

SELEÇÃO DE AÇOS FERRAMENTA CONFORME A RESISTÊNCIA AO DESGASTE ATRAVÉS DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS

Vinicius de Freitas Paz¹
Daniel Antonio Kapper Fabricio²
Lisiane Trevisan³
Afonso Reguly⁴

Resumo

A escolha de materiais metálicos dentro distintas opções disponíveis no mercado internacional torna-se um desafio para o trabalho do engenheiro. Escolher materiais que possam agregar resistência mecânica, propriedades físico-químicas aliadas a baixo custo torna-se um grande esforço das indústrias metalúrgicas. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de variância (ANOVA) em aços ferramenta tratados termicamente quando comparado a resistência ao desgaste de cada um destes. Para tanto, foram selecionados cinco aços ferramenta: quatro materiais produzidos por metalurgia do pó e um convencional, os quais foram tratados termicamente, temperados e revenidos a vácuo. A resistência ao desgaste foi determinada pelo método “Pino e disco” segundo a norma ASTM G99-05. Os materiais foram ensaiados com dois tipos de acabamento: retificado e polido, condições utilizadas pela indústria metalúrgica. Com base nos resultados tribológicos, aplicou-se o método de análise de variância (ANOVA) e a técnica de comparação múltipla de médias (CMM), os quais permitiram avaliar a significância e interações dos resultados de desgaste entre os materiais ensaiados. Com base nisso, os resultados mostraram a melhor resposta da variável *W* (parâmetro de desgaste), a importância da variável “aço”, bem como a não influência do acabamento ensaiado entre os materiais. Com isso, foram criados grupos de materiais que possuem comportamento semelhantes estatisticamente, permitindo a escolha do aço com menor custo.

Palavras-chave: Aços ferramenta; Metalurgia do pó; Tratamento térmico; ANOVA; Comparação múltipla de médias.

SELECTION OF STEELS ACCORDING TO WEAR RESISTANCE THROUGH THE MULTIPLE COMPARISON OF THE AVERAGE

Abstract

The selection of metallic materials between different options available in the international market is a challenge for the engineer's work. Choosing materials that combine mechanical resistance and physicochemical properties allied to low cost becomes a great effort to metallurgical industries. Thus, this work aims to perform an analysis of variance (ANOVA) on thermally treated tool steels for the wear resistance response variable. For this, five tool steels were selected: four materials produced by powder metallurgy and a conventional steel, which were heat treated and vacuum tempered. Wear resistance was determined by the “Pin and disc” method according to ASTM G99-05 standard. The materials were tested with two types of finish: rectified and polished, conditions commonly used by the metallurgical industry. Based on the tribological results, the ANOVA and multiple comparison test (MCT) methods were used, which allowed to evaluate the significance and interactions of the wear results among the tested materials. The results presented the best response of the variable *W* (wear parameter), the importance of the variable “steel”, as well as the non-influence of the finish between the tested materials. Finally, the materials could be grouped according to similarity in statistical behavior, allowing the selection of steel with the lowest cost.

Keywords: Tool steels; Powder metallurgy; Heat treatment; ANOVA; Multiple comparison test.

¹Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: vinyapaz@gmail.com

²Curso de Engenharia de Produção, Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Chapecó, SC, Brasil.

³Curso de Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Instituto Feral do Rio Grande do Sul – IFRS, Farroupilha, RS, Brasil.

⁴Departamento de Metalurgia – DEMET, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.



I INTRODUÇÃO

Os aços ferramenta em geral, são usados em aplicações para dar forma a outros materiais em processos como matrizes de conformação mecânica, estampagem, forjamento, injeção de ligas metálicas ou até polímeros, usados em operações de conformação de aços ou materiais com dureza inferior ao material da ferramenta [1]. São projetados para terem elevada dureza e durabilidade submetidos a condições severas de serviço, normalmente situações que requerem resistência ao desgaste e elevada tenacidade nas aplicações [2].

