

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO AÇO RÁPIDO AISI M2 OBTIDO POR CONFORMAÇÃO POR SPRAY QUANDO APLICADO COMO FERRAMENTA DE USINAGEM

Edilson Rosa Barbosa de Jesus ¹

Edson Souza de Jesus Filho ²

Jesualdo Luiz Rossi ³

Resumo

O objetivo do presente trabalho foi a obtenção de aço rápido tipo AISI M2 pela técnica da conformação por *spray* e a avaliação deste quando aplicado como ferramenta de usinagem. O material obtido foi laminado a quente com razões de redução na espessura de 50 e 72%, resultando em placas a partir das quais foram confeccionadas pastilhas intercambiáveis para realização de testes de usinagem contínua. O desempenho destas pastilhas foi confrontado com o de pastilhas confeccionadas a partir de material processado convencionalmente (fundição) e com o de pastilhas obtidas por metalurgia do pó. Os materiais foram caracterizados mecânica e microestruturalmente após tratamento térmico de têmpera e revenimento. Foram realizados testes de usinagem para avaliação de desempenho do material quando submetido a condições reais de trabalho. Os resultados da caracterização evidenciaram o potencial da técnica de conformação por *spray* em possibilitar a obtenção de materiais com boas características e propriedades mecânicas adequadas. Para as condições de processamento, conformação mecânica e tratamentos térmicos usados neste trabalho, às análises dos resultados dos testes de usinagem indicaram um comportamento muito próximo entre todos os materiais de ferramenta utilizados.

Palavras-chave: Conformação por *spray*; Usinagem; Aço rápido.

EVALUATION OF A SPRAY FORMED HIGH-SPEED STEEL AISI M2 AS MACHINING TOOLS

Abstract

The aim of the present work was the obtention of AISI M2 high-speed steel by spray forming technique and to carry out performance evaluation as machining tool. The spray formed material was hot rolled at 50% and 72% thickness reduction ratios. Inserts for machining tests were manufactured from this material. The performance of spray formed material inserts was compared to inserts obtained by conventional casting and powder metallurgy techniques. The spray formed material and the others were mechanical and microstructural characterised after quenching and tempering. For further characterisation, the materials were machining tested for performance evaluation under working conditions. The results of material characterisation highlight the potential of the spray forming technique in the obtention of materials with good characteristics and suitable mechanical properties. Under the current processing, hot rolling and heat treatments condition, the analysis of the results of the machining tests pointed out a very similar behaviour among the tested materials.

Key words: Spray forming; Machining; High-speed steel.

1 INTRODUÇÃO

Embora os processos de fabricação tenham evoluído significativamente, nos dias de hoje ainda que em menor proporção a conversão de materiais de uma forma para outra implica em aumentar o custo do produto final. O custo de manufatura representa cerca de 40% do preço de venda de um produto⁽¹⁾ e cerca de 50% deste montante está relacionado com os recursos e materiais necessários ao andamento do processo. Incluem-se aí as ferramentas utilizadas no processo de usinagem. No início da década

de 1980, a estimativa era de que grande parte (cerca de 80%) de todas as peças e componentes manufaturados necessitava passar por pelo menos um processo de usinagem antes de serem totalmente acabados.⁽²⁾ Hoje, mesmo com métodos de manufatura que permitem a obtenção de partes em uma forma quase final - *near net shape*, a necessidade da utilização de operações de usinagem ainda não pôde ser completamente eliminada.

