

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CARBETO DE VANÁDIO NA
MOAGEM E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 52100,
PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ**

L. F. de Oliveira

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, Caixa Postal 50, CEP: 37500 903,
leandra-186@hotmail.com

G. Rodrigues

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, Caixa Postal 50, CEP: 37500 903,
e-mail: grodrigues@unifei.edu.br

G. Silva

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, Caixa Postal 50, CEP: 37500 903,
e-mail: gilbert@unifei.edu.br

B. H. B. Kuffner

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, Caixa Postal 50, CEP: 37500 903,
e-mail: brunakuffner@hotmail.com

RESUMO: O Aço AISI 52100 é um aço ferramenta que após sua vida útil é refundido ou descartado. Uma das alternativas de reaproveitamento desse aço é a metalurgia do pó (MP). Neste trabalho, o aço foi moído em moinho de alta energia por 10, 20, 30, 40 e 50 horas, com e sem a adição de carbeto de vanádio. Os pós foram caracterizados quanto ao tamanho e morfologia das partículas e o pó que apresentou menor granulometria passou por um tratamento de alívio de tensão e foi

prensado na forma de pastilhas. As pastilhas foram sinterizadas e calcularam-se suas densidades, porosidades, durezas e módulos elásticos. Os resultados mostraram que o carbeto de vanádio aumenta a eficiência de moagem para menores tempos de moagem e também aumenta a porosidade das amostras, apresentando menor densificação. Os valores de dureza e módulo elástico foram significativamente maiores nas amostras sem adição de carbeto de vanádio.

Palavras-chave: Metalurgia do pó, Moagem de alta energia, Caracterização microestrutural e mecânica.

INTRODUÇÃO

O aço AISI 52100 é um aço fortemente utilizado na fabricação de ferramentas para trabalho a frio, como brocas, alargadores, ferramentas para repuxos em tornos, ferramentas para extrusão a frio, ferramentas para madeira, etc. (1). O mesmo apresenta alta resistência ao desgaste, suporta altas tensões de contato, mesmo em temperaturas altas não apresenta variação em suas dimensões iniciais (2). A composição química típica do aço AISI 52100 pode ser vista na Tabela 1 (3).

Tabela 1: Composição química do aço SAE 52100. Porcentagem em peso (3).

| | C | Cr | Mn | Si | Cu | Ni | Mo | P | S |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| MÁXIMO | 0,98 | 1,30 | 0,25 | 0,15 | - | - | - | - | - |
| MÍNIMO | 1,10 | 1,60 | 0,45 | 0,35 | 0,35 | 0,25 | 0,10 | 0,025 | 0,025 |

O reaproveitamento do aço, em geral é uma solução simples e economicamente viável para prevenir a escassez do minério de ferro e diminuir os gastos das usinas siderúrgicas (4). O reaproveitamento do aço AISI 52100, através da rota de metalurgia do pó, além de contribuir para uma menor agressão ao meio ambiente, transforma uma possível sucata do aço 52100 em material útil para a fabricação de outra peça.

A técnica de metalurgia do pó normalmente é dividida em três etapas, a moagem, a prensagem e a sinterização. Uma das técnicas que se destaca na etapa

de moagem é o processo de moagem de alta energia, que proporciona a obtenção de pós nanocristalinos. A prensagem do pó, ou compactação pode ser dividida em prensagem uniaxial e prensagem isostática. Na uniaxial o pó é compactado em uma matriz rígida a qual sofre uma pressão na direção axial. Na isostática o pó é compactado em um molde flexível sobre o qual atua um fluido que transmite a pressão em todas as direções do material (5).

A sinterização é uma etapa em que se define a microestrutura do material. Tal etapa consiste em um processo físico de consolidação do material por difusão no estado sólido, nesta etapa as partículas de pó adquirem uma estrutura sólida coerente, o que acarreta uma redução da área superficial específica, aumento da densidade e da resistência mecânica (5).

Na técnica de metalurgia do pó, materiais de alta dureza como alumina e carbeto de vanádio podem ser adicionados na etapa de moagem para aumentar a eficiência da moagem. Adicionalmente, estes materiais de alta dureza aumentam a resistência mecânica das pastilhas sinterizadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho o aço AISI52100 foi moído por 10, 20, 30, 40 e 50 horas com e sem a adição de 3% de carbeto de vanádio.

