

AVALIAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE AÇO RÁPIDO AISI M2 CONFORMADO POR "SPRAY"

Edilson Rosa Barbosa de Jesus⁽¹⁾, Edson Souza de Jesus Filho⁽²⁾, Jesualdo Luiz Rossi⁽³⁾

RESUMO

O objetivo do presente trabalho, é mostrar os produtos da operação experimental de uma planta de conformação por "spray" instalada no Brasil. Foi possível a obtenção de algumas ligas de aços ferramenta, os quais são objetos de diversos estudos. Os resultados dos estudos preliminares feitos em aços ferramenta, ressaltaram as vantagens microestruturais proporcionadas pelo processo, o que permite a obtenção de materiais com propriedades equivalentes ou superiores em relação àqueles obtidos pelos processos convencionais. É feita uma revisão sobre o assunto, mostrando a situação atual da pesquisa nesta área no país e no mundo e algumas características e peculiaridades associadas ao processo.

PALAVRAS CHAVE: conformação por "spray", aço ferramenta, microestrutura.

1.º Encontro dos Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes – 28 a 30 de outubro de 2003 – São Paulo – SP.

(1) Eng.º Mecânico e doutorando pelo IPEN/USP – SP

(2) Eng.º Mecânico e doutorando pelo IPEN/USP – SP

(3) Eng.º de Materiais e Pesquisador do IPEN - SP

INTRODUÇÃO

Embora os processos tenham evoluído bastante nos últimos 30 anos, e, mais recentemente o processo de globalização tenha alavancado ainda mais os avanços na tecnologia de manufatura com a possibilidade de que os materiais sejam trabalhados mais eficientemente e com menores perdas; nos dias de hoje ainda que em menor proporção, a conversão de materiais de uma forma para outra implica em agregar valor ao produto final.

Materiais, homens, métodos e equipamentos são fatores que se inter-relacionam na manufatura e precisam ser corretamente combinados para alcançar baixo custo, qualidade superior e prazo de entrega. O processo de globalização tem estimulado sobremaneira a competitividade e faz com que o preço de venda seja determinado pelo mercado, então, a manutenção da faixa de lucro depende naturalmente da redução do custo de manufatura para que um produto possa se tornar competitivo.

Normalmente o custo de manufatura representa cerca de 40% do preço de venda de um produto ^[1], vide figura 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.

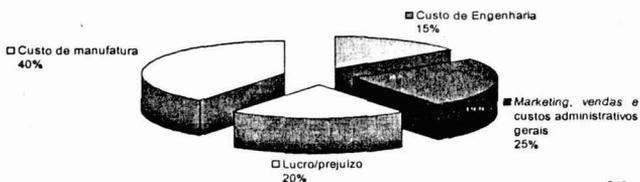


Figura 1 – Demonstrativo de custos de manufatura ^[1].

No início da década de 1980, a estimativa era de que grande parte (cerca de 80%) de todas as peças e componentes manufaturados, necessitavam passar por pelo menos um processo de usinagem antes de serem totalmente acabados ^[2]. Hoje, mesmo com métodos de manufatura que possibilitam a obtenção de peças e componentes praticamente na forma final ("near net shape") como é o caso da técnica da metalurgia do pó, a necessidade da utilização de operações de usinagem ainda não foi completamente eliminada; e, para tanto é necessário a utilização de ferramentas de usinagem.

Aços ferramenta atualmente podem ser obtidos basicamente por dois métodos: fundição convencional e mais recentemente a sinterização (que utiliza a técnica da metalurgia do pó) ^[3, 4]. O processo de fundição, frequentemente resulta em segregação, formação de grandes partículas, variação significativa do tamanho e distribuição não homogênea de carbonetos na matriz. Em consequência, o material torna-se de difícil trabalhabilidade e pode apresentar grandes variações nas propriedades, inconsistência no desempenho da ferramenta, distorção e quebra ^[1, 5].