¹ Eng. mecânico, Mestre e Doutor pelo IPEN/USP

² Eng. mecânico, Mestre e Doutor pelo IPEN/USP

³ Eng. de materiais, Mestre, Ph.D. e pesquisador do IPEN/CNEN-SP

Hoje, há basicamente três processos a partir dos quais é possível a obtenção de aços ferramenta: fundição convencional, metalurgia do pó (MP) e conformação por *spray*. A conformação por *spray* tem-se apresentado tecnicamente e economicamente viável para a obtenção de uma vasta gama de materiais, dentre eles, os aços ferramenta. De forma semelhante à produção de pós por atomização a conformação por *spray* envolve a atomização de uma liga metálica e a deposição de gotículas em um substrato, antes que todas se encontrem no estado sólido, o que permite a obtenção de pré-formados. A Figura 1 mostra um esquema do processo Osprey de conformação por *spray*, desde o banho no forno de indução até a obtenção do pré-formado sobre o substrato. As vantagens metalúrgicas de ligas advindas da conformação por *spray* têm sido documentadas na literatura.⁽³⁻⁶⁾ Estas vantagens são devidas à solidificação rápida de gotículas pelo gás de atomização durante o processo em atmosfera inerte. Em resumo, os produtos são caracterizados por: microestrutura livre de macrossegregações; estrutura de grãos equiaxiais finos e uniformes; precipitados primários finos; baixa contaminação com oxigênio; trabalhabilidade a quente melhorada. Conseqüentemente, a conformação por *spray* pode produzir materiais com propriedades superiores quando comparadas a produtos que normalmente são fundidos e trabalhados a quente. Mais ainda, novas ligas, materiais compostos de matriz metálica, ligas reativas produzidas *in situ*, materiais para tixocofação e produtos *clad* são obtidos por esta técnica.

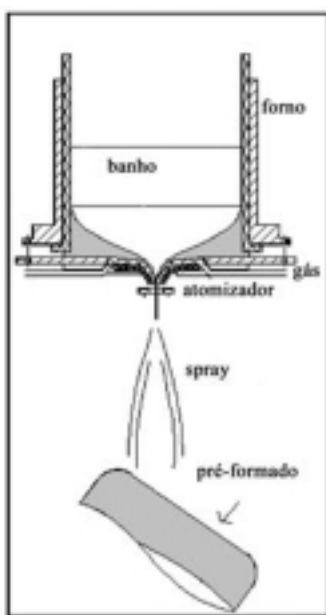


Figura 1. Esquema do processo Osprey de conformação por *spray*.

A maior atração da conformação por *spray* é a operação em um único estágio, a partir do metal líquido até o material consolidado. Este estágio único implica em menores custos de capital (menos equipamentos), baixo custo de operação (baixo consumo de energia e alto rendimento do material) e baixo custeio (estoques menores, menos trabalho e prazos de entrega melhores). Infelizmente, a operação de estágio único não foi suficiente para garantir o sucesso da conformação por *spray*. Significativos avanços tecnológicos foram necessários de modo a propiciar uma competição com as rotas convencionais de fabricação (fundição, forjamento, laminação, refusão, etc.), onde a tecnologia é estabelecida e os volumes de produção são grandes. Conseqüentemente, em anos recentes, um esforço importante tem sido dirigido para o melhoramento técnico e para programas de redução de custos. Em particular, foi necessário: (a) maximizar a produção (maiores volumes de fusão e de pré-formados, e aumento de produtividade); (b) melhorar a eficiência do processo (menor consumo de gás, maior eficiência da deposição e do controle dimensional); e (c) pesquisar novas ligas específicas para o processo.

A AISI (*American Iron and Steel Institute*) considera uma grande variedade de aços ferramenta e os classifica subdividindo-os em categorias, dentre as quais se encontra a dos aços rápidos, cujo tipo AISI M2 é o motivo do estudo a que se propõe o presente trabalho. A metodologia para realização de testes que objetivem a verificação do desempenho do material da ferramenta de corte, consiste basicamente na realização de ensaios comparativos entre os materiais que se deseja avaliar. A *International Organization for Standardization*, ISO 3685⁽⁷⁾ é uma referência para a realização de testes de desempenho de ferramentas de corte. Entretanto, na prática, a metodologia aplicada, muitas vezes, é resultado de adaptações e mesclagens feitas entre as recomendações da ISO e métodos já existentes utilizados freqüentemente para determinação da usinabilidade do material da peça. No caso da construção de curvas de desgaste, por exemplo, a ISO considera a correlação do desgaste da ferramenta versus tempo usinado, enquanto que na prática é preferível utilizar o "comprimento usinado" em metros. Uma outra adequação freqüentemente adotada devido principalmente à limitação na quantidade de material disponível para a realização de ensaios, é a aceleração do processo de desgaste da ferramenta através do uso de condições de corte mais severas. A aplicação, por exemplo, de velocidades de corte maiores e/ou a não utilização de fluido refrigerante, promove o aumento da severidade do corte e enquadra o ensaio no grupo daqueles ditos de "curta duração".