Moagem

Foram moídos, sob atmosfera de Ar, 40 g do aço puro e 40 g do aço com adição de 1,2 g de carbeto de vanádio, utilizando um moinho de alta energia Yangzhou Nuoya Machinery Co., Ltd, modelo Noah Nqm-2 Planetary Ball Mill, do laboratório de metalurgia do pó (IEM/UNIFEI). Os parâmetros da moagem foram: 1:15 (relação massa de aço x massa das esferas) e 400 rpm.

Tamanho de Partícula

Os ensaios de tamanho de partícula foram realizados em um equipamento Malvern modelo Mastersizer 2000 laboratório de caracterização estrutural (IEM/UNIFEI). Utilizou-se água destilada como fluido para dispersão do pó.

Microscopia Eletrônica de Varredura

Para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi utilizado um microscópio da marca Carl Zeiss modelo EVO MA15 do laboratório de caracterização estrutural (IEM/UNIFEI). Onde foram analisadas a morfologia e o tamanho das partículas dos pós do aço moído com e sem a adição de VC. A determinação da distribuição do VC nos pós foi determinada pela técnica de EDX.

Tratamento para alívio de tensão

Para proporcionar a obtenção das pastilhas no processo de prensagem, o pó com 50 horas de moagem foi previamente submetido a um tratamento térmico para alívio de tensão. O pó foi tratado a 500°C, sob vácuo, por uma hora utilizando um forno da marca EDG, modelo EDG 3P-S 3000 do laboratório de metalurgia e materiais (IEM/UNIFEI).

Prensagem Uniaxial

As amostras (~4 g) foram prensadas uniaxialmente utilizando uma matriz metálica com diâmetro de 12 mm, em uma prensa marca Schulz do laboratório de metalurgia do pó (IEM/UNIFEI).

A carga aplicada no ensaio foi de duas toneladas, a qual foi mantida por 30 segundos na amostra, sendo esse procedimento repetido três vezes para garantir uma compactação mais eficiente do pó.

Densidade

A densidade a verde foi medida utilizando a relação massa/volume. As medidas de densidade das pastilhas sinterizadas foram realizadas pelo método de Arquimedes. Para isso foi utilizada uma balança analítica Shimadzu, modelo AUY220 do laboratório de metalurgia do pó (IEM/UNIFEI).

Sinterização

A sinterização foi realizada apenas com os pós que apresentaram menor tamanho de partículas, ou seja, aqueles moídos por 50 horas com e sem adição de VC. A sinterização foi realizada a 1200°C, sob vácuo por 30 minutos utilizando um forno da marca EDG, modelo EDG 3P-S 3000, do laboratório de metalurgia e

materiais (IEM/UNIFEI). Após o tratamento térmico, as amostras foram resfriadas no próprio forno.

Módulo Elástico

O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade foi realizado na máquina da marca INSTRON, modelo 8801 do laboratório de ensaios destrutivos (IEM/UNIFEI). Após o ensaio de compressão, plotou-se a curva *TensãoxDeformação* das seis amostras sinterizadas.

Porosidade

A determinação da porosidade das amostras sinterizadas foi realizada utilizando microscopia óptica em um microscópio óptico metalúrgico da marca Janavert, modelo Infinity1, do laboratório de metalurgia do pó (IEM/UNIFEI). A análise foi realizada em quatro amostras do aço AISI 52100, duas do aço puro e duas do aço com adição de 3% de carvão de vanádio. Para cada uma das amostras avaliou-se cinco campos diferentes, utilizando o software computacional Stream Basics.

Dureza

As medidas de dureza foram realizadas no laboratório de metalurgia e materiais (IEM/UNIFEI), utilizando um durômetro Jester – Otto Wolpert-Werke. No ensaio foi utilizada uma carga de 62,5kg e um indentador esférico de 2,5mm. Foram efetuadas 5 medidas de dureza em campos diferentes de cada amostra para se determinar a média dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tamanho de Partícula

Por meio da análise do tamanho de partículas observou-se que o aço com maior tempo de moagem apresentou menor granulometria. Comparando o aço puro com o aço contendo 3% de VC, observou-se que aquele com adição de VC apresentou menor granulometria, para os mesmos tempos de moagem, principalmente nos tempos mais curtos.

