

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

EFEITO DA ATMOSFERA NA DENSIFICAÇÃO DE CAVACOS FERROSOS COMPACTADOS SOB ALTA PRESSÃO.

Lucas Ascari Salvalaggio, lucas-salvalaggio@hotmail.com¹

Leonardo Resende, resende_leo@hotmail.com¹

Sergio Renato da Silva Soares, sergeva2004@yahoo.com.br¹

Franciné Alves da Costa, francineac@yahoo.com²

¹Universidade Federal de Mato Grosso, Rodovia Rondonópolis-Guiratinga, km 06 (MT-270) - Sagrada Família, Rondonópolis-MT, 78735-901.

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Avenida Senador Salgado Filho 3000 - Campus Universitário, Natal-RN, 59078-970.

Resumo: Nesse trabalho foi estudado o efeito da atmosfera na densificação de compactos de cavacos ferrosos, de um aço médio carbono SAE 1050. O principal objetivo foi investigar a influência da atmosfera na sinterização desses materiais sem o uso de aditivos. Cavacos grosseiros ($\leq 0,85$ mm) de aço médio carbono provenientes de um processo de usinagem a seco foram compactados a frio sob pressões de 500 MPa e 2000 MPa. Os compactos cilíndricos obtidos com diâmetro e altura de 8 mm e 3 mm respectivamente, foram submetidos a diferentes atmosferas (Ar/Carbono, argônio e vácuo) e seguintes parâmetros de sinterização: taxa de aquecimento de 20 °C/min e tempo de permanência do compacto de 90 minutos na temperatura de 1100 °C. Os sinterizados foram caracterizados por meio de microscopia ótica, medidas de densidade e microdureza. Os resultados iniciais mostram que a atmosfera influenciou significativamente no comportamento da microestrutura sinterizada das amostras estudadas nesse trabalho.

Palavras-chave: Atmosfera de sinterização, alta pressão, propriedades mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação mundial com a reciclagem de resíduos tem levado indústrias a buscar alternativas para o destino final dos mesmos. A metalurgia do pó é uma delas, pois pode-se por seu intermédio transformar esses resíduos ou cavacos em pó, e a partir disso fabricar peças de grande interesse para setores da indústria, tais como a automobilística, eletrodomésticos, ferramentaria e de metal duro, aeroespacial, e uma infinidade de outras aplicações (Delforge, Ferreira et al, 2007).

Dentro da Metalurgia do Pó, a compactação a frio sob altas pressões ($P > 1000$ MPa) é uma rota bastante promissora para melhorar as condições de sinterabilidade de materiais, porque, além de promover uma maior compactação do pó de partida, uma tensão externa aplicada irá somar-se à tensão superficial como força motriz para o processo de sinterização (Gomes, 1995). Adicionalmente, pressões extremamente elevadas permitem a deformação plástica, mesmo de materiais de baixa ductilidade, promovendo um contato íntimo e extenso das partículas e eliminando poros e trincas. Isso tende a diminuir o tempo e/ou a temperatura necessária para uma boa sinterização, evitando-se o crescimento excessivo de grãos, sem o uso de aditivos. Além disso, as pressões elevadas provocam fratura nos grãos em materiais frágeis ou dúcteis altamente encruados, o que propicia um pó de partida, para a sinterização, mais fino, sem os riscos de contaminação presentes, quando são usados métodos de cominuição prévia do pó (Soares, 2003).