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Foram consideradas para este estudo basicamente quatro variações do material (aço rápido AISI M2) em termos de métodos de obtenção e tratamentos termomecânicos aplicados posteriormente, os quais são: a) conformado por *spray* (MCS) que foi recozido e laminado a duas diferentes reduções na espessura; b) obtido por fundição convencional (MConv); c) obtido pela técnica da metalurgia do pó (MP). A composição química dos materiais estuda-

dos é apresentada na Tabela 1 juntamente à composição nominal do aço AISI M2. O material conformado por *spray* (MCS) foi obtido no Laboratório de Conformação por *Spray* instalado no IPEN. Em virtude da característica de temperabilidade do material e da elevada taxa de resfriamento proporcionada pelo processo de conformação por *spray*, o material apresentou dureza elevada após o término do resfriamento. Deste modo, foi necessário então submetê-lo a um tratamento térmico de recozimento a 880 °C por 1 h, para que o mesmo pudesse ser posteriormente trabalhado (usinado).^(8,9) A partir deste material recozido foi feita laminação a quente a 1150°C. As placas foram laminadas em passes consecutivos de 1 mm, sendo que, após cada passe pelo laminador, estas retornavam ao forno. Obtiveram-se assim duas variações de material em função das reduções de espessura aplicadas: 50% de redução (MCSR50) e 72% de redução (MCSR72), as quais correspondem a uma redução na área transversal de 20% e 67%, respectivamente.

O aço obtido por fundição convencional (MConv), foi comprado e detalhes da sua fabricação não foram fornecidos. Entretanto, a literatura^(10,11) aponta para uma redução da ordem de 94% ou mais, com longos e onerosos tratamentos térmicos de esferoidização para que se obtenha uma microestrutura adequada para uso destes materiais. O Laboratório de Metalurgia do Pó do IPEN forneceu o material obtido pela técnica da metalurgia do pó, em formato próximo ao necessário para a confecção das pastilhas de usinagem. A obtenção envolveu basicamente a compactação do pó de aço AISI M2 a 800 MPa, seguido de sinterização a vácuo na temperatura de 1249 ± 3 °C.

Métodos

As pastilhas para usinagem foram confeccionadas a partir dos materiais citados anteriormente (MCSR50, MCSR72, MP e MConv) e as etapas de confecção incluíram a usinagem e tratamentos térmicos de têmpera e revenimento,⁽⁸⁾ retífica e afiação (Figura 2). Os tratamentos térmicos foram feitos em banho de sal

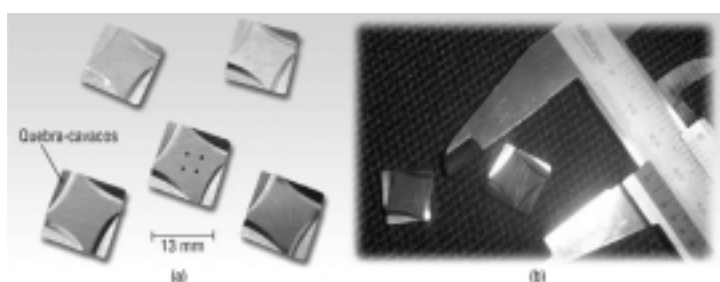


Figura 2. Detalhes das pastilhas após retífica e afiação (prontas para o uso).

Tabela 1. Composição química (% massa) dos materiais estudados.

Material	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	P	S	N
AISI M2 nominal	0,78-0,88	0,15	0,20	3,75	0,30	4,50	5,50	1,75	0,03	0,03	-
	0,95-1,05	0,40	0,45	4,50	max.	5,50	6,75	2,20	máx.	máx.	-
MCS	1,03	0,18	0,22	3,29	0,29	4,98	6,19	1,87	0,0340
MConv	0,90	0,29	0,36	3,94	0,20	5,17	6,28	1,77	0,018	0,001	...
MP	0,80	0,20	0,30	4,20	...	5,25	6,38	1,90	...	0,007	...

... Não medido.

e consistiram de pré-aquecimento a 880 °C (9 min), austenitização a 1210 °C (3 min), resfriamento intermediário a 520 °C (6 min), resfriamento a temperatura ambiente e duplo revenimento a 560 °C (2 h). Foram preparadas amostras dos materiais para determinação da resistência a ruptura transversal (TRS – *transversal rupture strength*)⁽¹²⁾ através de ensaios de flexão. Parte destas amostras foi usada posteriormente para a realização dos ensaios de dureza (no caso da MP, os valores de dureza foram obtidos na própria pastilha). Para verificação do tamanho e distribuição de carbonetos as amostras foram preparadas (polidas), as quais foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estas amostras foram então atacadas, para revelação dos contornos de grão austenítico, em uma solução de 10 mL de HCl, 5 mL de HNO₃ e 85 mL de etanol/metanol (95%) após o que, estas foram novamente analisadas por MEV.