A Tabela 2 mostra o tamanho das partículas e suas porcentagens de acordo

com cada tempo de moagem e composição. Por meio dessa tabela observou-se que a diferença entre os tamanhos de partículas das amostras com e sem carbeto de vanádio diminuiu nos maiores tempos de moagem, mas a fração volumétrica das partículas menores aumentou.

Tabela 2: Tamanho e porcentagem das partículas obtidas através de granulometria a laser.

| TEMPO DE MOAGEM | AÇO AISI 52100 PURO | AÇO AISI 52100 COM 3% DE VC |
|-----------------|---|---|
| 10 HORAS | 1642 µm – 55,8% 722,5 µm – 44,2% - | 451,6 µm – 61,7% 9,72 µm – 26,3% 2,808 µm – 12,0% |
| 20 HORAS | 73,67 µm - 96,6% 9,87 µm – 3,4% | 49,08 µm – 75,1% 10,82 µm – 24,9% |
| 30 HORAS | 38,92 µm – 71,2% 11,14 µm – 28,8% | 33,64 µm – 46,5% 10,85 µm – 53,5% |
| 40 HORAS | 42,11 µm – 47,6% 10,89 µm – 50,8% 3,51 µm – 1,6% | 37,53 µm – 29,5% 10,59 µm – 63,8% 3,22 µm – 6,7% |
| 50 HORAS | 31,73 µm – 17,6% 10,56 µm – 76,4% 3,29 µm – 6,0% | 41,52 µm – 23,9 % 10,41 µm – 60,3% 3,02 µm – 15,8% |

Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura para o aço AISI 52100 puro mostraram que com 10 horas de moagem as partículas apresentaram uma morfologia acicular, com tamanho variando de 200 µm a 1700 µm, aproximadamente (Figura 1a). Com 20 horas de moagem, as partículas se modificaram para uma morfologia mais irregular, com tamanho variando de 5 µm a 300 µm, aproximadamente (Figura 1b).

Com 30, 40 e 50 horas a morfologia das partículas continuou irregular, e, além disso, formaram-se aglomerados, variando apenas o tamanho de partícula nesses tempos de moagem.