A técnica da metalurgia do pó veio para superar alguns desses problemas. O resultado é um material mais homogêneo que possibilita a obtenção de ferramentas com melhores cortes, tenacidade superior, melhor resistência ao desgaste, dureza a temperaturas elevadas superior e desempenho mais consistente. Entretanto, o processo tem a desvantagem de ter o dobro do custo dos processos convencionais ^[1].

O contínuo desenvolvimento tecnológico sobretudo nos setores industriais de manufatura em geral tem exigido materiais com melhor desempenho para aplicações específicas, e, os métodos de obtenção utilizados até então têm se mostrado limitados. Na indústria por exemplo, quando se trabalha com produção seriada, na maioria das vezes os equipamentos trabalham em linha com diversas máquinas executando as mesmas operações. A substituição das ferramentas neste caso deve ser feito antes que as mesmas atinjam o limite de sua utilização, o que pode comprometer a qualidade do produto e/ou provocar a interrupção não programada (indesejada) do(s) equipamento(s) para substituição da(s) mesma(s).

Para que se reduza então o tempo de "set-up" e para que se evite os transtornos citados anteriormente, são feitas paradas programadas para a troca simultânea de todas as ferramentas. A programação das paradas é baseada no tempo de vida da ferramenta, então, a ferramenta que possibilitar a utilização da maior velocidade de corte para um mesmo tempo de usinagem será a escolhida, pois possibilitará uma maior produtividade.

No início da década de 1970 o trabalho pioneiro desenvolvido por Singer em conformação por "spray", abriu caminho para o início da implantação de um processo revolucionário para a obtenção de materiais ^[6]; Singer apud Ohja e Singh ^[7]. A viabilização do processo de conformação por "spray" para volumes maiores de produção foi feita pela Osprey Metals Ltd., e, a partir daí, abriu-se o mercado para a utilização de um novo processo para a obtenção de materiais em escala industrial denominado então processo Osprey ^[8].

O processo Osprey ^[9-11] envolve a atomização contínua de uma liga metálica e deposição de gotículas em um substrato antes que todas se encontrem no estado sólido; e, pode ser melhor descrito pela incorporação das vantagens proporcionadas pelo processamento via metalurgia do pó, sem as desvantagens associadas com a consolidação ^[12]. O processo de conformação por "spray", tem-se mostrado econômica e tecnologicamente atrativo para a produção de uma variada gama de materiais ^[8, 9]. O material obtido pelo processo em geral, apresenta uma microestrutura refinada. São características a ausência de macrosegregações, baixos níveis de microsegregações finas, refinamento de partículas intermetálicas, precipitados secundários e fases eutéticas ^[6, 13].

Revisão sobre aços ferramenta conformados por "spray"

Uma das características mais importantes da técnica de conformação por "spray", é a possibilidade de se poder obter ligas normalmente difíceis de serem convencionalmente produzidas, como consequência da rápida solidificação proporcionada pelo processo, o que reduz significativamente os problemas de segregação ^[14]. É o caso de ligas que tem intervalo de solidificação grande, que torna difícil o controle da solidificação durante a fundição e ligas altamente ligadas de difícil controle microestrutural ^[15].

Embora o assunto tenha sido muito pouco explorado e os poucos trabalhos tenham se concentrado principalmente no grupo dos aços rápidos, os resultados têm mostrado que o processo permite a obtenção de materiais com altas densidades e que de modo geral, estes materiais apresentam microestrutura homogênea com células de carbonetos refinadas. Segundo Tetsu et al. ^[16], a obtenção de materiais com altas

densidades (livre de porosidades), favorece tratamentos termomecânicos posteriores, na medida em que evitam o aparecimento de trincas durante o processo.

Os aços ferramenta em particular se caracterizam por um largo intervalo de solidificação e reações eutécticas complexas que resultam em segregação dos elementos de liga e formação de diferentes tipos de carboneto durante a solidificação [14, 15, 17, 18]. A técnica de conformação por "spray" permite a minimização destes problemas por possibilitar maior refinamento dos carbonetos; e tem se mostrado tão eficiente quanto a técnica da metalurgia do pó, com a vantagem de que, o material pode ser obtido em uma única operação, o que proporciona redução de custos [15].