Pesquisas referentes ao uso de diferentes atmosferas de sinterização têm sido desenvolvidas no meio científico desde a década de 1950 (Willian. J et al, 1959). A maioria dos metais necessita de alguma forma de proteção contra oxidação durante a sinterização e segundo a literatura (German, 1984), óxidos sobre a superfície do material particulado, empobrecem a sua sinterabilidade e degradam as suas propriedades mecânicas. Nesse contexto a atmosfera controlada não somente oferece proteção contra qualquer oxidação, mas também reduz qualquer óxido existente na superfície dos particulados que geralmente devido à redução desenvolvida nessa região perdem cerca de 1,5 % em peso, durante o ciclo de sinterização. Nesse trabalho foi investigado o efeito de diferentes atmosferas na sinterização de amostras de cavacos de um aço médio carbono SAE 1050 (0,85 mm), previamente compactadas sob pressões de até 2000 MPa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material de partida usado no presente trabalho foram cavacos de aço SAE 1050 obtidos a partir de usinagem a seco em um tarugo desse material. Nas Fig. 1 e Fig. 2 são apresentadas as características dos cavacos cujo diâmetro após peneiramento foi $\leq 0,85$ mm. Enquanto na Fig. 1 observam-se cavacos com uma distribuição heterogênea de morfologia e comprimento, na Fig. 2 nota-se no interior desse material uma típica estrutura lamelar composta por finas camadas de aço. A seguir seis compactos cilíndricos desses cavacos com 8 mm de diâmetro e 3 mm de altura foram produzidos sob uma pressão uniaxial de até 2000 MPa e sinterizados em atmosferas de ar/carbono, argônio e vácuo, ou seja, dois em cada atmosfera. A atmosfera ar/carbono foi gerada em um forno mufla resistivo do laboratório de Tratamentos Térmicos do curso de Engenharia Mecânica da UFMT. A atmosfera com gás de argônio foi gerada em um forno tubular e a atmosfera de vácuo em um forno a vácuo sob uma pressão na ordem de 10^{-4} torr ambos, pertencentes ao laboratório do Departamento de Física Teórica e Experimental da UFRN (DFTE/UFRN). Os parâmetros de sinterização usados foram: taxa de aquecimento de 20 °C/min e tempo de permanência do compacto de 90 minutos na temperatura de 1100 °C. Todas as amostras foram caracterizadas desde a sua condição de partida. Para tanto foram usadas técnicas de caracterização tais como Microscopia Óptica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), medidas de densidade via picnômetro e medidas de microdureza. Nesse contexto, os cavacos foram caracterizados através de macrografias e do MEV. A densidade sinterizada dos compactos foram medidas através do método picnométrico (Reilly e Rae, 1954; Pratten, 1981). Nesse método, o volume da amostra é obtido pela variação no peso de um recipiente totalmente preenchido com um líquido de densidade conhecida, quando a amostra é também inserida no seu interior. Foram realizadas 10 medidas em cada amostra. Para determinar a densidade relativa das mesmas, os valores obtidos foram comparados com o valor da densidade medida na amostra original (AM00) e adotada como teórica no presente trabalho ($7,84$ g/cm³). A microestrutura dos compactos previamente embutidos, polidos com alumina até uma granulometria $\approx 1\mu\text{m}$ e atacadas com o reagente químico Nital 3,5 %, foi analisada por microscopia óptica usando-se um microscópio óptico Leica com ampliação de imagem para até 1000 vezes. Além disso, as amostras sinterizadas foram submetidas a ensaios de microdureza em um microdurômetro Digimess HV 1000 selecionando nele um intervalo de 10 s de repouso da ponteira sobre a amostra e carga de 4,90 N.



Figura 1. Macrografia dos cavacos como recebidos apresentando uma distribuição heterogênea de morfologia e de comprimento (até 5 mm).

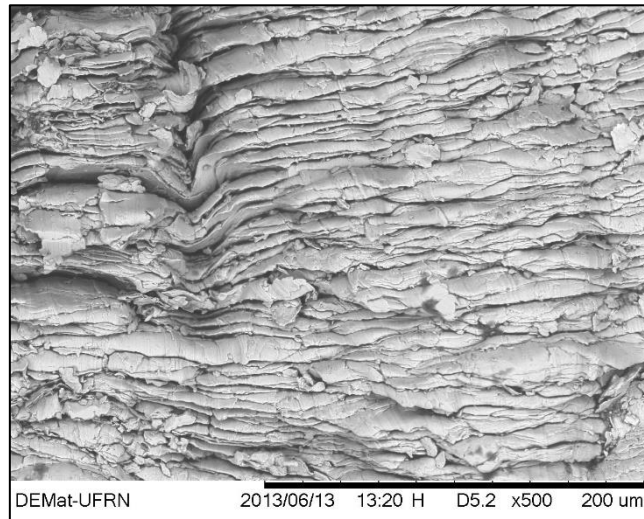


Figura 2. Micrografia de MEV mostrando a típica estrutura lamelar de um cavaco do aço 1050.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Fig. 3 e Fig. 4 apresentam as típicas micrografias das amostras previamente compactadas uniaxialmente em baixa e alta pressão respectivamente e sinterizadas na temperatura de 1100 °C. Comparando as microestruturas sinterizadas das amostras compactadas em alta pressão com aquelas produzidas sob baixa pressão, fica evidente o efeito do aumento da pressão na significativa redução do tamanho da porosidade (comparar setas da Fig. 3 com a Fig. 4) e consequentemente aumento de densidade dos sinterizados.

