

Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?

Daniel Yvan Martin Delforge

Depart. Eng. Mecânica, Faculdade de Eng. de Ilha Solteira, UNESP. E-mail: delforge@dem.feis.unesp.br

Itamar Ferreira

Depart. Eng. de Materiais, Faculdade de Eng. Mecânica, UNICAMP. E-mail: itamar@dem.unicamp.br

Cesar Garcia Rocha da Silva

Depart. Eng. Mecânica, Faculdade de Eng. de Ilha Solteira, UNESP. E-mail: cesar.roc@bol.com.br

Eduardo Antônio Geris Paris

Depart. Eng. Mecânica, Faculdade de Eng. de Ilha Solteira, UNESP. E-mail: eduardo_paris@hotmail.com

André Luis Marcelo

Depart. Eng. Mecânica, Faculdade de Eng. de Ilha Solteira, UNESP. E-mail: andréluiz_rp@hotmail.com

Rafael Henrique Novaes

Depart. Eng. Mecânica, Faculdade de Eng. de Ilha Solteira, UNESP. E-mail: peets_unesp@hotmail.com

Resumo

A reutilização dos materiais recicláveis tem como principais objetivos minimizar os impactos ambientais e racionalizar a utilização das cadeias energéticas, sendo que essa prática deverá, com toda a certeza, ser cada vez mais implementada à medida que o mundo moderno avança. No presente trabalho, foram sinterizadas amostras de misturas de cavacos de aço inoxidável da série 316, com pó do mesmo material. Nesse caso, a porcentagem de cavaco variou de zero a 25% em peso, de 5 em 5%. Após a compactação, na pressão de 600MPa, as amostras foram sinterizadas todas elas ao mesmo tempo, numa só fornada na temperatura de 1473 K. O comportamento mecânico do produto final foi avaliado através de Ensaios de Ruptura Transversal recomendados e normalizados pela MPIF - Metal Powder Industries Federation e pela ASTM. As análises efetuadas pela Metalografia Quantitativa Convencional das amostras sinterizadas demonstraram regiões de intensa difusão, portanto regiões de sinterização de longo alcance. A resistência mecânica dos corpos-de-prova foi comparada com a resistência mecânica do aço inoxidável sinterizado, sem cavaco. Os resultados obtidos foram muito acima do esperado, demonstrando a viabilidade desse novo procedimento.

Palavras-chave: Metalurgia do pó, sinterização, cavaco de aço inoxidável.

Abstract

The reuse of materials has as its main objective to minimize environmental impacts and to rationalize the use of energy chains. In the present work, samples of scraps of 316 stainless steel mixed with powder of the same material were sintered. For this case, the percentage of scrap was varied from zero to 25% in weight, with 5% increases. After compacting, under a pressure of 600MPa, the samples were sintered simultaneously at a temperature of 1473 K. The mechanical behavior of the final product was evaluated through Assays of Transversal Rupture recommended and normalized by the MPIF - Metal Powder Industries Federation. Using Conventional Quantitative Metallography, the analyses of the sintered samples demonstrated regions of intense diffusion, therefore, regions of sufficiently intense sintering. The mechanical resistance of the samples was compared with the mechanical resistance of the sintered stainless steel with no scrap. The results were greater than expected, demonstrating the viability of this new procedure.

Keywords: Powder metallurgy, sintering, stainless steel scrap.

1. Introdução

A metalurgia do pó é o processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas, não metálicas e cerâmicas, que vem se desenvolvendo numa taxa cada vez mais crescente. Distingue-se dos processos convencionais pela ausência de fase líquida ou presença apenas parcial de fase líquida durante o processamento⁽¹⁾. Trata-se de uma técnica de fabricação que permite a produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas dentro de tolerâncias bastante apertadas, produção de componentes com certas características estruturais e físicas impossíveis de serem obtidas através de qualquer outro processo metalúrgico⁽²⁾. Caracteriza-se, também, pela fabricação e obtenção de peças em grandes quantidades e é um processo que permite um elevado índice de isotropia estrutural, além de possibilitar a fabricação de peças complexas e de peças simples com o mesmo grau de dificuldade. Em princípio, na metalurgia do pó, não há necessidade de operações secundárias e de acabamento posterior.