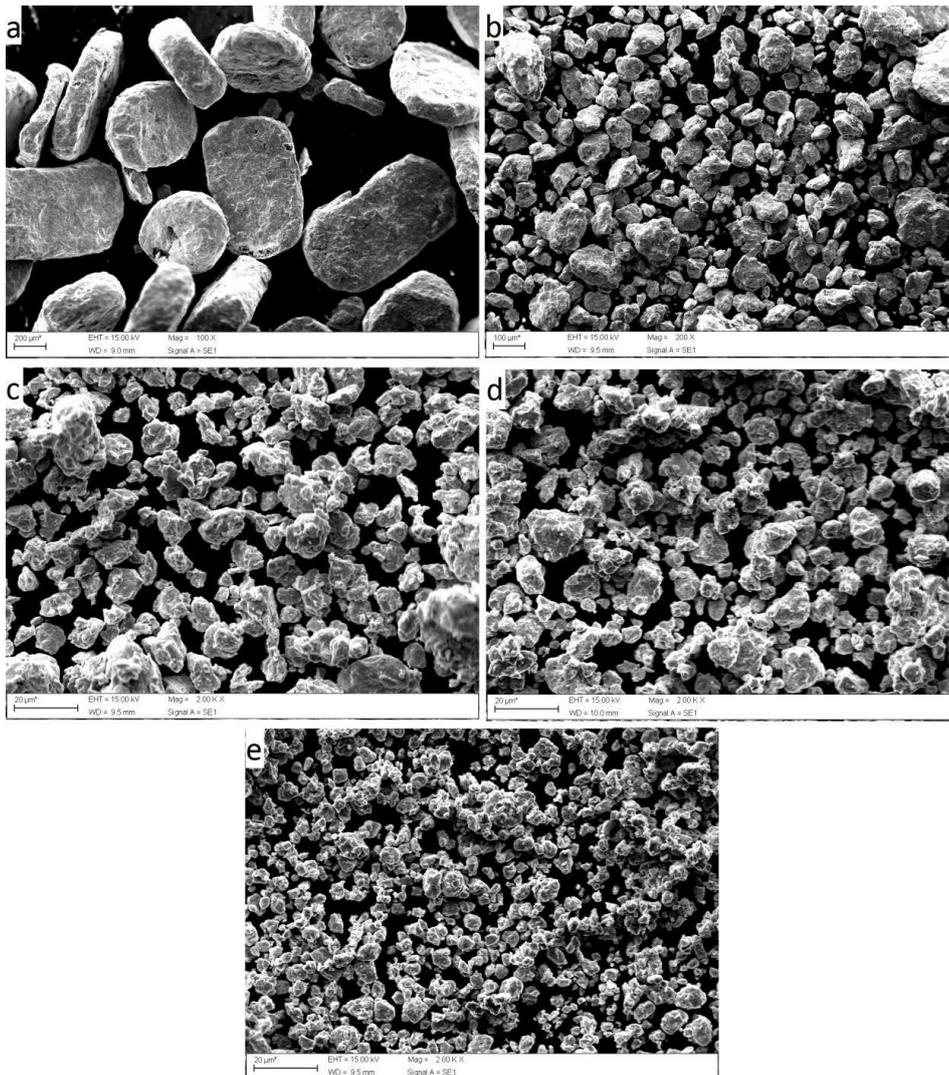


Figura 1: Fotomicrografias do aço AISI 52100 puro, a) 10 horas de moagem; b) 20 horas de moagem; c) 30 horas de moagem; d) 40 horas de moagem; e) 50 horas de moagem.

Para o aço AISI 52100 com adição de 3% de Carbetto de vanádio observou-se que com 10 horas de moagem (Figura 2a) a morfologia das partículas também é acicular, como a do aço puro para o mesmo tempo de moagem, mas seu tamanho difere, variando de 10 μm a 600 μm , aproximadamente. A partir de 20 horas (Figura 2 b) de moagem as partículas começaram a apresentar morfologia irregular, sendo que de 30 horas até 50 horas (Figura 2c, 2d e 2e) formaram-se aglomerados, variando apenas o tamanho de partícula nesses tempos de moagem.