Para fixação das pastilhas foi utilizado um suporte porta-pastilha normalizado (designação ISO CSBPR2020K12). As usinagens foram feitas em corpos de prova preparados a partir de barra de aço SAE 1045 conforme recomendado pela ISO 3685⁽⁷⁾ e o equipamento utilizado foi um torno mecânico de comando numérico computadorizado (CNC). Os ensaios consistiram basicamente na usinagem dos corpos de prova a profundidade de corte (a_p) e avanço (f) constantes iguais a 1,5 mm e 0,2 mm/rot, respectivamente, com raio de ponta (r) igual a 0,8 mm. Além do material da ferramenta, a velocidade de corte também foi um parâmetro variável, sendo que para efeito deste trabalho, somente os resultados com velocidade de corte de 34 m/min são apresentados. A avaliação do desempenho de cada material da ferramenta foi feita com base nos valores de desgaste de flanco máximo, onde foram consideradas paradas ao longo da usinagem de cada corpo de prova para medição do desgaste da pastilha. A cada parada a pastilha era retirada do suporte e levada até um microscópio óptico para registro fotográfico da evolução do desgaste; em seguida, a mesma era recolocada no suporte para continuidade do ensaio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades Mecânicas e Caracterização Microestrutural

Os resultados das medições de dureza mostraram que o maior valor foi encontrado para o material MConv (Figura 3). Entretanto, vale salientar que nem sempre um maior valor de dureza está relacionado a um melhor desempenho da ferramenta, conforme foi verificado por Jesus,⁽⁸⁾ Santos⁽¹³⁾ e por Schruff, Schüler e Spiegelhauer,^(14,15) em trabalhos com aço rápido convencional, sinterizado e conformado por *spray*.

Os resultados dos ensaios de flexão para a determinação da resistência a ruptura transversal (TRS), mostraram que o material obtido por conformação por *spray* quando submetido à redução em espessura de 50% resulta em valores de resistência que chegam em alguns casos a serem superiores aos do material obtido convencionalmente, e, quando a redução é aumentada para 72% os resultados são comparáveis aos do material obtido por metalurgia do pó (Figura 4).

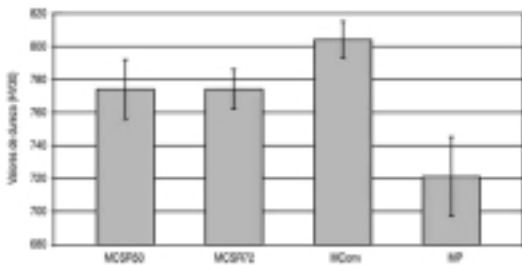
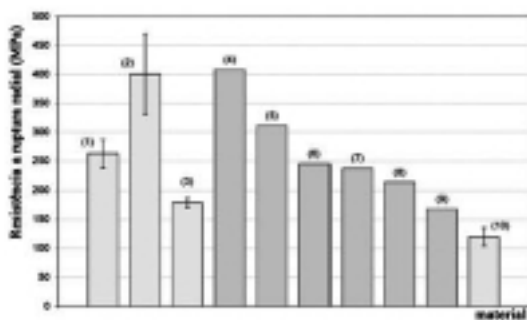


Figura 3. Dureza dos materiais após tratamento térmico (têmpera e revenimento).



- (1) MCSR50 (presente trabalho).
- (2) MCSR72 (presente trabalho).
- (3) MConv - (transversal) - (presente trabalho).
- (4) Metalurgia do pó (MP)⁽¹⁰⁾.
- (5) Convencional⁽¹²⁾.
- (6) Conf. spray + forjamento - (transversal)⁽¹⁷⁾.
- (7) Convencional⁽¹⁷⁾.
- (8) Convencional⁽¹⁸⁾.
- (9) Convencional - (transversal)⁽¹⁸⁾.
- (10) Metalurgia do pó (MP) (presente trabalho).

Figura 4. Resultados dos ensaios de flexão para a determinação da resistência a ruptura transversal (TRS) dos materiais em estudo, em comparação com dados obtidos por outros pesquisadores (aço rápido AISI M2 após têmpera e revenimento).

