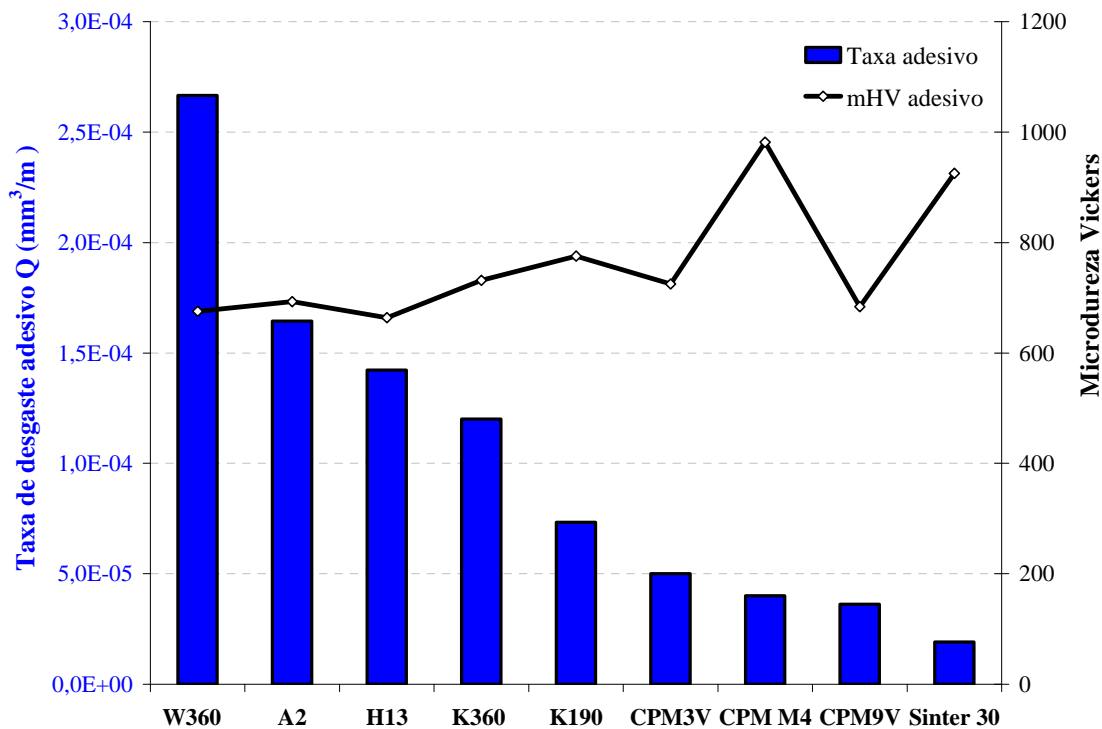


Figura 7. Taxa de desgaste adesivo e microdureza Vickers do pino no ensaio pino-disco em função do tipo de aço ferramenta. Carga normal de 29,5 N.