Mais especificamente para o grupo dos aços rápidos, os tipos de carbonetos mais frequentes são o MC, M₂C e M₆C dependendo da taxa de resfriamento e da composição da liga [15, 17, 18]. O tipo, tamanho e distribuição dos carbonetos afetam as propriedades mecânicas dos aços rápidos [15]. Nos aços rápidos ao molibdênio obtidos por lingotamento convencional, a formação de carbonetos M₂C por reação eutéctica deteriora as características de trabalhabilidade à quente e tenacidade destes materiais [15]. O tratamento termomecânico posterior exerce papel fundamental na obtenção de uma fina e homogênea distribuição de carbonetos. De acordo com Rickinson et al [5], Lee et al. [15, 17] e Ho Baik et al. [18], uma redução por trabalho à quente da ordem de 75 a 80% é necessária para que ocorra este refinamento e distribuição nos materiais obtidos por conformação por "spray". Embora Igharo e Wood [5] em seus experimentos tenham alcançado boas propriedades no material na condição de como fabricado e tenham verificado apenas pequenas modificações após forjamento; observam que, ainda assim uma taxa de redução da ordem de 80% é menor que a necessária no caso da obtenção do material por lingotamento convencional, que é da ordem de 94%.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O material avaliado foi o aço ferramenta AISI M2 obtido pelo processo de conformação por "spray", o "billet" obtido, com diâmetro de aproximadamente 250mm e altura em torno 80mm teve como material de partida um tarugo comercial obtido por metalurgia convencional. O equipamento utilizado para a conformação situa-se nas instalações do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) em São Paulo. A Planta de Conformação por "Spray" é a primeira no Hemisfério Sul e foi fornecida pela Osprey Metals Ltd., vide figura 2. Esta, é voltada para a pesquisa e desenvolvimento de aços, ligas reativas e materiais compósitos e tem capacidade para processamento de até 50 kg de material.

Métodos

O material obtido foi avaliado preliminarmente quando a composição química, ao aspecto microestrutural e algumas propriedades físicas e mecânicas. Nesta etapa, como já era de se esperar foi verificado que o material se encontrava com dureza bastante elevada, tendo em vista as características de temperabilidade do material obtido e a elevada taxa de resfriamento proporcionada pelo processo. Deste modo, foi então necessário submetê-lo a um tratamento térmico de recozimento para que o

mesmo pudesse ser trabalhado (usinado).

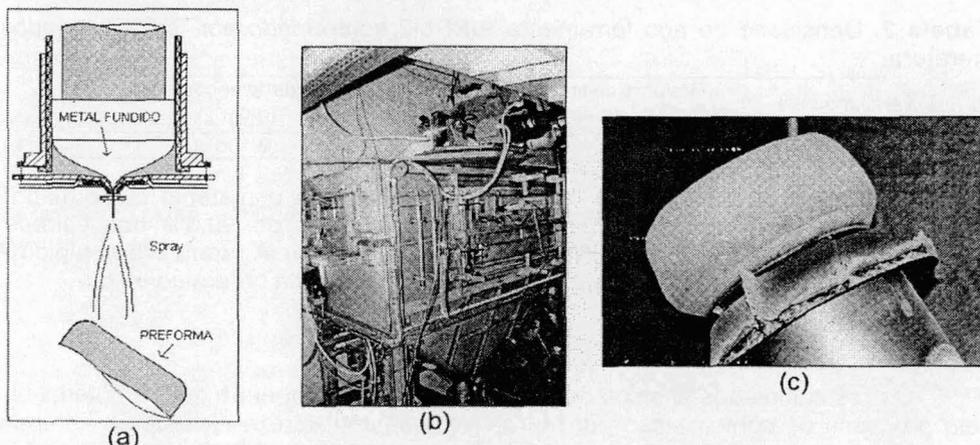


Figura 2. Vista parcial do equipamento instalado no IPEN – São Paulo. (a) Esquema básico de funcionamento do equipamento; (b) aspecto externo da câmara de conformação; (c) aço ferramenta AISI M2 logo após ter sido processado na planta.