Os aços ferramenta produzidos por metalurgia do Pó, ou seja, sinterizados, reproduzem microestruturas com carbonetos de tamanho uniforme, distribuídos na matriz estrutural do material sem formação de bandejamento de carbonetos e minimizando ao máximo os efeitos de anisotropia, bem como otimizando as propriedades mecânicas como resistência ao desgaste, tenacidade e dureza final do aço [3].

Num contexto atual de tecnologia, o uso de aços ferramenta obtidos por metalurgia do pó tratados termicamente a vácuo, permite controles precisos de aquecimento até a austenitização e da etapa de resfriamento dos aços, tendo como resultado final menores distorções nas peças, obtendo-se materiais temperados na máxima dureza e com menores deformações dimensionais após o tratamento térmico de tempera e revenimento [4].

Com base nisso, o principal objetivo desse trabalho será realizar a análise de variância (ANOVA) e a comparação múltipla de médias (CMM) a partir dos resultados de resistência ao desgaste, obtidos de aços ferramenta produzidos por metalurgia do pó e convencional tratados termicamente a vácuo. Neste estudo foram usados aços ferramentas S390V, Vanadis® 10, Vanadis® 4 e Vancron® 40 obtidos pela tecnologia da metalurgia do pó e usados em matrizes de estampagem a frio de aços inoxidáveis ferríticos e não temperáveis, comparando-os com o aço e Cryodur® 1.2767 produzido por rota convencional.

1.1 Desgaste

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 [5-6].

Desgaste pode ser definido como remoção de material de uma superfície sólida podendo ocasionar falhas um componente mecânico. O regime dos mecanismos e taxa de desgaste dependem extensivamente da composição química, microestrutura, das cargas de carregamento e das propriedades de superfície do material em análise [7]. Outro conceito define desgaste como dano sobre uma superfície sólida, com remoção de material de uma superfície ou de duas superfícies sólidas em contato, qual pode ser causado pela remoção ou alteração do material pela ação mecânica de um sólido, líquido ou gás em contato com as superfícies envolvidas, operações de rolamento entre

superfícies ou movimento relativo com impacto sobre as mesmas [6-8].

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 [9].

Kennedy et al. [10] citam 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.

A importância de um tratamento térmico bem executado é a possibilidade de obter uma combinação de ótimas propriedades de trabalho para uma ferramenta como dureza, resistência ao desgaste e tenacidade. Essa combinação ideal depende de alguns fatores como temperatura de austenitização, taxas de resfriamento e revenimento adequados no tratamento térmico e formação de fases frágeis [11].

1.2 ANOVA e Comparação Múltipla de Médias

A análise de variância (ANOVA) é uma metodologia estatística que permite avaliar a significância de diversos fatores e interações. A ANOVA compara as variâncias entre os valores médios de uma variável a diferentes níveis de um fator com a variância dentro do mesmo nível, resultando em uma razão de variâncias ($F_{\text{calculado}}$). Em seguida, comparam-se os valores calculados de F com os valores tabelados da distribuição estatística F (F_{tabelado}), utilizando-se um nível de significância específico [12].

No teste da ANOVA, os ensaios realizados em cada nível do fator controlável configuram um grupo. O objetivo é identificar se os valores da variável de resposta medidos nos diversos níveis do fator controlável (grupos) diferem entre si em relação ao erro aleatório [12]. Se os valores $F_{\text{calculado}}$ forem maiores que os valores críticos F_{tabelado} , então a variabilidade provocada pelo termo correspondente é significativa frente ao erro residual. Essa análise pode ser realizada através do parâmetro estatístico P, ou seja, o nível de significância. Quando o valor-P calculado é inferior ao nível de significância desejado (usualmente, 5%), considera-se que o fator controlável em análise possui efeito significativo em relação ao erro residual.