A metalurgia do pó pode ser dividida em duas etapas fundamentais: moldagem ou compactação e aquecimento ou sinterização. A compactação⁽³⁾ se dá pela aplicação de pressão nos pós, por intermédio de punções, no interior de matrizes cujas cavidades correspondem normalmente à forma e dimensões das peças finais e resulta no denominado compactado verde. A sinterização, que é realizada em fornos especiais, geralmente ocorre em temperaturas que variam entre 70% e 80% da temperatura de fusão do metal ou liga metálica considerada, sob condições muito bem controladas de temperatura, tempo e ambiente, sendo esta última etapa a que propicia a resistência mecânica e outras propriedades ao material compactado.

No início do século XX, foram desenvolvidos processos para obtenção de peças de tungstênio e de molibdênio por sinterização, mas a produção só se expandiu mesmo após a Segunda Grande Guerra, com a finalidade de atender às demandas da florescente indústria automobilística.

Na atualidade, são inúmeras as aplicações industriais de peças sinterizadas. O controle exato da composição química desejada do produto final, a redução ou eliminação das operações de usinagem, o bom acabamento superficial, a pureza dos produtos obtidos e a facilidade de automação do processo produtivo são alguns dos motivos que tornaram a metalurgia do pó uma fonte produtora de peças para, praticamente, todos os ramos da indústria⁽⁴⁾, como o automobilístico, o de informática, o aeroespacial, o de material eletroeletrônico, o de equipamentos e implementos agrícolas, o têxtil e uma infinidade de outros. Atualmente, segundo a Metal Powder Industries Federation - MPIF, nos Estados Unidos são produzidas, anualmente, mais de um milhão de toneladas de peças sinterizadas, ou seja, um crescimento bastante acentuado, considerando-se que, em meados da década de 80, essa produção beirava 350 mil toneladas: A Figura 1 ilustra peças típicas obtidas através da metalurgia do pó.

Tendo em vista o crescimento constante da metalurgia do pó, para a fabricação de diversas peças, houve uma maior motivação de toda a comunidade científica em aperfeiçoar as técnicas envolvidas no processo, bem como em buscar um melhor aproveitamento da matéria-prima utilizada. Nesse contexto, o estudo tecnológico-científico aqui proposto prevê a utilização de uma determinada quantidade de cavaco de aço inoxidável da série 316, misturada ao pó do mesmo material, para a produção e estudo de corpos-de-prova sinterizados.

A sinterização é um processo em que a economia de material é levada ao extremo, com mínimas perdas de matéria-prima. Certas ligas podem ser obtidas pela metalurgia do pó⁽⁵⁾ a custos muitas vezes inferiores àsquelas produzidas pela metalurgia convencional.

A teoria da sinterização⁽⁶⁾ comprova que, ao se aquecer o compactado verde⁽⁷⁾, a uma temperatura maior que a metade da temperatura de fusão do material, ocorre união entre as partículas metálicas e estas tendem a alcançar as características físicas, químicas e mecânicas intrínsecas do material^{(8),(9)}. Uma delas é a densificação, que ocorre via transporte de massa, idealizada na Figura 2.



Figura 1 - Peças típicas obtidas através da metalurgia do pó. Trata-se de buchas, pinos, juntas metálicas, bielas de compressores e de motores a combustão interna e uma infinidade de outras, que exigem um certo padrão de qualidade, e que, em inúmeras vezes, poderiam ser fabricadas a partir da sinterização de certas misturas de cavaco proveniente dos processos de usinagem com metais em pó. Foto: GC3M - DEM/FEIS/UNESP. (Foto cedida pela METALPÓ IND. e COM.)