A partir do material já recozido, foram preparadas amostras para processamento termomecânico (laminação) com taxas de redução de 50% e 70% as quais resultaram em placas com aproximadamente 7mm de espessura. Destes materiais foram tiradas amostras que foram embutidas em baquelite, polidas e analisadas por microscopia, buscando estabelecer as diferenças em relação ao material no estado como fabricado (conformado por "spray"), e também em relação ao material comercial (fundido e forjado). Em uma etapa posterior, a partir dos materiais laminados foram retirados corpos de prova (longitudinais) para ensaios de flexão. Os corpos de prova foram então tratados termicamente com dureza final de aproximadamente 64 HRC, acabados com dimensões finais de 4 x 8 x 40 mm e ensaiados conforme norma ^[19].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição química do material conformado por "spray"

A tabela 1 mostra a composição química do aço rápido AISI M2 obtido por conformação por "spray" e correlação com os valores nominais obtidos na literatura (% em peso) ou em outros trabalhos ^[20-22].

Tabela 1. Composição química do aço rápido AISI M2 (% em peso).

AISI M2	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	P	S
Nominal ^[23]	0,78 - 0,88 0,95 - 1,05	0,15 - 0,40	0,20 - 0,45	3,75 - 4,50	0,30 max.	4,50 - 5,50	5,50 - 6,75	1,75 - 2,20	0,03 max.	0,03 max.
Conformado por "spray"	1,03	0,18	0,22	3,29	0,29	4,98	6,19	1,87

... Não detectado.

Densidade

Tabela 2. Densidade do aço ferramenta AISI M2 conformado por "spray" e dados de literatura.

material	Valores de literatura ^[23] [g/cm ³]	Densidade encontrada [g/cm ³]
AISI M2	8,160	8,106

Pelos valores da tabela 2 é possível verificar que o material conformado por "spray" apresentou densidade que corresponde a cerca de 99,3% dos valores de densidade da literatura. Igharo e Wood ^[5], que também investigaram o aço rápido AISI M2 obtido por conformação por spray encontraram valores da ordem de 99,6%.

Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza (tabela 3), mostraram que o material obtido pelo processo de conformação por "spray", apresentou dureza elevada se comparado aos valores de literatura ^[22, 23] no estado como recozido, que é da ordem de 16 à 23 HRC, estado este que favorece a trabalhabilidade (usinagem) do material. Igharo e Wood ^[5] na investigação do aço AISI M2 obtido pelo processo Osprey, também encontraram valores bastante altos de dureza no material como fabricado (57 à 58 HRC), e, atribuem o fenômeno a uma característica intrínseca do processo que é a alta taxa de resfriamento, o que favorece a formação de uma estrutura martensítica neste tipo de material.

Para facilitar a trabalhabilidade, e tornar possível a retirada (corte) de amostras do pré-formado para o início dos trabalhos de pesquisa, foi feito recozimento do pré-formado; após o que houve uma queda acentuada nos valores de dureza do material (tabela 3), e cujos valores podem ser comparados aqueles retirados da literatura ^[23, 24] para os materiais no estado como recozido, e que foram citados anteriormente.

Tabela 3. Valores de dureza do aço AISI M2 conformado por "spray" e após recozimento.

Condição	Dureza (HRC)
Como fabricado	40 ± 5
Após recozimento	25 ± 2

Microestrutura do material no estado como fabricado (conformado por "spray")

Amostras devidamente polidas e atacadas foram observadas em microscópio óptico, onde foi possível verificar uma estrutura bastante homogênea com células de carbonetos refinadas (figura 3).