Caso algum fator e/ou interação resulte significativo na variável de resposta pelo método da ANOVA, pode-se realizar uma comparação múltipla de médias (CMM) a fim de identificar quais dos níveis diferem entre si.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de fabricação por metalurgia do pó propicia aços ferramenta de maior resistência ao desgaste, tenacidade e homogeneidade, em função de seu processo

de solidificação a altas taxas de extração de calor suprimir a segregação na solidificação, o que normalmente ocorre no processo convencional de solidificação de aços não-sinterizados. Os aços ferramenta utilizados para a etapa experimental são: os aços Cryodur® 2767 do fabricante Schmolz+Bickenbach (rota convencional), os aços Vanadis® 10, Vanadis® 4, aço BÖHLER S390 e Vancron® 40 do fabricante Böhler-Uddeholm (metalurgia do pó).

Foram confeccionados corpos de prova com diâmetro de 30 mm e altura de 6 mm para a etapa de tratamento térmico sob vácuo e realização dos ensaios de desgaste com tolerâncias conforme especificado pela norma NBR ISO 2768-1: 2001, 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. 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 [13]. Os ensaios de dureza foram realizados medições com uso de escala Rockwell [14].

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 e resfriamento máximo de 10 Bar absolutos.

Os ciclos de austenitização e resfriamento foram realizados sob vácuo no interior do forno, obedecendo as faixas de austenitização dos fabricantes, como mostra a Tabela 1 [15-16].

Após o tempo adequado para austenitização de cada aço, realizou-se a etapa de resfriamento com nitrogênio gasoso, sob pressão de 5 Bar absolutos.

Os ensaios de desgaste dos materiais após tratamento térmico foram realizados conforme a norma ASTM G99-05 (2010) para ensaio “Pino e disco”, em tribômetro padrão CSM Instruments, utilizando os parâmetros destacados na Tabela 2.

A equação de trabalho para mensurar o parâmetro de desgaste W utiliza a relação de força sobre o volume desgastado (V) multiplicado pela distância percorrida (m) no ensaio, conforme a Equação 1.

$$W = \frac{V}{F_n \times l} \quad (1)$$

Sendo V o volume desgastado, F_n a força de ensaio [N] e l é a distância percorrida no ensaio [m]. O resultado de W é medido em mm³/N*m. Segundo a literatura, também é possível estimar a taxa de desgaste (dW/dt) através da

equação de desgaste de Rabinovicz (Equação 2), considerando o coeficiente de desgaste K e velocidade de ensaio (V) para um tempo de ensaio (t), força normal exercida sobre o disco (P) e dureza do material (H) [1].

$$\frac{dW}{dt} = \frac{KPV}{H} \quad (2)$$

Após a realização dos ensaios de desgaste, procedeu-se a um projeto fatorial completo de dois fatores através da metodologia de análise de variância (ANOVA) para os valores obtidos. A ANOVA foi realizada considerando como variável de resposta o volume desgastado.

Essa análise foi realizada utilizando-se o software Excel® e o software estatístico Minitab®. A ANOVA foi realizada para os fatores ‘Aço’, ‘Acabamento’ e para a interação entre os fatores (Aço × Acabamento). Os níveis dos fatores foram os seguintes:

- Aço: BÖHLER S390V, Vanadis® 10; Vanadis® 4; Vancron® 40; Cryodur® 1.2767;
- Acabamento: Polido, Retificado.

Para cada combinação de fatores, foram realizadas três repetições (ou seja, três corpos de prova para cada condição), totalizando N = 30 experimentos (5 aços × 2 acabamentos × 3 repetições). A repetição foi utilizada para compor o termo do erro na análise de variância.

A variável de resposta do experimento foi o desgaste (W) do material, conforme a Equação 1, uma variável do tipo menor-é-melhor. A ANOVA foi realizada a um nível de confiança de 95%, ou seja, utilizando-se um nível de significância de 5%. Após a Análise de Variância, procedeu-se à comparação múltipla de médias (CMM) para os fatores e interações significativos.