Microestruturalmente, se as micrografias das Figuras 5 a-d forem avaliadas com o objetivo de identificar o melhor material em termos de refino microestrutural, o que geralmente culmina com melhores propriedades mecânicas, o MCSR72 com certeza será o escolhido. Entretanto, quando se trata de materiais para aplicações em ferramentas de usinagem à resistência ao desgaste abrasivo também deve ser levada em conta. Segundo Schruff, Schüler e Spiegelhauer,^(14,15) a melhor condição microestrutural para um bom desempenho do material em termos de resistência ao desgaste é aquela em que os carbonetos se apresentem homogeneamente distribuídos e com tamanhos maiores. Nesta condição, em qualquer região e direção têm-se pontos de ancoragem os quais oferecem resistência suficiente à passagem do elemento abrasivo. Tanto maior será esta resistência quanto maior for o tamanho do carboneto (Figura 6).

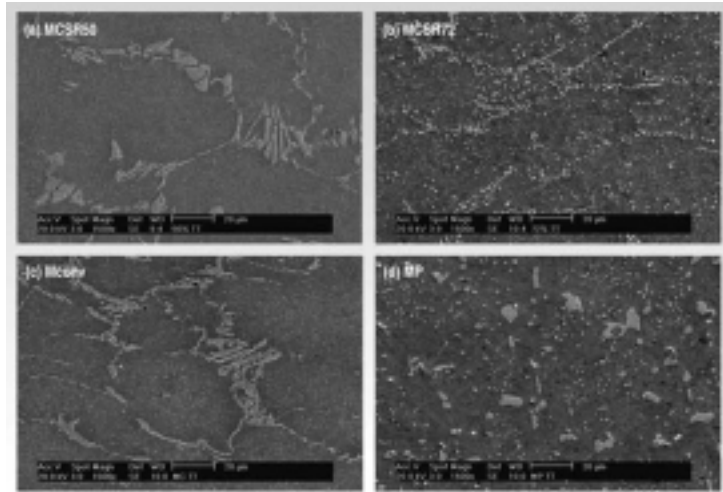


Figura 5. Micrografia eletrônica de varredura dos materiais após tratamento térmico de têmpera e revenimento – sem ataque.

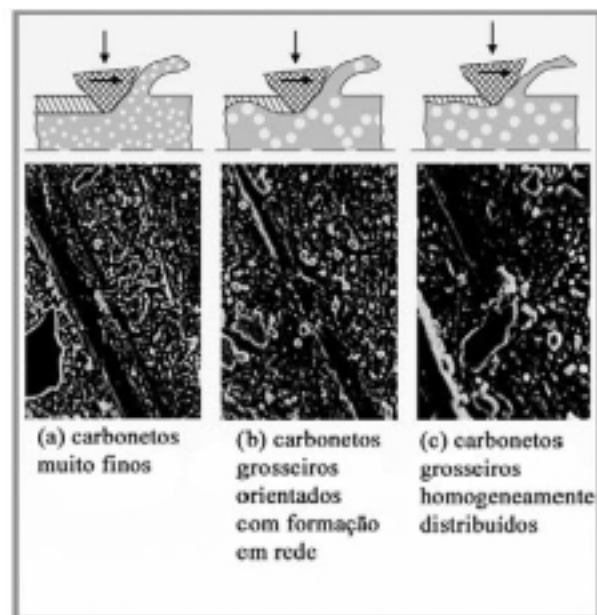


Figura 6. Influência do tamanho e distribuição dos carbonetos na resistência ao desgaste dos aços ferramenta.^(14,15)

Em termos de tamanho de grão austenítico, análises em amostras dos materiais após têmpera e revenimento revelaram um tamanho médio de grão maior ($22 \pm 3 \mu\text{m}$) na amostra obtida por MP em relação aos demais materiais, o que pode explicar os menores valores de dureza e de resistência à ruptura transversal (TRS) encontrados neste material em relação aos demais casos. Para o MCSR50 e MCSR72, o tamanho de grão foi menor que no MP ($15 \pm 4 \mu\text{m}$ e $17 \pm 2 \mu\text{m}$, respectivamente), o que em parte pode explicar os maiores valores de dureza e de resistência à ruptura transversal em relação a este último (MP). Já no caso do MConv, foi encontrado o menor tamanho de grão dentre todos os materiais ($13 \pm 4 \mu\text{m}$), o que pode ter colaborado para que este material apresentasse o maior valor de dureza em relação aos demais.