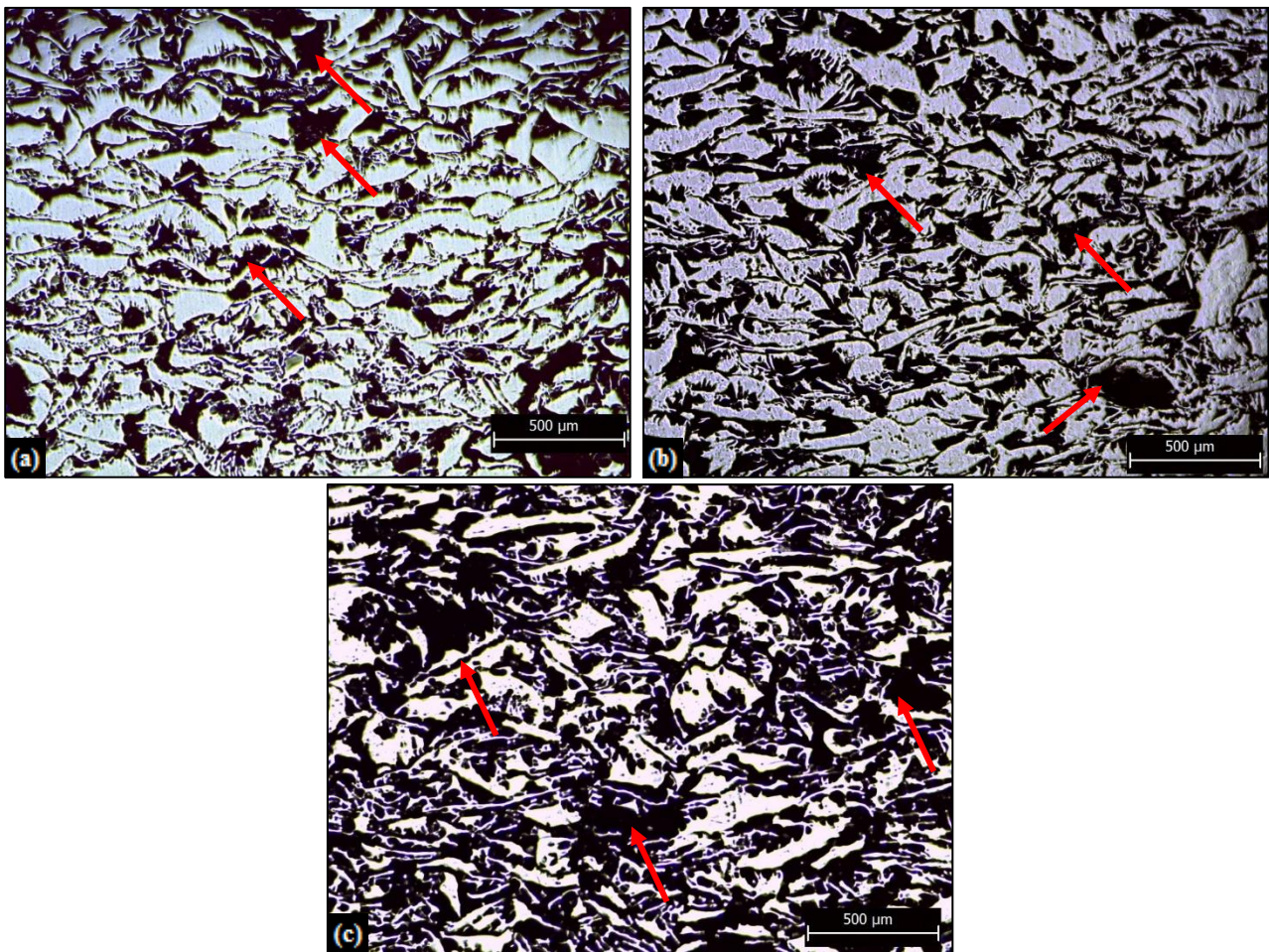


Figura 3. Microestrutura das amostras compactadas em baixa pressão (500 MPa) e sinterizadas a 1100 °C em diferentes atmosferas: a) Ar/C; b) Argônio; c) Vácuo. (Barra de 500 µm).