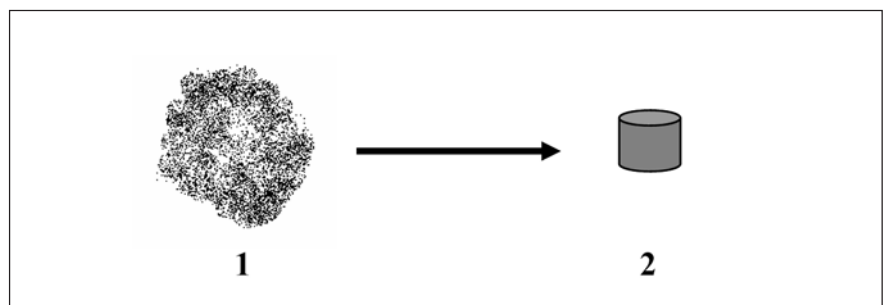


Figura 2 - Evolução de uma certa quantidade de pó para a sua correspondente quantidade densificada.

Nesse caso, observa-se que $A_1 \gg A_2$ e que $M_1 = M_2$ [A =área e M =massa]. A área superficial do pó solto caracteriza-se por um “excesso de energia” superficial, correspondente às ligações atômicas não satisfeitas. Desse modo, do ponto de vista macroscópico, a redução de área, conseqüente da compactação, é proporcional ao potencial termodinâmico do processo o qual pode ser escrito como segue:

$$\Delta F = \Delta A \cdot \gamma \quad (1)$$

Na qual:

ΔF = potencial termodinâmico [J].

ΔA = área superficial considerada [m^2];

γ = energia absorvida pelo sistema [J/m^2].

Quanto ao potencial para o transporte de massa, sabe-se que esse mecanismo intervém em resposta a um gradiente de concentração tendendo a anulá-lo. Em outras palavras, considerando-se uma liga metálica composta pelos elementos A e B, nas regiões ricas em B, o potencial químico (μ_B) desse elemento é maior do que nas regiões pobres em B. Desse fato, decorre que há um fluxo de átomos que visa a equilibrar as concentrações, fazendo com que m tenda a zero ($m \rightarrow 0$). O fluxo J de átomos é dado pela equação 2:

$$J = -D \cdot \left(\frac{dc}{dx} \right) \quad (2)$$

Na qual:

J = fluxo de átomos (átomos/s).

D = coeficiente de difusão atômica (cm^2/s).

(dc/dx) = gradiente de concentração atômica.

Com base nessa teoria, o trabalho aqui apresentado tem como finalidade o estudo de uma metodologia eficiente e vantajosa, tanto para o meio ambiente, quanto financeiramente, de reciclagem de cavaco de aço inoxidável da série 316⁽¹⁰⁾ via metalurgia do pó. A avaliação da resistência mecânica dos corpos-de-prova será avaliada através dos resultados de uma série de ensaios de ruptura transversal, apoiados em três pontos, e serão, também, apresentadas algumas fotomicrografias exibindo regiões de sinterização bastante intensa entre cavacos e pó.

2. Materiais e métodos

No presente trabalho, foram utilizados cavacos de aço inoxidável da série 316 e pó do mesmo material, comercialmente puro. O estearato de lítio foi utilizado como lubrificante sólido. Os cavacos passaram por um processo de limpeza com uma solução de 25% de acetona, 25% de álcool etílico, 15% de ácido oléico e 2% de ácido nítrico, dissolvidos em 33% de água destilada, com o objetivo de promover a retirada de restos de fluido de corte e de outras impurezas.

O pó utilizado na confecção das amostras, juntamente com o cavaco, passou por um processo de secagem em estufa na temperatura de 348K (75°C) durante seis horas. Após o resfriamento, esse material foi dividido em seis amostras ($A_1; A_2; \dots; A_6$) de cinco corpos-de-prova cada uma, sendo que, na amostra A_1 , não houve adição de cavaco, a amostra A_2 continha 5,0% de cavaco, até a amostra A_6 com 25% de cavaco em massa. A composição química do aço inoxidável utilizado está relacionada na Tabela 1 e a Tabela 2 exhibe a distribuição granulométrica percentual do pó utilizado.

Em seguida, foi misturado a cada amostra, separadamente, de 0,8% a 1,0% em peso de estearato de lítio e 0,2% de Kenolube em misturador Y, a uma rotação de 60rpm por um período de 30 minutos, que é o tempo suficiente para se garantir uma boa homogeneização da mistura. Para lubrificação da cavidade da matriz e dos punções, utilizou-se uma solução contendo 10% de estearato de zinco e 90% de acetona⁽¹¹⁾. Os corpos-de-prova foram compactados em forma de pequenos paralelepípedos, em matriz fechada acoplada a uma prensa hidráulica convencional da marca Solitest com capacidade de até 1200kN (120 toneladas). A carga de compactação foi de 250kN (25 toneladas) em uma área de praticamente 4,2 cm^2 . Portanto a pressão de compactação ficou próxima de 600MPa

Tabela 1 - Especificação da composição química do aço inoxidável da série 316 utilizado.