Tabela 1. Temperaturas de austenitização utilizadas no experimental

Tipo de aço	Temperatura de austenitização experimental	Faixa recomendada
BOHLER S390	1150 °C	1150 - 1230 °C
Vanadis® 4 extra	1100 °C	940 - 1150 °C
Vancron® 40	1100 °C	950 - 1150 °C
Vanadis® 10	1100 °C	1020 - 1100 °C
Cryodur® 1.2767	840 - 870 °C	840 - 870 °C

Fonte: adaptado de [15,16].

Tabela 2. Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste “Pino e disco”

Parâmetro	Valor
Distância percorrida	389,495 m
Força	20 N
Velocidade linear	0,11 m/s
Tempo de ensaio	60 minutos

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados de volume desgastado e os parâmetros de desgaste como força de ensaio e distância percorrida, pode-se estimar os valores de desgaste (W) para todos os materiais ensaiados, conforme Tabela 3, para os acabamentos ensaiados.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de dois fatores, a partir dos dados da Tabela 3, a um nível de

Tabela 3. Resultados obtidos de volume desgastado para os aços estudados

Material	Acabamento	Corpo de Prova	Desgaste (mm ³ /N.m)
BÖHLER S390	Polido	1	1,2437E-05
BÖHLER S390	Polido	2	1,5045E-05
BÖHLER S390	Polido	3	1,4274E-05
BÖHLER S390	Retificado	1	1,09009E-05
BÖHLER S390	Retificado	2	2,39534E-05
BÖHLER S390	Retificado	3	8,49999E-07
Vanadis® 4	Polido	1	2,15737E-05
Vanadis® 4	Polido	2	2,17836E-05
Vanadis® 4	Polido	3	2,29279E-05
Vanadis® 4	Retificado	1	1,31161E-05
Vanadis® 4	Retificado	2	1,2325E-05
Vanadis® 4	Retificado	3	1,69452E-05
Vancron® 40	Polido	1	1,67236E-05
Vancron® 40	Polido	2	2,05078E-05
Vancron® 40	Polido	3	1,3155E-05
Vancron® 40	Retificado	1	1,40528E-05
Vancron® 40	Retificado	2	2,24789E-05
Vancron® 40	Retificado	3	1,80516E-05
Vanadis® 10	Polido	1	2,10838E-05
Vanadis® 10	Polido	2	1,13583E-05
Vanadis® 10	Polido	3	1,92925E-05
Vanadis® 10	Retificado	1	2,4299E-05
Vanadis® 10	Retificado	2	3,17735E-05
Vanadis® 10	Retificado	3	2,95486E-05
Cryodur® I.2767	Polido	1	2,75875E-05
Cryodur® I.2767	Polido	2	3,0149E-05
Cryodur® I.2767	Polido	3	2,60098E-05
Cryodur® I.2767	Retificado	1	2,55595E-05
Cryodur® I.2767	Retificado	2	2,54796E-05
Cryodur® I.2767	Retificado	3	2,37394E-05

Tabela 4. Análise de Variância de dois fatores

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma Quadrada	Média Quadrada	Fcalculado	P	Ftabelado	Significativo?
Aço	4	$6,5256 \times 10^{-10}$	$1,6314 \times 10^{-10}$	7,39	0,001	2,87	Sim ($P < 0,05$)
Acabamento	1	$0,0002 \times 10^{-10}$	$0,0002 \times 10^{-10}$	0,00	0,974	4,35	Não ($P > 0,05$)
Aço × Acabamento	4	$3,0899 \times 10^{-10}$	$0,7725 \times 10^{-10}$	3,50	0,025	2,87	Sim ($P < 0,05$)
Erro	20	$4,4171 \times 10^{-10}$	$0,2209 \times 10^{-10}$				
Total	29	$14,0328 \times 10^{-10}$					

confiança de 95% (nível de significância de 5%), utilizando o *software* Minitab®. A variável de resposta considerada foi o volume desgastado. Os fatores principais considerados foram o acabamento e o aço. Também foi considerada a interação acabamento × aço. A Tabela 4 apresenta o resultado da ANOVA.

Pelo resultado do teste (Tabela 4), conclui-se que o fator Aço, ou seja, o material utilizado, é significativo frente ao erro residual, assim como a interação Aço * Acabamento.