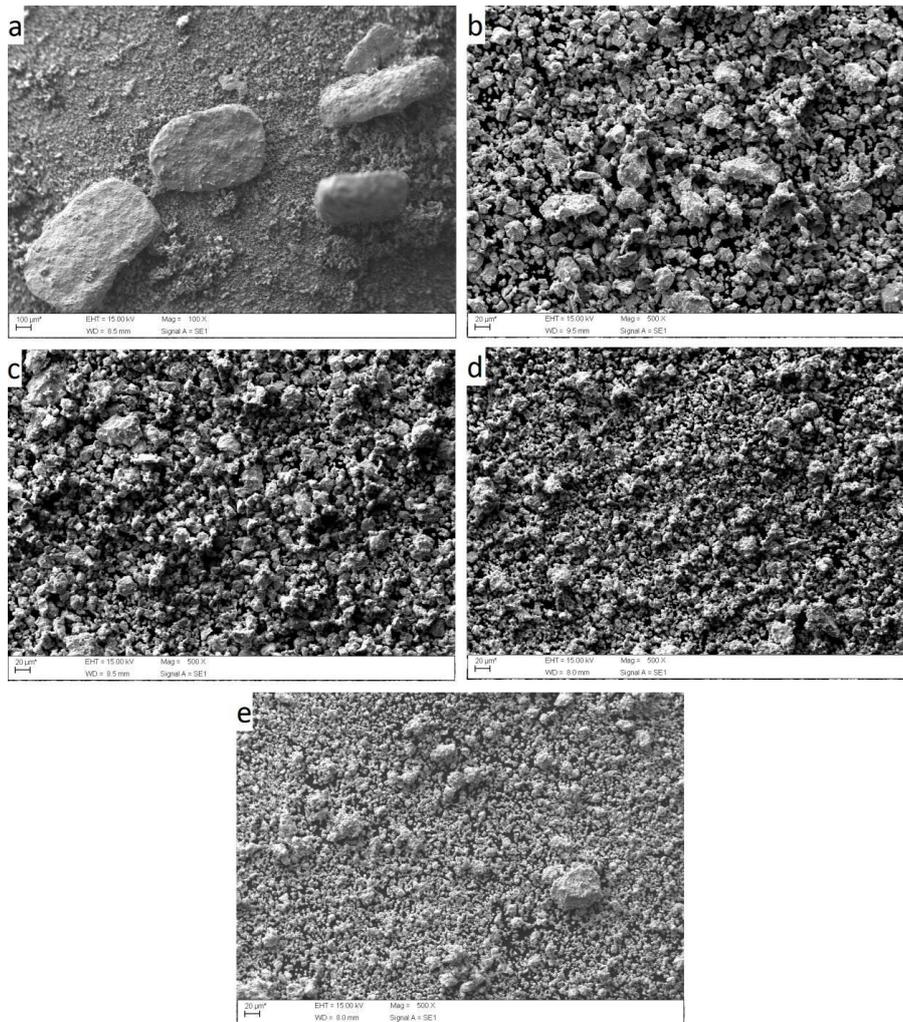


Figura 2: Fotomicrografias do aço AISI 52100 com adição de 3% de VC, a) 10 horas de moagem; b) 20 horas de moagem; c) 30 horas de moagem; d) 40 horas de moagem; e) 50 horas de moagem.

Dessa maneira, notou-se que a adição de 3% de Carbetto de Vanádio melhorou a eficiência da moagem do aço AISI 52100, comparado com o aço puro, como se viu também no ensaio de tamanho de partícula.

Por meio do EDS determinou-se os elementos químicos presentes (por meio de mapeamento) no aço AISI 52100 com 3% de Carbetto de Vanádio. Como esperado, os elementos encontrados foram: ferro (aço), cromo (aço) e vanádio (oriundo do carbetto de vanádio). Além disso, em todos os tempos de moagem o VC esteve bem homogêneo na amostra, ou seja, apresentou uma boa dispersão. A Figura 3 mostra a distribuição do ferro, do cromo e do carbetto de vanádio no aço após 50 horas de moagem.

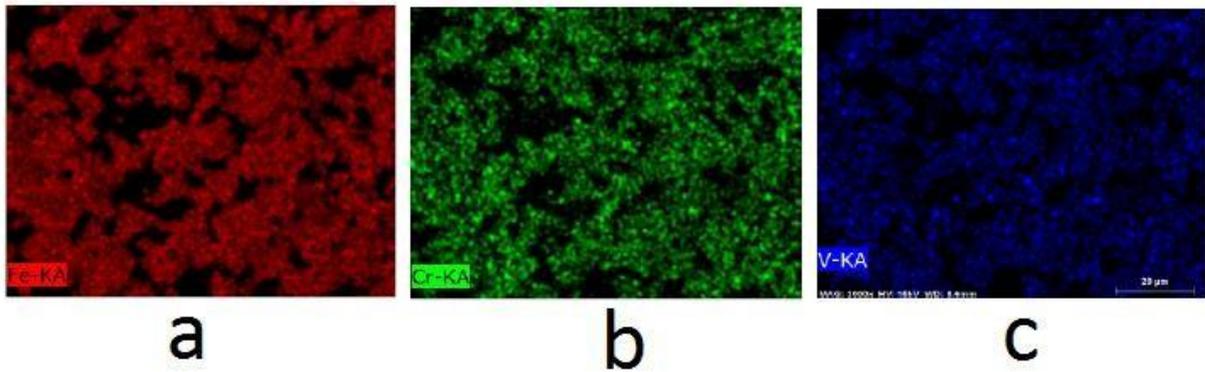


Figura 3: Mapeamento via EDS dos pós do aço AISI 52100 com adição de 3% de VC após 50 horas de moagem, destacando: a) Ferro; b) Cromo; c) Vanádio.

Densidades à verde e por Arquimedes

Os resultados mostraram que a densidade a verde foi de $4,56 \text{ g/cm}^3$ para o aço puro e de $4,43 \text{ g/cm}^3$ para o aço com adição de Carbetto de Vanádio. Após a sinterização a densidade foi de $7,26 \text{ g/cm}^3$ e $6,67 \text{ g/cm}^3$, para o aço puro e com VC, respectivamente.

Porosidade das amostras sinterizadas

Os resultados da análise de porosidade das amostras, utilizando microscopia óptica, do aço sem e com a adição de Carbetto de vanádio são apresentados na Figura 4 e na Tabela 3.