AIISI	C (%)	Mn[máx](%)	P[máx](%)	S[máx](%)	Si[máx](%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo(%)
316	0,03	2,00	0,045	0,030	1,00	17,50	12,50	2,50

Tabela 2 - Distribuição granulométrica do pó de aço inoxidável utilizado.

Malha ASTM	Mínimo	Máximo
+100	-	3
+150	8	12
+325	32	36
-325	35	45

(6,0ton/cm²). Essa etapa foi realizada no laboratório de metalurgia do pó do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - DEM/FEIS/UNESP.

A sinterização dos corpos-de-prova foi realizada de batelada, numa atmosfera protetora composta de, aproximadamente, 70% de nitrogênio e 30% de hidrogênio⁽¹²⁾. Primeiramente realizou-se um pré-aquecimento lento das amostras a uma temperatura de 623K(350°C) por um período de uma hora, com o objetivo de realizar a queima do estearato de lítio e demais resíduos de lubrificante sólido e estabilizar os corpos-de-prova para evitar empenamentos e outras ocorrências provenientes do aquecimento. Em seguida, prosseguiu-se o aquecimento lento até 1473K(1200°C), por uma hora. As amostras permaneceram a essa temperatura por um período de quarenta minutos, seguido de resfriamento lento por cerca de uma hora até a temperatura ambiente de aproximadamente 305K(32°C).

Os corpos-de-prova sinterizados foram preparados e analisados de acordo com as técnicas da metalografia quantitativa convencional. Foram feitas fotomicrografias de algumas regiões de interesse, sem ataque, e, em seguida, as mesmas regiões foram atacadas por processo eletrolítico em uma solução composta de 40% de ácido nítrico P.A em 60% de água destilada e uma corrente de 1,2 volts por noventa segundos, com a finalidade de se visualizarem as regiões sinterizadas, em nível micrográfico. Esse ensaio metalográfico possibilitou a visualização das regiões entre o pó metálico e os cavacos, efetivamente sinterizadas.

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados numa máquina universal de ensaios, MTS, do Departamento de Engenharia de Materiais -DEMA- da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP de Campinas - SP.

3. Resultados e discussão

Algumas fotomicrografias mais ex-

pressivas estão apresentadas nas Figuras 3 e 4. Uma primeira análise revela que a sinterização de misturas de pós de aço inoxidável e cavacos do mesmo material é possível. Pode-se visualizar regiões de sinterização muito intensa, entre cavaco e a matriz formada pelo pó sinterizado. A fração volumétrica de vazio se manteve em torno de 12%, o que é um valor aceitável para materiais metálicos sinterizados.

O gráfico da Figura 5 revela que a sinterização do pó puro, como já era esperado, oferece uma maior resistência à ruptura transversal, cerca de 7000N (700kgf). Observa-se, ainda, que a resistência mecânica diminui à medida que se aumenta a porcentagem de cavaco. Entretanto essa perda de resistência, nas amostras de 5% de cavaco, é de cerca de 1000N (100kgf) e, nas amostra com 10% de cavaco, cerca de 2000N(200kgf), em relação às amostras isentas de cavaco. Isto sugere que, para determinados fins, pode ser empregada uma certa porcen-

tagem de cavaco sem se comprometer a resistência mecânica requerida pelo projeto de certos tipos de peças que possibilitem essa prática, sem se comprometer, também, o desempenho das mesmas.