O acabamento, como fator principal, resultou não significativo frente ao erro residual a um nível de confiança de 95% (nível de significância de 5%). Dessa forma, procedeu-se à plotagem do gráfico de fatores principais e do gráfico de interação, apresentado na Figura 1.

Nos casos em que a interação é significativa, recomenda-se realizar a comparação múltipla de médias (CMM) para a interação, ainda que um ou mais fatores principais também tenham resultado significativos.

Nesse trabalho, como a interação aço × acabamento resultou significativa, procedeu-se a uma CMM para a interação. Essa análise é um complemento à ANOVA. O teste ANOVA, por si só, conclui que a interação aço × acabamento é significativa, mas não identifica em quais níveis (ou seja, entre quais materiais) está ocorrendo essa diferença. Assim, a CMM tem objetivo de identificar para quais níveis dos fatores em análise (nesse caso, para quais tipos de aço) a diferença é significativa e para quais casos não é significativa, podendo-se realizar um agrupamento.

Para realizar a comparação múltipla de médias, inicialmente, bloqueia-se um dos parâmetros (nesse caso, será bloqueado o acabamento) e comparam-se, uma a uma, as médias de cada nível, no caso, de cada material. As médias são ordenadas em ordem crescente, e a diferença entre cada uma delas é comparada a um limite de decisão, calculado conforme a Equação 3 [12].

$$L_d = 3S_y = 3\sqrt{\frac{MQR}{n}} \quad (3)$$

Na Equação 3, L_d representa o limite de decisão (ou seja, a diferença a partir da qual os valores passam a ser significativos entre si), e S_y representa o desvio padrão da média, obtido a partir da ANOVA. Esse valor é obtido a partir da média quadrada dos resíduos (MQR) e do número de amostras (n) para cada condição. Nesse caso,