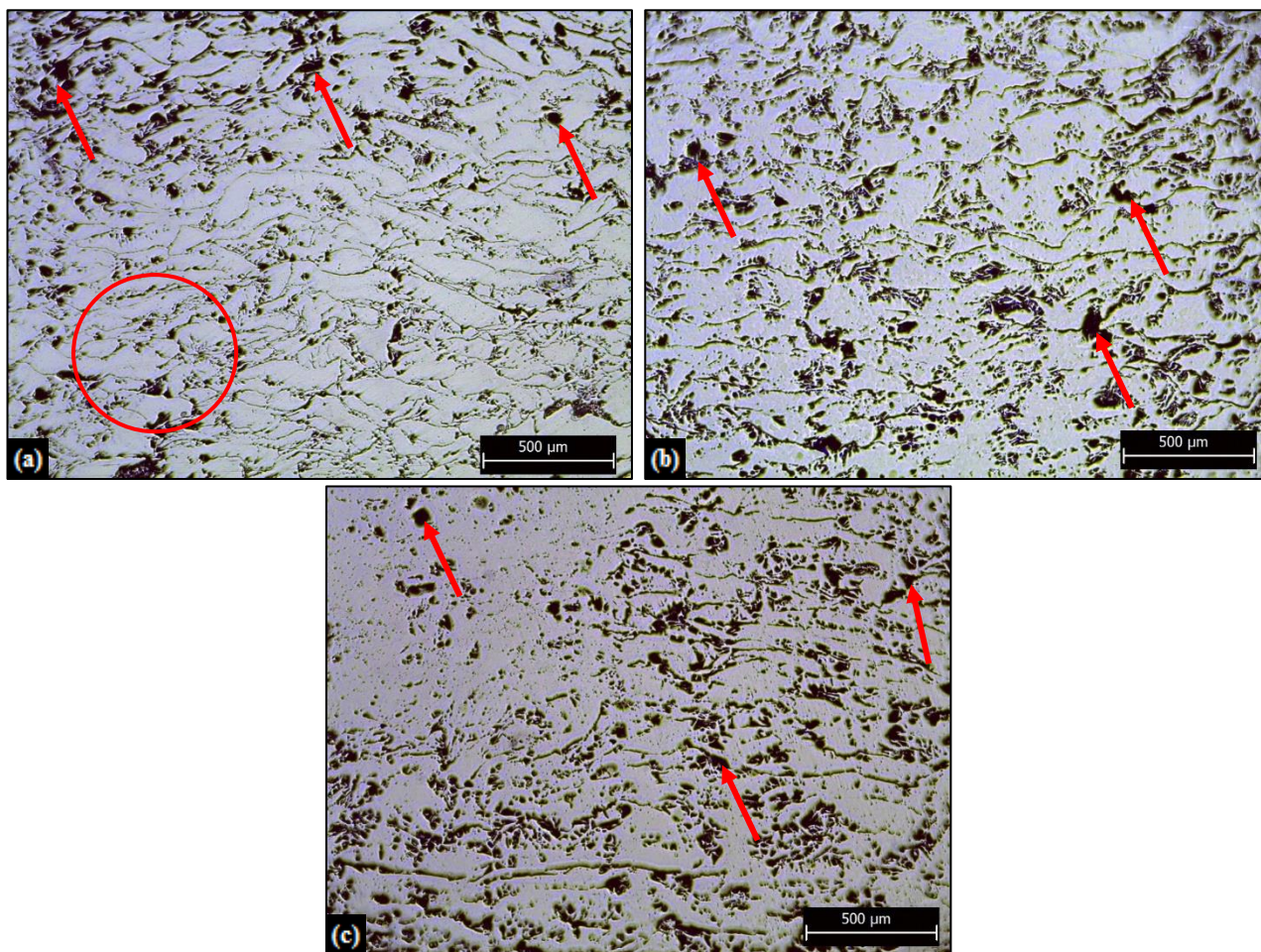


Figura 4. Microestrutura das amostras compactadas em alta pressão (2000 MPa) e sinterizadas a 1100 °C em diferentes atmosferas: a) Ar/C; b) Argônio; c) Vácuo. (Barra de 500 μm).