Microestrutura após processamento termomecânico (laminação)

Pelas micrografias feitas em microscópio óptico após laminação das amostras, é possível verificar que para a taxa de redução de 50%, a concentração de células de

carboneto está mudando, embora ainda seja possível a identificação das mesmas (figura 4a). Para a taxa de redução de 70%, a distribuição dos carbonetos é bastante homogênea em toda a superfície da matriz, de modo que já não é mais possível a identificação precisa das células de carboneto (figura 4b). Neste caso, a microestrutura ficou similar ou muito próxima à do material comercial (figura 4c), mas sem a presença de carbonetos grosseiros.

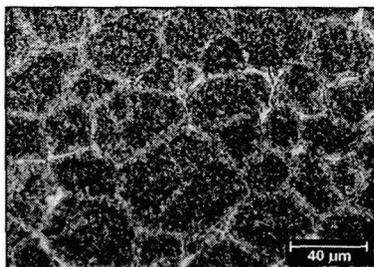


Figura 3. Micrografia óptica do aço ferramenta AISI M2 conformado por "spray".

Vale ressaltar que o material comercial é obtido por metalurgia convencional, e que para atingir a microestrutura apresentada passa por tratamentos termomecânicos da ordem de no mínimo 90% de taxa de redução [5], e também por um tratamento térmico de esferoidização extremamente demorado e caro.

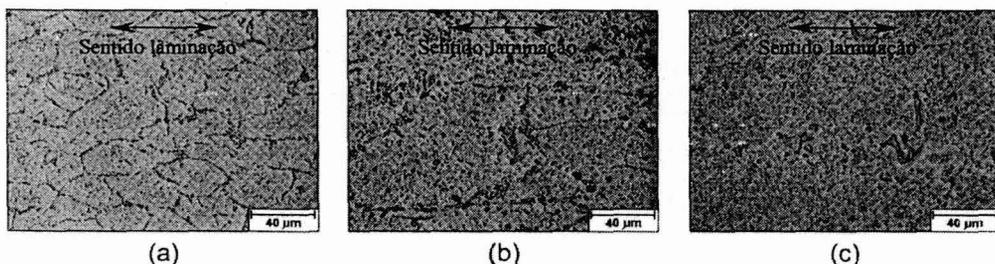


Figura 4. Micrografias ópticas obtidas de aços AISI M2. a) Amostra conformada por "spray" laminada a 50% de taxa de redução. b) Amostra conformada por "spray" laminada a 70% de taxa de redução. c) Amostra de aço rápido AISI M2 comercial.

Ensaio de flexão

Os resultados dos ensaios para a determinação da resistência a ruptura transversal [20] (TRS) mostraram que o material obtido por conformação por "spray" quando submetido a taxas de redução da ordem de 50%; resultam em valores de resistência à flexão que chegam em alguns casos a ser superiores aos do material obtido convencionalmente, e, quando a taxa é aumentada para 70% os resultados são comparáveis aos do material obtido por metalurgia do pó (figura 5).