Testes de Usinagem

A partir da curva de desgaste de flanco máximo (Figura 7) de cada uma das ferramentas, resultante da média entre valores encontrados em duas baterias completas de testes com velocidade de 34 m/min; verifica-se um comportamento muito próximo entre todos os materiais sob avaliação em termos de valores finais de desgaste. Tal observação, já é um forte indicativo do potencial de desempenho do material obtido pelo processo de conformação por *spray*, frente ao desempenho de outros materiais obtidos por processos já consagrados. Analiticamente, os resultados apresentados na Figura 7 apontam para um melhor desempenho do MP seguido pelo MConv o qual apresentou uma vantagem muito estreita em relação ao MCSR72. Resultados similares a estes foram encontrados efetuando-se o mesmo tipo de análise com base nos valores de desgaste de cratera encontrados durante as usinagens.

Efetuada-se uma análise comparativa entre as micrografias da Figura 5 e estabelecendo um paralelo com os resultados dos ensaios de usinagem, Figura 7, tem-se que: A microestrutura do MCSR50 é bastante similar a do MConv, no entanto o MCSR50 apresentou resultados inferiores aos do MConv em termos de resistência ao desgaste durante os ensaios de usinagem. O MCSR72 apresenta distribuição homogênea e menores tamanhos de carbonetos em relação ao MConv, portanto uma micro-

estrutura muito mais refinada. No entanto, ambos os materiais apresentaram desempenho bastante próximos durante os testes de usinagem, com ligeira vantagem para o MConv. O MCSR72 apresenta uma microestrutura tão refinada quanto o MP, com carbonetos de tamanhos menores. Entretanto, o MP foi o que analiticamente apresentou dentre todos, o melhor resultado de desempenho durante os testes de usinagem.

Vale ressaltar, que as diferenças de desempenho em usinagem entre os materiais estudados foram mínimas. Embora a afirmação de Schruoff, Schüler e Spiegelhauer^(14,15) talvez não seja a única e nem a justificativa mais adequada para os casos mencionados anteriormente, é com certeza a que pode melhor explicar o desempenho superior do MP em relação aos outros materiais.

4 CONCLUSÕES

A redução na espessura de 50% no tratamento termomecânico posterior do material obtido por conformação por *spray* não foi suficiente para permitir uma boa distribuição, quebra e descaracterização da rede de carbonetos oriunda do processo de conformação por *spray*.

A redução de 72% no tratamento termomecânico posterior do material obtido por conformação por *spray* não foi adequada para os propósitos de aplicação do material, pois apresentou evidências de redução da resistência ao desgaste deste material frente ao MConv e o MP.

Nas condições de processamento utilizadas no presente trabalho, as análises dos resultados dos testes de usinagem revelaram um desempenho ligeiramente superior do material obtido pela técnica da metalurgia do pó (MP), seguido pelo material obtido pela técnica da metalurgia convencional (MConv), o qual apresentou mínima vantagem em relação ao material conformado por *spray* e laminado com redução de 72%.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de uma bolsa a E.R.B.J., à Hurth Infer pelos tratamentos térmicos, à Petroleum Precisa pela afiação e ao Laboratório de Metalurgia do Pó do IPEN pelo fornecimento das pastilhas sinterizadas.

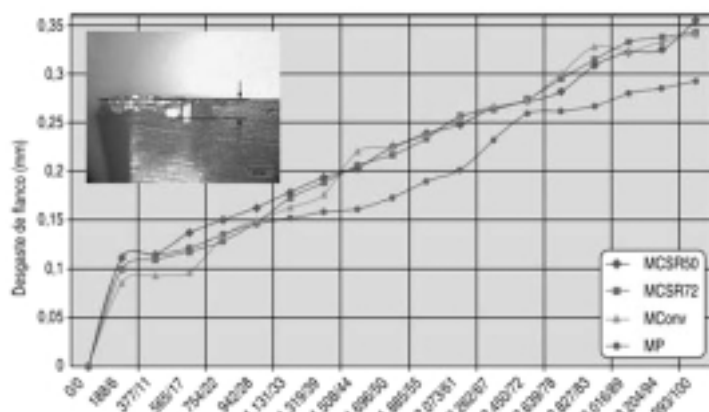


Figura 7. Curvas de desgaste para velocidade de corte de 34 m/min (valores médios referente a duas baterias de testes).