É fundamental, nesse ponto, discutirmos os nossos resultados em termos da relação entre duas técnicas severas de processamento, ou seja, a moagem de alta energia com a alta pressão. Em moagem de alta energia, que é um processo severo de processamento de materiais usado basicamente para cominuição de materiais sólidos, transformações de fases e alterações microestruturais, estão presentes, simultaneamente ou não, as seguintes etapas: deformação, soldagem, encruamento e fratura do material que está sendo cominuído (Costa, 2004). Isso pode também estar ocorrendo nos compactos submetidos à alta pressão, que também, como a moagem de alta energia, é uma técnica severa de processamento de materiais. O fato do aparecimento de cavacos menores do que os de partida (ver região circulada na Fig. 4) é um forte indicativo de que alta pressão contribuiu de uma forma dinâmica para a atuação simultânea ou não da deformação, soldagem, encruamento e fratura desses materiais, e isso se traduziu num aumento significativo da densidade de compactação. A pressão atuou como uma força motriz adicional a temperatura para a redução de porosidade e aumento da densificação dos sinterizados.

Outro aspecto interessante é com relação ao estágio de sinterização identificado nas microestruturas tratadas em argônio e vácuo. De acordo com a literatura (German, 1991), a redução de tamanho e quantidade de porosidade bem como o seu isolamento são típicos de uma microestrutura aproximadamente em estágio intermediário de sinterização. Esse comportamento é coerente com os resultados apresentados na Tab. 1 onde os valores das densidades relativas ficaram entre 92 % e 93 % e podem ser atribuídos ao tipo de atmosfera usada na sinterização das amostras. Segundo a literatura (German, 1984), óxidos sobre a superfície do material particulado, empobrecem a sua sinterabilidade e degradam as suas propriedades mecânicas. As atmosferas de argônio e vácuo garantiram um ambiente mais limpo de sinterização (ausência de oxigênio) do que aquele produzido pela de Ar/Carbono (Ar/C), e isso contribuiu para uma melhor densificação das amostras sinterizadas em argônio e vácuo.

Tabela 1. Resultados da densidade dos compactos obtidos sob pressão de 2000 MPa.

AMOSTRAS	DENSIDADE	
	Sinterizada (g/cm^3)	Relativa (%)
AM4-AP	7,24	92,39
AM5-AP	7,30	93,16
AM6-AP	7,03	89,68
AM1-BP	5,61	71,51
AM2-BP	5,78	73,68
AM3-BP	5,73	73,09

Obs: Densidade medida na amostra original (AM00) e adotada como teórica no presente trabalho= $7,84 \text{ (g/cm}^3\text{)}$. AM1-BP (sinterizada em argônio e compactada em baixa pressão), AM2-BP (sinterizada em vácuo e compactada em baixa pressão), AM3-BP (sinterizada em ar/carbono e compactada em baixa pressão), AM4-AP (sinterizada em argônio e compactada em alta pressão), AM5-AP (sinterizada em vácuo e compactada em alta pressão) e AM6-AP (sinterizada em ar/carbono e compactada em alta pressão).

Nas Fig. 5 e Fig. 6 são apresentadas as microestruturas de todas as amostras sinterizadas e atacadas com Nital 3,5 %. Nelas são mostradas regiões claras e escuras (ver setas) identificadas segundo a literatura (Colpaert, 2008) como ferrita e perlita respectivamente. Diferentemente das microestruturas produzidas sob Ar/C e argônio, a distribuição dessas fases é na amostra sinterizada em vácuo, típica de um aço 1050 e consequentemente do cavaco de partida. Nela não ocorreu a gradativa descarbonetação identificada pelo aumento da ferrita e redução da perlita nas microestruturas sinterizadas em Ar/C e Argônio. Isso foi mais significativo para o caso das amostras sinterizadas em Ar/C onde o oxigênio presente nesse ambiente removeu muito carbono da amostra. A microestrutura de partida ferrítica e perlítica foi alterada para uma essencialmente ferrítica.