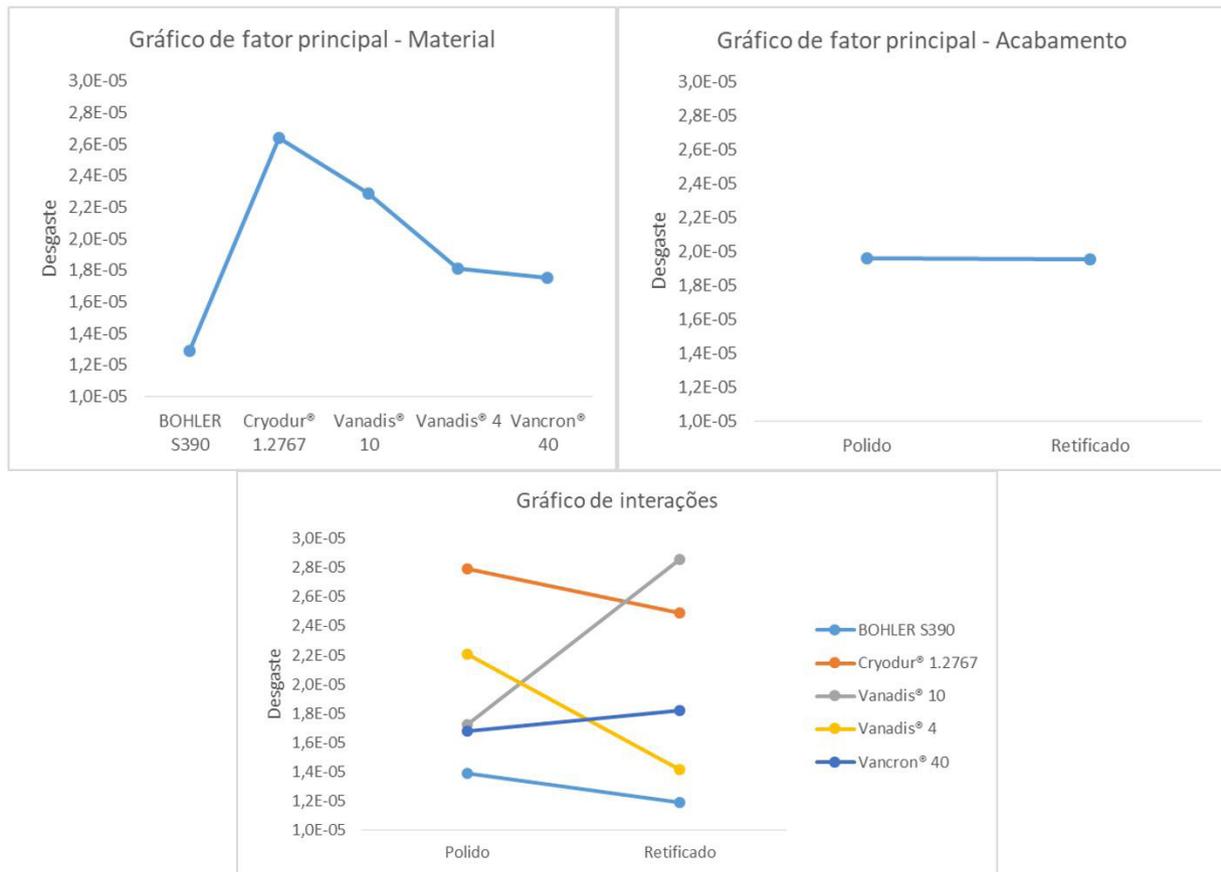


Figura 1. Resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA).

MQR = $0,2209 \times 10^{-10}$ e $n = 3$. Assim, obtém-se um limite de decisão $L_d = 0,8141 \times 10^{-5}$.

Com os valores do limite de decisão e com as médias em ordem crescente, procede-se à comparação das médias uma a uma. Quando a diferença entre duas médias é menor que L_d , considera-se que a diferença não é significativa (DNS) e os valores podem ser agrupados. Já quando a diferença entre as médias é superior ao L_d , considera-se que a diferença é significativa (DS). A Tabela 5 apresenta os resultados da CMM.

Nos casos em que as diferenças não são significativas (DNS), os valores podem ser agrupados. Nesse caso, para o material polido, podem ser considerados equivalentes os valores 1, 2 e 3. Ou seja, BÖHLER S390 = Vancron® 40 = Vanadis® 10.

Também podem ser agrupados os valores 4 e 5, ou seja, Vanadis® 4 = Cryodur® 1.2767. Para a condição retificada, podem ser agrupados os valores 1, 2 e 3, ou seja, BÖHLER S390 = Vanadis® 4 = Vancron® 40, assim como também podem ser considerados equivalentes os valores 4 e 5, ou seja, Cryodur® 1.2767 = Vanadis® 10.

A Figura 2 ilustra o agrupamento dos valores a partir da comparação múltipla de médias. As médias apresentadas são mostradas com barras em cima.

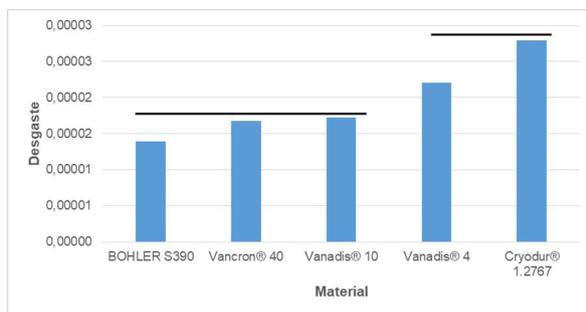
Considerando que o parâmetro de desgaste W representa o nível de desgaste do material, quanto maior W maior será o desgaste apresentado pelo aço. Nesse contexto, menores valores de W representam melhor desempenho em relação ao fenômeno de desgaste para os materiais ensaiados, de tal forma que se pode dizer que a variável W é do tipo menor-é-melhor. Ressaltando que os aços estudados foram escolhidos devido à sua aplicação na indústria metalmeccânica, estes materiais metálicos são utilizados pela indústria na construção de matrizes para estampagem, onde o desgaste representa custo de manutenção e/ou substituição em alguns casos.