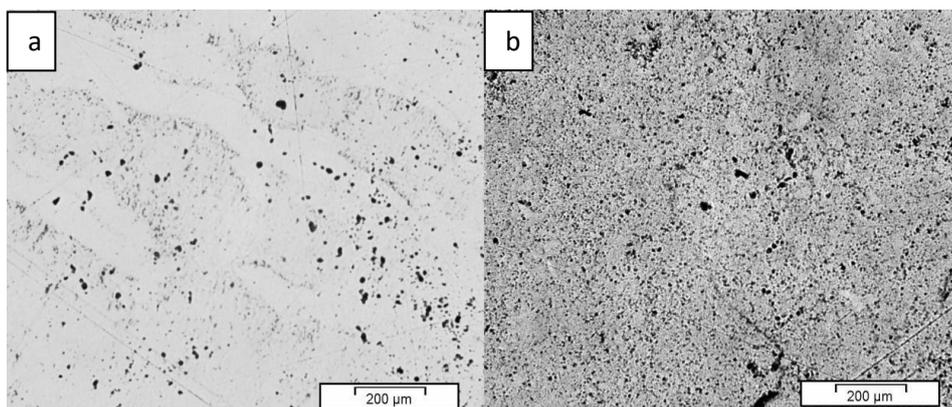


Figura 4: Fotomicrografia do aço AISI 52100 após sinterização, a) aço puro e b) aço com adição de 3% de carbetto de vanádio.

Os resultados mostraram que as amostras com carbetto de vanádio apresentam maior porosidade residual se comparadas com as amostras do aço puro. Tal resultado já era esperado, pois a densidade das amostras com Carbetto

de vanádio também foram menor. Além disso, na amostra de aço puro, a porosidade é menos acentuada e os poros estão na faixa de 5 µm. No aço com VC, os poros estão na faixa de 35 µm.

A Tabela 3 mostra os valores de porosidade encontrados para ambos os materiais. O aço AISI 52100 puro apresentou uma média de porosidade de 10,12 %, enquanto o aço com 3% de VC apresentou uma média de 16,29 %.

Tabela 3: Porcentagem de poros para o aço AISI 52100 puro e com 3% de carbeto de vanádio.

| MEDIDA | POROSIDADE (%): AÇO AISI 52100 PURO | POROSIDADE (%): AÇO AISI 52100 COM 3% DE VC |
|----------------------|-------------------------------------|---|
| 1 | 09,63 | 28,95 |
| 2 | 12,33 | 06,16 |
| 3 | 02,00 | 12,94 |
| 4 | 16,00 | 15,80 |
| 5 | 06,75 | 16,87 |
| 6 | 13,16 | 19,08 |
| 7 | 05,87 | 10,82 |
| 8 | 09,51 | 11,10 |
| 9 | 10,89 | 28,37 |
| 10 | 15,02 | 12,77 |
| MÉDIA | 10,12 | 16,29 |
| DESVIO PADRÃO | 4,34 | 7,44 |

Dureza das amostras sinterizadas

As amostras de aço do aço sem adição de carbeto apresentaram um valor médio de dureza de 281,6 HV, enquanto as amostras produzidas com adição de 3% de carbeto de vanádio apresentaram um valor médio de 173,2 HV. Ambos os valores são altos, o que era esperado devido à densidade das amostras, a qual foi relativamente alta.

Módulo Elástico das amostras sinterizadas

Por meio do ensaio de compressão das amostras sinterizadas foi possível construir as curvas *tensãoxdeformação* das mesmas, obtendo-se o módulo de elasticidade (E). A figura 5 mostra as curvas de 3 amostras do aço AISI 52100 puro e de 3 amostras do aço AISI 52100 com 3% de carbeto de vanádio, respectivamente.