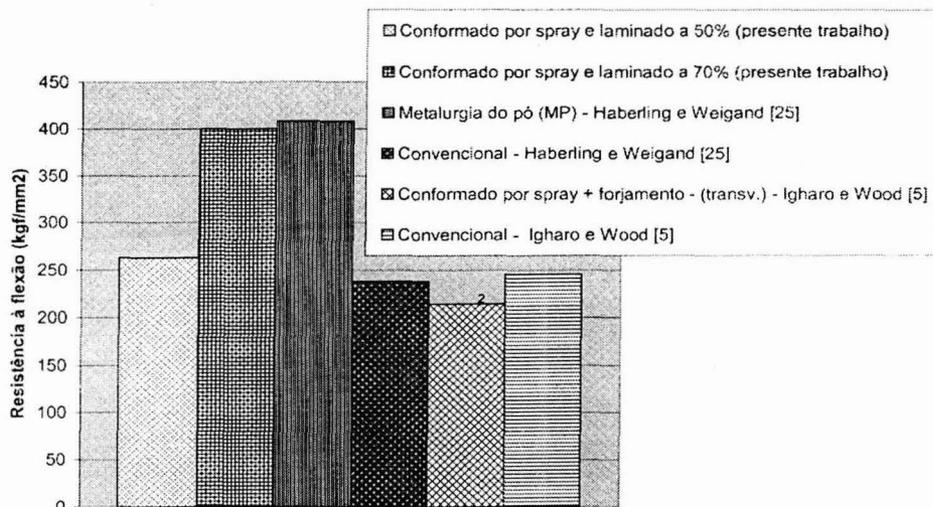


Figura 5. Resultados de ensaios para a determinação da resistência a ruptura transversal (TRS) em comparação a dados de outros pesquisadores.

CONCLUSÕES

Embora o processo de conformação por "spray", possibilite a obtenção de uma estrutura refinada e homogênea de carbonetos em relação ao processo convencional, tratamentos termomecânicos posteriores são essenciais para que se obtenha uma estrutura ainda mais refinada e homogênea, própria para uso em ferramentas de usinagem. Taxas de redução da ordem de 50 % não são suficientes para proporcionar uma distribuição homogênea dos carbonetos no aço rápido AISI M2 estudado. Com 70% de taxa de redução já é possível obter uma microestrutura mais apropriada.

A vantagem do processo de conformação por "spray" pode ser verificada uma vez que em apenas duas operações (obtenção e tratamento termomecânico), já é possível a obtenção de uma microestrutura similar, mas sem carbonetos grosseiros, a dos materiais convencionais, que por sua vez necessitam de no mínimo três operações, com taxas de redução maiores e prolongados tratamentos térmicos de esferoidização.

REFERÊNCIAS

- [1] DeGARMO, E. P.; BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. *Material and Processes in Manufacturing*. Eighth Ed., Prentice Hall, 1997. p. 3-5.
- [2] DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. Third Ed., McGraw-Hill, 1986. p. 679-708.
- [3] FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Vol. 1 - Ed. Edgard Blücher, 1970. p. XXV-XLIV / 566-8.
- [4] YABUUCHI, E.; KUROSHIMA, Y.; MASUDA, M.; KUBOBUTI, M.; IKAWA, Y. The cutting performance of high speed steel end mill produced by spray forming process. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.* Vol. 27, No 4, Dec. 1993.
- [5] IGHARO, M.; WOOD, J. V. Investigation of M2 high speed steel produced by Osprey

process. Powder Metallurgy, v. 32, n. 2, 1989.

[6] MATHUR, P.; APELIAN, D. Spray casting: a review of technological and scientific aspects. Powder Metallurgy: an Overview, The Institute of Metals, 1991.

[7] OHJA, S. N.; SINGH, S. N. On spray deposition of high-speed steel. J. Mat. Science Letters, v. 10, 1991. p. 893-5.

[8] GRANT, P.; PALMER, I.; STONE, I. Spray formed aerospace alloys are high flyers - Materials World, June 1999. p. 331-3.

[9] LEATHAM, A. G.; LAWLEY, A. The Osprey process: principles and applications. The Int. J. of Powder Metal. American Powder Metal. Inst., vol. 29, n. 4, 1993. p. 321-9.

[10] LEATHAM, A. G.; ROSSI, J. L. A exploração comercial do processo "Osprey"-Metalurgia & Materiais, janeiro 1997. p. 34-8.

[11] HRIBERNIK, B.; FAULAND, H. P.; HACKL, G.; KRISZT, B. Properties of the spray formed high speed steel grade S11. P/M Mat. Adv. in P. Metal., v. 5, 1991. p. 295-308.

[12] SRIVATSAN, T. S.; SUDARSHAN, T. S.; LAVERNIA, E. J. Processing of discontinuously - reinforced metal matrix composites by rapid solidification. Progress in Mat. Science, vol. 39, 1995. p. 317-409.