Nesse contexto de construção mecânica de ferramentas, a metalurgia do pó representa um processo de produção de alta tecnologia com maior custo e valor agregado ao produto final ao aço ferramenta sinterizado, o custo de aquisição dos aços ferramenta BÖHLER S390, Vancron® 40, Vanadis® 4 e Vanadis® 10 é maior frente aos aços convencionais. Em relação ao tratamento térmico, o mesmo é variável comum a todos os aços, sejam eles convencionais ou metalurgia do pó.

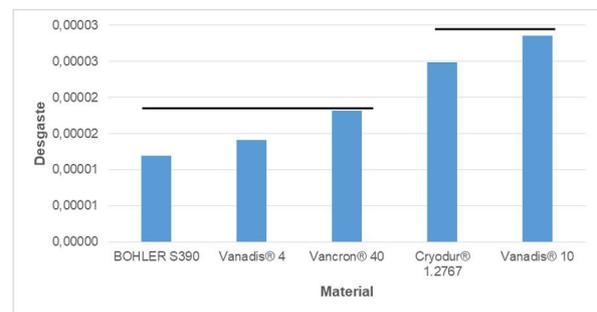
Os materiais que apresentaram melhor resposta de W (menor desgaste) foram os aços: aços BÖHLER S390, Vancron® 40 e Vanadis® 10, para o acabamento polido,

Tabela 5. Comparação múltipla de médias

Bloqueando o acabamento (considerando apenas polido)			Bloqueando o acabamento (considerando apenas retificado)		
Médias em ordem crescente ($\times 10^5$)			Médias em ordem crescente ($\times 10^5$)		
1) BÖHLER S390	1,3919		1) BÖHLER S390	1,1901	
2) Vancron® 40	1,6795		2) Vanadis® 4	1,4129	
3) Vanadis® 10	1,7245		3) Vancron® 40	1,8194	
4) Vanadis® 4	2,2095		4) Cryodur® I.2767	2,4926	
5) Cryodur® I.2767	2,7915		5) Vanadis® 10	2,8540	
	Diferença ($\times 10^5$)			Diferença ($\times 10^5$)	
"2-1"	0,2877	DNS	"2-1"	0,2227	DNS
"3-1"	0,3326	DNS	"3-1"	0,6293	DNS
"4-1"	0,8176	DS	"4-1"	1,3025	DS
"3-2"	0,0449	DNS	"3-2"	0,4066	DNS
"4-2"	0,5300	DNS	"4-2"	1,0797	DS
"5-2"	1,1120	DS	"5-2"	1,4412	DS
"4-3"	0,4850	DNS	"4-3"	0,6732	DNS
"5-3"	0,5820	DNS	"5-3"	1,0346	DS
"5-4"	0,5820	DNS	"5-4"	0,3614	DNS



(a)



(b)

Figura 2. Comparação múltipla de médias para a interação aço \times acabamento para as condições (a) polido e (b) retificado.

considerados valores agrupáveis pela análise CMM, ou seja, pela análise da ANOVA pode-se escolher o material mais econômico entre eles. No caso do material retificado, pode-se escolher livremente o BÖHLER S390, o Vanadis® 4 ou o Vancron® 40, preferencialmente por aquele que for mais econômico entre eles.

4 CONCLUSÕES

Os resultados da ANOVA e comparação múltipla de médias mostraram que nos resultados de desgaste, a interação "aço" (tipo de material) versus "acabamento" (polido ou retificado) é significativa, ou seja, a interação entre esses fatores possui influência no parâmetro de desgaste. Dessa forma, procedeu-se a uma comparação múltipla de médias (CMM) para essa interação, visando obter uma análise mais aprofundada.

Os resultados da CMM mostraram que alguns materiais poderiam ser considerados equivalentes, pois as diferenças entre eles não foram significativas.