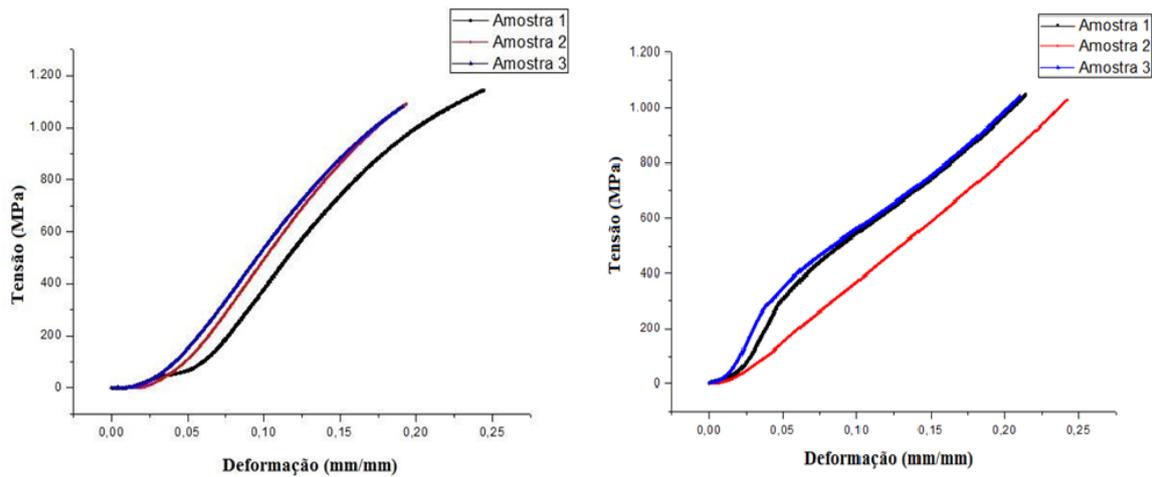


Figura 5: Curvas tensão x deformação do aço AISI 52100 puro (à esquerda) e com 3% de VC (à direita).

Para as amostras do aço AISI 52100 puro, a média do módulo elástico foi de 8,10 GPa. Para o aço AISI 52100 com adição de carbeto de vanádio, a média do módulo elástico foi de 2,01 GPa. Comparando as duas médias obtidas, tem-se uma redução de aproximadamente 75% no valor do módulo elástico das amostras puras, o que pode ter sido afetado pela grande diferença de porosidade das duas amostras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPEMIG que financiaram a bolsa de estudos e a execução deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] CREMOZENI, A., et al; A Metalurgia do Pó – Alternativa econômica com menor impacto ambiental.; Grupo Setorial de Metalurgia do pó; 1ª Edição; São Paulo, SP. 2009.
- [2] DIOGO, W. S.; Produção de Pó do Aço AISI 52100 Com e Sem Adição de Carbetos de Titânio e Nióbio Utilizando Moagem de Alta Energia; Universidade Federal de Itajubá; Itajubá, MG; Dissertação de Mestrado. 2013.

[3] SILVA, P. R. T.; Produção de Pó do Aço AISI 52100 Com e Sem Adição de Carbetos de Titânio e Nióbio Utilizando Moagem de Alta Energia; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre/RS. Tese de Doutorado. 2001.

[4] Aço 100% Reciclável; Disponível em: <http://www.inda.org.br/aco_reciclavel.php>
Acesso em: 07 de agosto de 2015.

[5] BRAGA, N. D. A, FERREIRA, N. G, CAIRO. C. A. A.; Obtenção de Titânio metálico com porosidade controlada por metalurgia do pó; Revista Quim. Nova, Vol. 30, No. 2, 450- 457. São Paulo. 2007.

INFLUENCE OF THE ADDITION OF THE VANADIUM CARBIDE IN GRINDING AND MECHANICAL PROPERTIES AISI 52100 STEEL, PRODUCED BY POWDER METALLURGY

ABSTRACT: The AISI 52100 steel is a tool steel that after its useful life is remelted or discarded. One of this steel reuse of alternatives is the powder metallurgy (PM). In this work, the steel was ground in high-energy mill for 10, 20, 30, 40 and 50 hours with and without the addition of vanadium carbide. The powders were characterized for size and particle morphology and the powder that showed lower particle size underwent a stress relieving treatment and was pressed into tablet form. The pellets were sintered and calculated their densities, porosities, hardness and elastic moduli. The results showed that the vanadium carbide increases the grinding efficiency to lower milling times and also increases the porosity of the samples, with less densification. The values of hardness and elastic modulus were significantly higher in samples without addition of vanadium carbide.

Key-words: Powder Metallurgy. High Energy Milling. Microstructural and mechanical characterization.