REFERÊNCIAS

- 1 DEGARMO, E.P.; BLACK, J.T.; KOHSER, R.A. **Materials and processes in manufacturing**. 8. ed. New York : Prentice Hall, 1997. p. 3-5.
- 2 DIETER, G.E. **Mechanical metallurgy**. 3. ed. New York : McGraw-Hill, 1986. p. 679-708.
- 3 LEATHAM, A.G.; OGILVY, A.; CHESNEY, P.; WOOD, J.V. Osprey process – production flexibility in materials manufacture. **Metals and Materials**, v.5, n.3, p. 140-3, Mar. 1989.
- 4 LEATHAM, A.G.; ELIAS, L.; YAMAN, M.; ITAMI, T.; KAWASHIMA, Y.; BROOKS, P.J.S.; HUMMERT, K.; TYLER, D.E.; CHESKIS, P.; DALAL, R.P.; PRICHARD, P.D. Spray forming - commercialisation and applications. In: **P/M WORLD CONGRESS**, 1992, San Francisco. Princeton, NJ : Metal Powder Industries Federation, 1992. p. 66-76.
- 5 LEATHAM, A.G.; OGILVY, A.; ELIAS, L. The Osprey process current status and future possibilities. In: **P/M IN AEROSPACE, DEFENSE AND DEMANDING APPLICATIONS - 1993**, 1993, San Diego. Princeton, NJ : Metal Powder Industries Federation, 1993. p. 165-75
- 6 ROSSI, J.L.; AMBROZIO FILHO, F. Planta de conformação por “spray” uma tecnologia disponível. **Metalurgia e Materiais**, v. 52, n. 449, p. 18-19, jan.1996.
- 7 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools**. 2. ed. Geneva, 1993.
- 8 JESUS, E.R.B. **Ferramentas de usinagem em aço rápido AISI M2 obtido por conformação por “spray”**. 2004. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Minerais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo, 2004.
- 9 BAYER, A.M.; WALTON, L.R. **Wrought tool steels**. 10. ed. Material Park : ASM, 1990. p. 757-79, (Metals Handbook, v.1)
- 10 ROBERTS, G.A.; CARY, R.A. **Tool steels**. 4. ed. Material Park : ASM, 1980. p. 628-791.
- 11 OHJA S.N., SINGH S.N. On spray deposition of high-speed steel. **Journal of Materials Science Letters**, v. 10, 15, p. 893-95, Jan. 1991.
- 12 METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. **Determination of transverse strength of powder metallurgy materials - Standard Test Method 41**. Princeton, NJ, 1991.
- 13 SANTOS, R.S. **Ferramentas de aço rápido sinterizado e aços rápidos convencionais: análise de propriedades**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- 14 SCHRUFF, I.; SCHÜLER, V.; SPIEGELHAUER, C. Advanced tool steels produced via spray forming. In: INTERNATIONAL TOOLING CONFERENCE, 6., 2002, Karlstad-Sweden. Karlstad, Sweden : S.n.t., 2002. v. 2, p. 973-990.
- 15 SCHRUFF, I.; SCHÜLER, V.; SPIEGELHAUER, C. Spray forming - the new technology for the production of high-grade tool steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPRAY DEPOSITION AND MELT ATOMIZATION – SDMA 2003 e INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPRAY FORMING - ICSF V, 5., 2003, Bremen. Bremen, Herstellung : Books on Demand, 2003. v. 1, p. 5.11-25.
- 16 HABERLING, E.; WEIGAND, H.H. Correlation between mechanical properties, microstructure and performance of high-speed tool steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE TOWARDS IMPROVED PERFORMANCE OF TOOL MATERIAL, 1981, Teddington, Middlesex. Teddington, Middlesex : S.n.t., 1981. p. 170-75.
- 17 IGHARO, M.; WOOD, J.V. Investigation of M2 high speed steel produced by Osprey process. **Powder Metallurgy**, v. 32, n. 2, p. 124-131, 1989.
- 18 MESQUITA, R.A.; BARBOSA, C.A. Evaluation of as-hipped PM high speed steel for production of large-diameter cutting tools. **Materials Science Forum**, v. 416-418, p. 235-240, 2003.

Recebido em: 13/02/06

Aceito em: 02/05/06

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2005, Belo Horizonte, MG. São Paulo : ABM, 2005.