4. Conclusão

No presente trabalho pôde-se avaliar que a reciclagem de aço inoxidável da série 316 misturados ao pó desse mesmo aço, via metalurgia do pó, pode ser uma rota alternativa para o reaproveitamento do cavaco desse tipo de material. Além disso, tal reaproveitamento é um procedimento que envolve menor aporte de energia, pois, nesse caso, o cavaco não passa por processos de fundição e dos ensaios de flexão em três pontos. Dessa forma, conclui-se que:

1. A resistência mecânica dos corpos-de-prova diminui à medida que se aumenta a porcentagem de cavaco de inox.

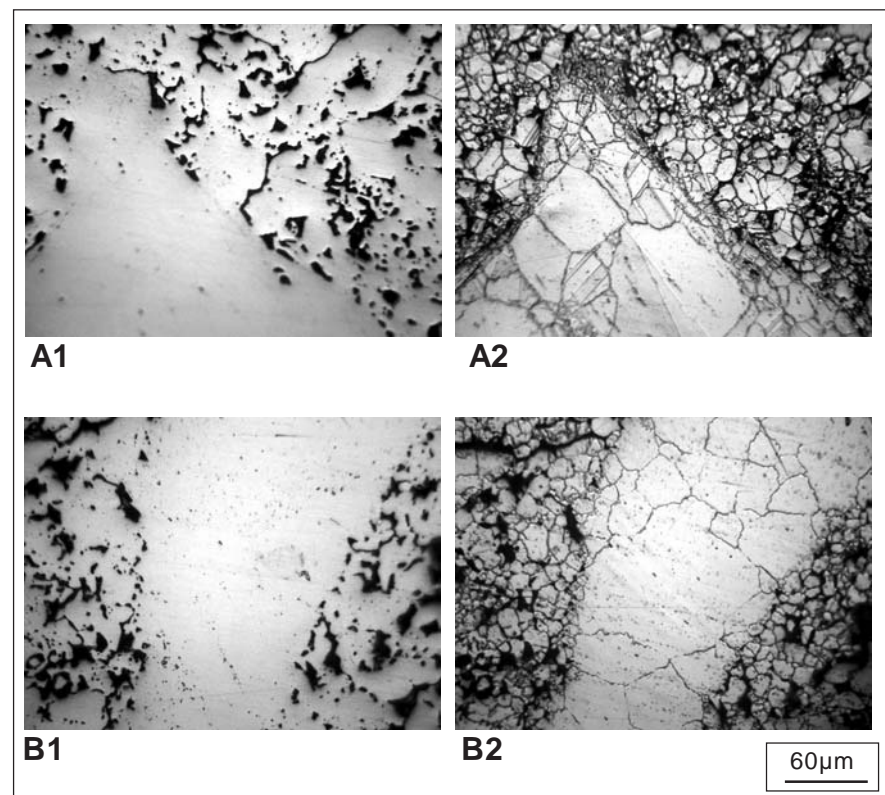


Figura 3 - Fotomicrografias de amostras de cavaco de aço inoxidável e de pó do mesmo material, sinterizados. A1 e B1, sem ataque. A2 e B2, com ataque eletrolítico em solução de ácido nítrico P.A 40% , água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance.

2. Quando se acrescenta 15 ou 20% de cavaco de inox em massa ao pó desse mesmo material, a resistência mecânica sofre uma mínima alteração, se compararmos com as alterações ocorridas com os corpos-de-prova que possuem a mesma variação da porcentagem de cavaco adicionada (5 e 10%; 20 e 25%).
3. A deformação sofrida pelos corpos-de-prova produzidos com pó puro, ou seja, 0% de cavaco, é muito maior quando comparada com os outros corpos-de-prova produzidos a partir da mistura pó + cavaco. Porém, à medida que se vai aumentando a porcentagem de cavaco, não há uma grande variação da deformação.
4. A utilização da mistura pó + cavaco de aço inox torna-se viável para certos tipos de peças e para algumas aplicações. Além disso, percebe-se, também, que, além da vantagem financeira, o uso do cavaco é uma for-