Considerando-se que o desgaste (W) é uma variável do tipo menor-é-melhor, e considerando a possibilidade de agrupamento entre materiais, os materiais BÖHLER S390, Vancron® 40 e Vanadis® 10 podem ser agrupados, no caso do acabamento polido. Para a condição de acabamento retificada, o método mostrou que os aços ferramenta Vanadis® 10 e Cryodur® I.2767, poderiam ser agrupados. Ou seja, para otimizar a resistência ao desgaste, poderia se optar por qualquer um desses materiais (ou, então, pelo material mais econômico entre eles).

Ressalta-se que essa análise é limitada aos materiais ensaiados no trabalho, bem como a metodologia usada para avaliação de desgaste dos materiais tratados termicamente.

A metodologia ANOVA combinada com a análise de comparação múltipla de médias (CMM) pode ser aplicada a inúmeros outros problemas na indústria, buscando-se a otimização de uso de materiais e redução de custos no desenvolvimento

de projetos. Além disso, esta análise estatística auxilia na interpretação dos resultados obtidos experimentalmente, o que muitas vezes representa um desafio para projetistas.

Destaca-se a importância no uso destes métodos utilizados amplamente pela engenharia de produção em projetos de ferramentas com novos materiais, na área metalmeccânica. A possibilidade de agrupamento de resultados obtidos experimentalmente auxilia na tomada de decisão na escolha de materiais para serem utilizados em projeto,

assim como também permite que sejam feitas escolhas com base em custos de fabricação de componentes, fator tão buscado pela indústria.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Bohler Uddeholm pela doação dos materiais à realização do experimental.

REFERÊNCIAS

- 1 American Society for Metals. Surface engineering for corrosion and wear resistance. Ohio: ASM International; 2001.
- 2 Roberts G, Krauss G, Kennedy R. Tool steels. Ohio: ASM International; 1998.
- 3 Hatami S, Nafari A, Nyborg L, Jelvestam U. Galling related surface properties of powder metallurgical tool steels alloyed with and without nitrogen. *Wear*. 2010;269(3-4):229-240.
- 4 Vendramim JC. Introdução ao processo térmico – parte I – têmpera a vácuo. *Revista Industrial Heating*; 2013:68-72.
- 5 Huctchings IM. Tribology-friction and wear of engineering material. 1st ed. London: Edward Arnold Publications; 1992.
- 6 Bhushan B. Introduction to tribology. New York: John Wiley & Sons; 2002.
- 7 Bahrami A, Anijdan SHM, Golozar MA, Shamanian M, Varahram N. Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel. *Wear*. 2005;258(5-6):846-851.
- 8 Both GB. Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste, para aplicação em ferramentas de conformação à frio [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2011.
- 9 Kleme S, Kivikytö-Reponen P, Liimatainen J, Hellman J, Hannula S-P. Abrasive wear properties of tool steel matrix composites in rubber wheel abrasion test and laboratory cone crusher experiments. *Wear*. 2007;263(1-6):180-187.
- 10 Kennedy D, Hashmi MSJ. Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk Materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998;77(1-3):246-253.
- 11 Leskovsek V, Ule B. Improved vacuum heat-treatment for fine-blanking tools from high-speed steel M2. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998;82:89-94.
- 12 Ribeiro JLD, Caten CST. Projeto de experimentos. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS; 2011. (Série Monográfica Qualidade).
- 13 Japanese Standards Association. JIS B0601: surface roughness. Tokyo: Japanese Standards Association; 1994.
- 14 American Society for Testing and Materials. ASTM E18-94: standard test methods for rockwell hardness of metallic materials. West Conshohocken: ASTM; 1994.
- 15 Uddeholm [página da internet]. 2014 [acesso em 08 jun. 2014]. Disponível em: www.uddeholm.com
- 16 Schmolz + Bickenbach Group [página da internet]. Lucerne: Schmolz + Bickenbach AG; 2014 [acesso em 08 jun. 2014]. Disponível em: www.schmolz-bickenbach.com.br

Recebido em: 15 Jun. 2017

Aceito em: 2 Dez. 2017