[13] GRANT, P. S. Spray forming. Progress in Mat. Science, vol. 39, 1995. p. 497-545.

[14] HO BAIK, K.; LEE, E.; AHN, S. Microstructure and mechanical properties of high speed steel by spray forming. Int. Conf. & Ex. on Powder Metal. & Part. Mat., Seattle, v. 2, 1995. p. 7.119 - 7.126.

[15] LEE, E.; PARK, W.; JUNG, J. Y.; AHN, S. Solidification microstructure and M_2C carbide decomposition in a spray-formed high-speed steel. Met. and Mat. Trans. A, v. 29A, May 1998. p. 1395-1904.

[16] ITAMI, T.; IKAWA, Y.; KUMAGAI, K. Production of high speed steel endmills by spray forming technique (Osprey process). Proc. 2nd Japan Int. SAMPE, Dec. 1991. p. 395-401.

[17] LEE, E.; PARK, W.; BAIK, K.; AHN, S. Different carbide types and their effect on bend properties of a spray-formed high speed steel. Scripta Materialia, v. 39, n. 8, 1998. p. 1133-8.

[18] HO BAIK, K.; LEE, E.; PARK, W.; AHN, S. Formation of eutectic carbides in spray cast high speed steel. Proc. 3rd Int. Conf. on Spray Forming, Cardiff UK, 1996. p. 251-6.

[19] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION - Determination of Transverse Strength of Powder Metallurgy Materials. Standard Test method 41. 1991.

[20] JESUS, E. R. B.; JESUS FILHO, E. S.; GOMES, E. G.; SANTOS, W. S.; ROSSI, J. L. Properties and microstructure characterisation of spray formed M2 and D2 tool steels. Proc. Int. Conf. on Spray Dep. and Melt Atomiz., Bremen, 2000. p. 869-78.

[21] LIMA, R. M.; JESUS, E. R. B.; ROSSI, J. L. Effect of heat treatment on the microstructure of spray formed AISI M2 high speed steel. Mat. Science Forum, v. 416-418, n.1, 2003. p. 95-100.

[22] JESUS, E. R. B.; LIMA, R. M.; JESUS FILHO, E. S.; GOMES, E. G.; ROSSI, J. L. Microstructural characterisation of spray formed M2 tool steel. Acta Microscopica, v. 9, Supplement A, December 2000.

[23] METALS HANDBOOK. Wrought Tool Steels. 10th Ed., v. 1, ASM, 1990. p. 758-79.

[24] ROBERTS, G. A.; CARY, R. A. Tool Steels. 4th Ed., ASM, 1980. p. 628-791.

[25] HABERLING, E.; WEIGAND, H. H. Correlation between mechanical properties, microstructure and performance of high-speed tool steels. Int. Conf. Towards Improved Performance of Tool Material, Teddington, Middlesex, April 28-29, 1981. p. 170-5.

PHYSICAL, MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL EVALUATION OF AISI M2 HIGH SPEED STEEL OBTAINED BY SPRAY FORMING.

Edilson Rosa Barbosa de Jesus⁽¹⁾; Edson Souza de Jesus Filho⁽²⁾; Jesualdo Luiz Rossi⁽³⁾

ABSTRACT

The objective of present work, is to show some results regarding the initial operation of a spray forming plant installed in Brazil. At this time it was possible the obtainment of several alloys, among them tool steels that has been used in many studies. The results of preliminary studies showed the microstructural advantages yielded by the process and it's influence on material final properties when compared to materials obtained by convencional processes. Is presented a revision about the process, showing actual research situation, and associated process characteristics.

KEY WORDS: spray forming, tool steel, microstructure.

1.º Encontro dos Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes – 28 a 30 de outubro de 2003 – São Paulo – SP.

(1) Mechanical Engineer, Ph.D. student at IPEN/USP – SP

(2) Mechanical Engineer, Ph.D. student at IPEN/USP – SP

(3) Materials Engineer and Researcher of IPEN - SP