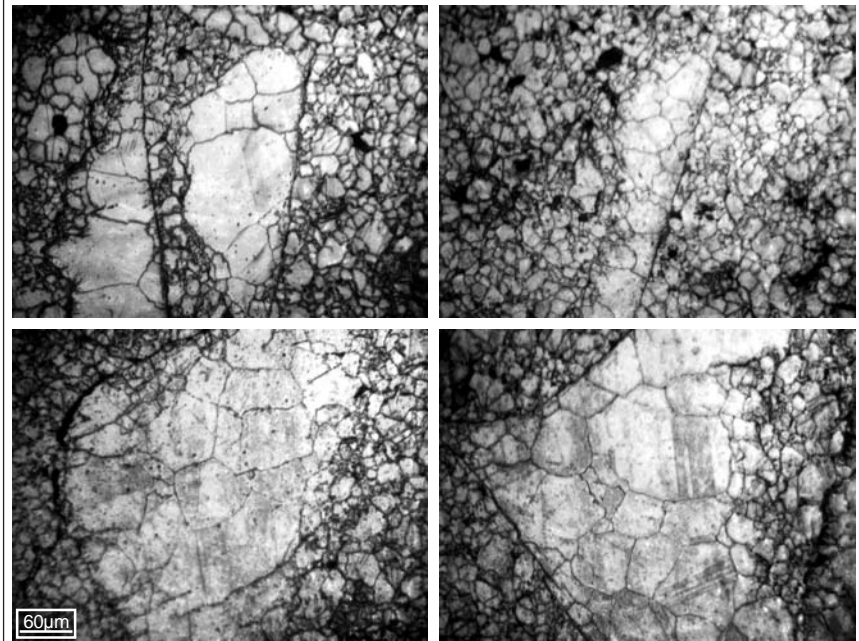


Figura 4 - Fotomicrografias de amostras de cavaco de aço inoxidável e de pó do mesmo material, sinterizados, todas com ataque eletrolítico em solução de ácido nítrico P.A 40% , água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos. Observam-se, nas regiões adjacentes aos cavacos (regiões mais claras), áreas com sinterização de longo alcance.