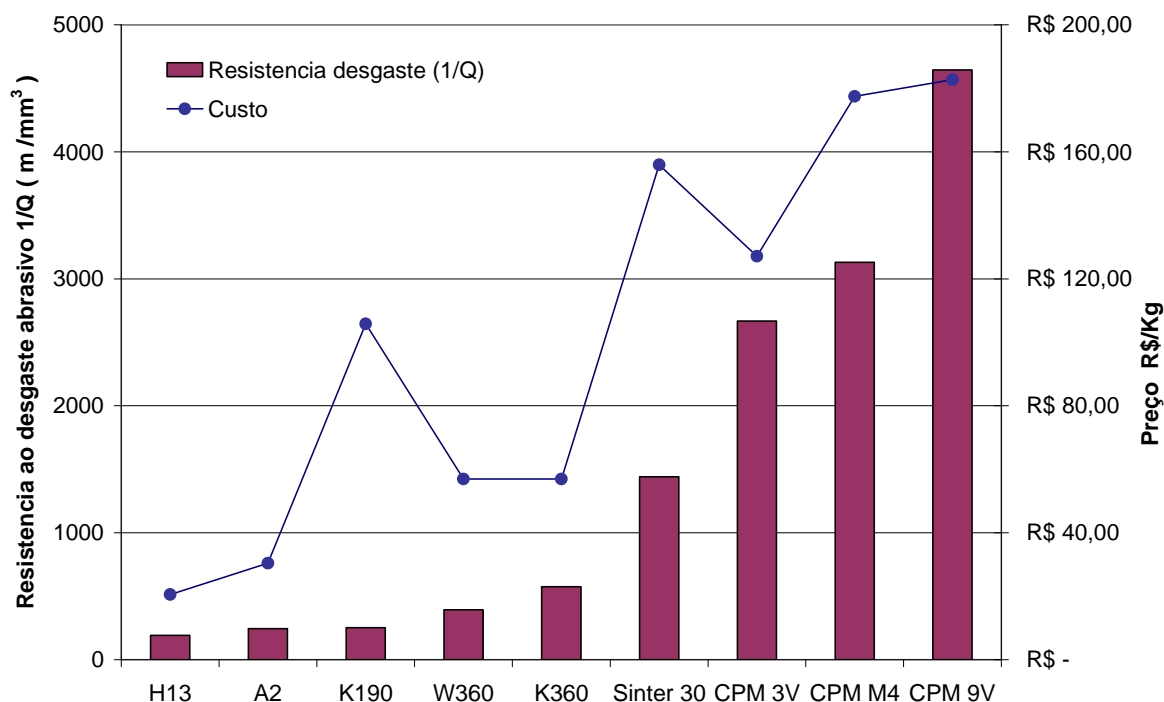


Figura 8. Rank de resistência ao desgaste abrasivo e custo dos aços ferramenta ensaiados.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais dos aços ferramentas ensaiados em equipamento pino-disco do presente trabalho, as seguintes conclusões podem ser ditas sobre a resistência ao desgaste por abrasão e adesão:

- o ensaio de desgaste pino-disco abrasivo com disco ou rebolo de carbetos de silício apresentou uma relação linear da taxa de desgaste Q com a distância de deslizamento S no segundo estágio do processo de desgaste;
- revelou-se a existência de 2 grupos distintos de aços quanto a taxa de desgaste Q : os aços ferramentas convencionais e os aços sinterizados. De modo geral, os aços sinterizados apresentaram maior desempenho ou maior resistência ao desgaste ($1/Q$) que os aços convencionais;
- o melhor aço foi o CPM 9V com resistência ao desgaste abrasivo de 4645;
- o pior aço foi o AISI H13, $Q = 5,21 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{m}$, resultando na menor resistência ao desgaste abrasivo de 192: resistência 20 vezes menor que o aço CPM 9V;
- o melhor aço com a maior resistência ao desgaste adesivo foi o Sinter 30;
- o coeficiente de desgaste K da Equação de Archard não é uma constante do aço ferramenta e depende do material, ou seja, de outros parâmetros do material. Outros parâmetros importantes da microestrutura do material são o tamanho e a dureza do carbetos primário na matriz do aço e a fração de volume de carbetos na matriz metálica. Carbetos finos aumentam a resistência ao desgaste; e
- em geral, o custo do aço ferramenta aumenta com a resistência ao desgaste.



Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq na forma de auxílio de bolsa de pesquisa, a Universidade do Estado de Santa Catarina-Udesc e a Embraco pelo fornecimento das amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 Stachowiak, G.W. e Batchelor, A.W., 2005, "Engineering Tribology", Butterworth Heinemann, 3rd edition, pp. 447- 616.
- 2 Mate, C. M., 2008, "Tribology in Small Scale – A Bottom Up Approach to Friction, Lubrication and Wear", Oxford University, Vol. 1, p. 313-329.
- 3 Williams, J.A., 1997, "The laboratory simulation of abrasive wear". Tribotest Journal, Vol. 3-3, pp. 267-306.
- 4 Zum Gahr, K-H., 1998, "Wear by hard particles", Tribology International, Vol.31, n.10, pp. 587–596.
- 5 Schemmel, I.; Fontalvo, G.A.; Humer, R.; Mitter, C. ; Sammt, K., 2006, "Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels". Wear, Vol.260, pp. 1028-1034.
- 6 Budinski, K.G., 1996, ASM Handbook "Friction, Lubrication and Wear Technology", Vol.18, Ed. ASM, pp.1499-1513.
- 7 ASTM, Designation: G99-95; 1995, "Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus", pp.336-390.
- 8 Hutchings, I.M., 1995, Tribology: Friction and wear of engineering materials. Arnold.
- 9 Archard, J.F., 1953, "Contact and rubbing of flat surfaces ", J. Appl. Phys., Vol. 24, pp. 981– 988.
- 10 Bressan, J.D. e Hesse, R., 2001, "Construction and validation tests of a pin-on-disc equipment". In:XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM 2001, dezembro/2001.