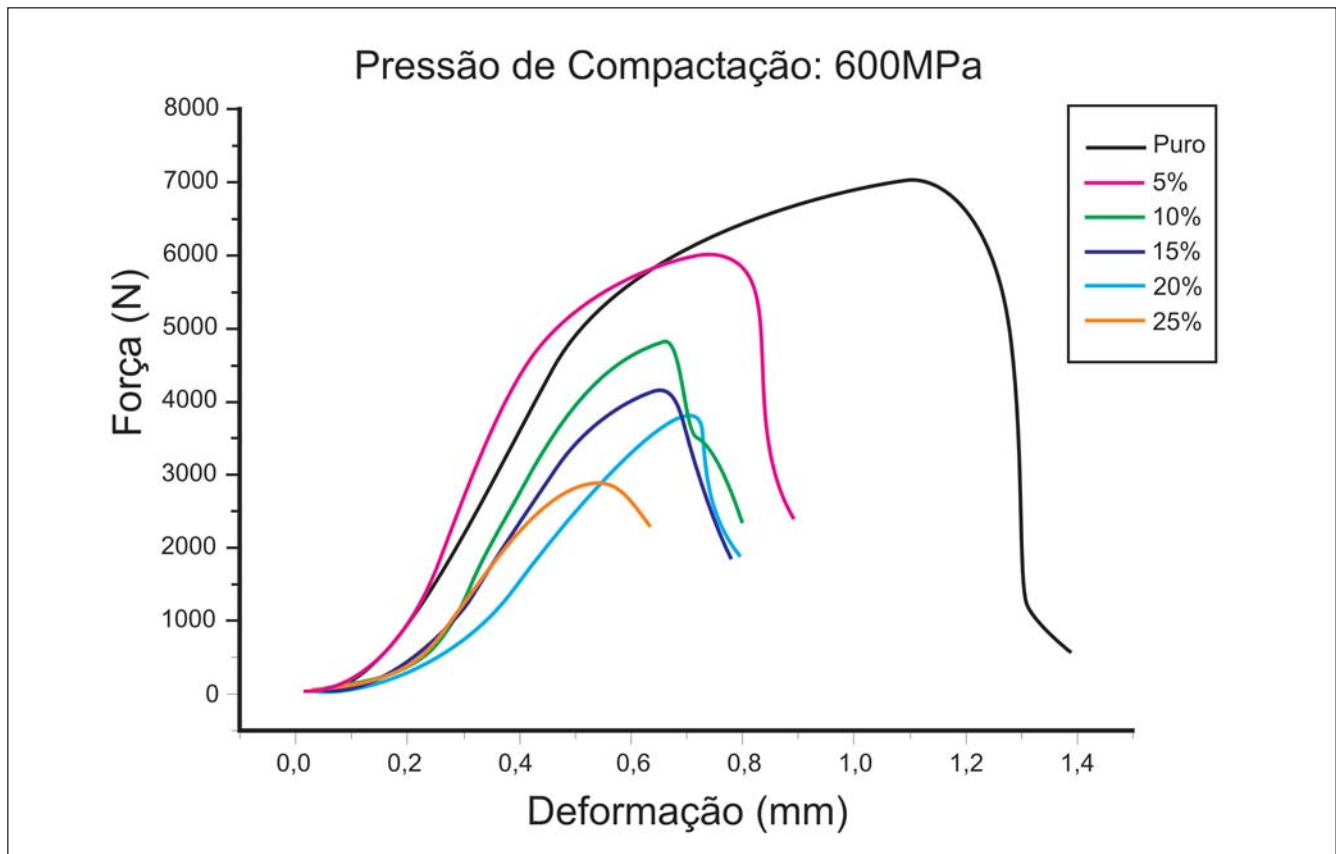


Figura 5 - Influência da variação da porcentagem de cavaco na resistência à ruptura transversal.

ma de se diminuir o impacto sobre o meio ambiente, diminuindo a quantidade de resíduos sólidos, uma preocupação cada vez mais crescente nos dias atuais.

Atualmente estão sendo conduzidos vários outros experimentos da mesma natureza com outros metais, como ligas ferrosas e ligas cuprosas. Posto isto, estudos futuros deverão revelar dados mais elaborados e, portanto, mais conclusivos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FUNDUNESP pelo apoio financeiro; à METALPÓ IND. E COM. pelo fornecimento dos pós de aço inoxidável e pela sinterização das amostras em ambiente industrial; ao DEMA/FEM/UNICAMP pelos ensaios mecânicos.

6. Referências bibliográficas

- [1] GHADIRI M., FARHADPOUR, F.A., CLIFT R., SEVILLE, J.P.K. Particle characterization size and morphology, The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview. London, p.56-75, 1991.
- [2] STADTLER W.A. Production of Metallurgy Parts. *ASTM, Powder Metallurgy*, Ohio, p.449-463, 1989.
- [3] LENEL F.V. The early stage of the mechanism of sintering, in powder metallurgy for high-performance application. *Syracuse University Press*, Binghamton, N.Y., p.119-137, 1972.
- [4] KEMPTON H.R. Powder systems and applications. *ASTM, Metals Handbook*, 9 ed., Ohio, p.568-574, 1988.
- [5] Powder metallurgy - an overview. 1. ed. The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy, London, Great Britain, 1991.
- [6] KUCZYNSKI G.C. Fundamentals of sintering theory, in powder metallurgy for high-performance application. *Syracuse University Press*, Binghamton, N.Y., p.101-117, 1972.
- [7] Metal Powder Industries Federation. *Method for determination of green strength of compacted metal powder specimens*. Princeton, N.J., 08540, USA, 1985.
- [8] FERRANTE M., SINKA V. *Tenacidade à fratura dos aços sinterizados*. São Carlos, SP: UFSC.
- [9] Kaysser W.A., *Solid State Sintering*. The institute of metals series on powder metallurgy - an overview. London, p.45-53, 1991.
- [10] Metal Powder Industries Federation, *Method for determination of green strength of compacted metal powder specimens*, Princeton, N.J., 08540, USA, 1985.
- [11] THOMPSON C.B. Lubrication of metal powder. *ASTM, Metals Handbook*, 9ed. Ohio, USA, p.190-193, 1988.
- [12] WILYMAN, P.Q., VANDERMEIREN, M. *Selection of atmospheres for sintering*. The institute of metals series on powder metallurgy - an overview. London, p.208-218, 1991.

Artigo recebido em 30/07/2006 e
aprovado em 05/10/2006.

Rem - Revista Escola de Minas
70 anos divulgando CIÊNCIA.



www.rem.com.br