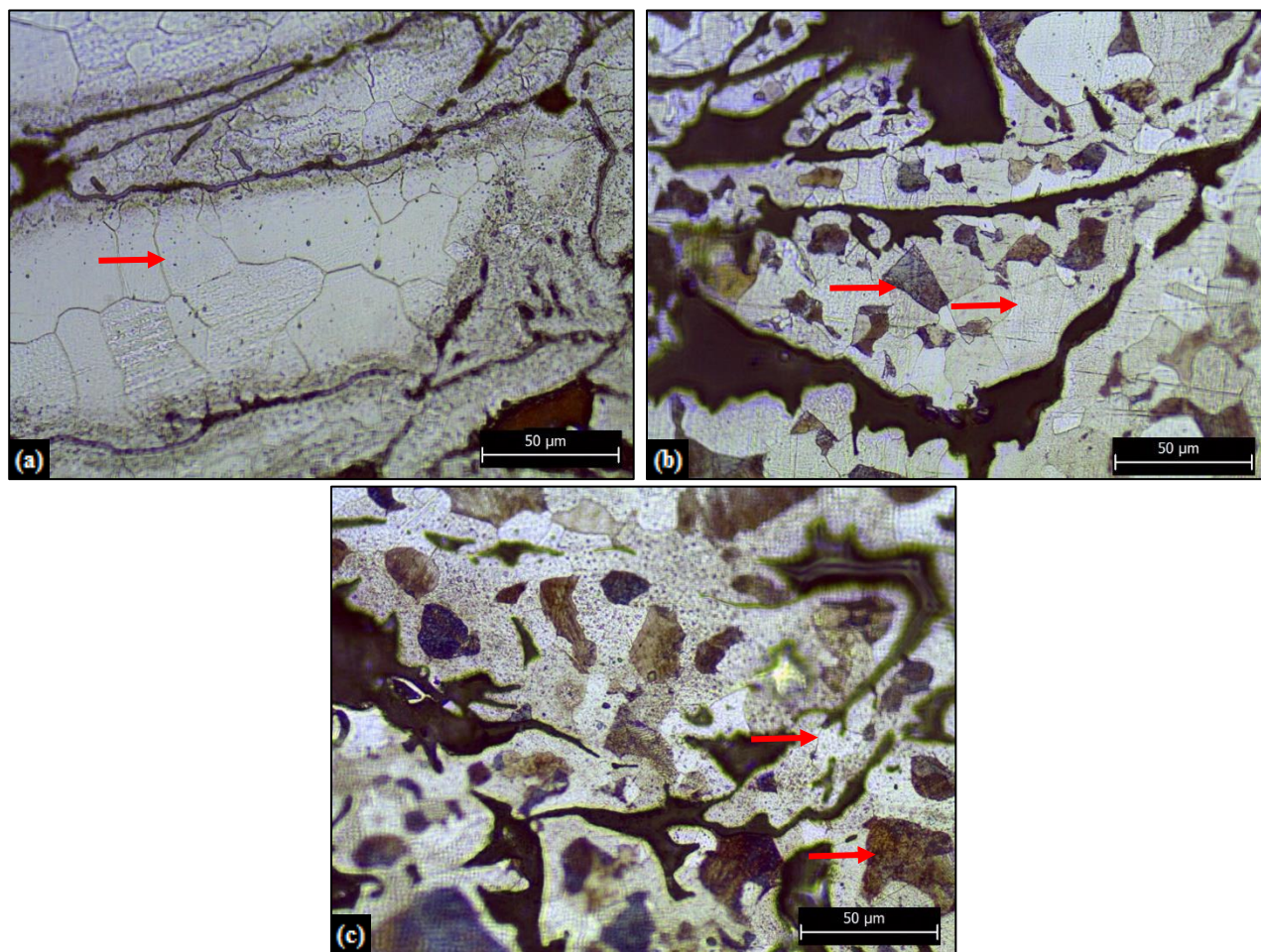


Figura 5: Microestrutura atacada com Nital 3,5 % dos compactos obtidos sob baixa pressão (500 MPa) e sinterizados a 1100 °C em diferentes atmosferas: (a) Ar/Carbono, (b) Argônio e (c) Vácuo. (Barra de 50 μm).

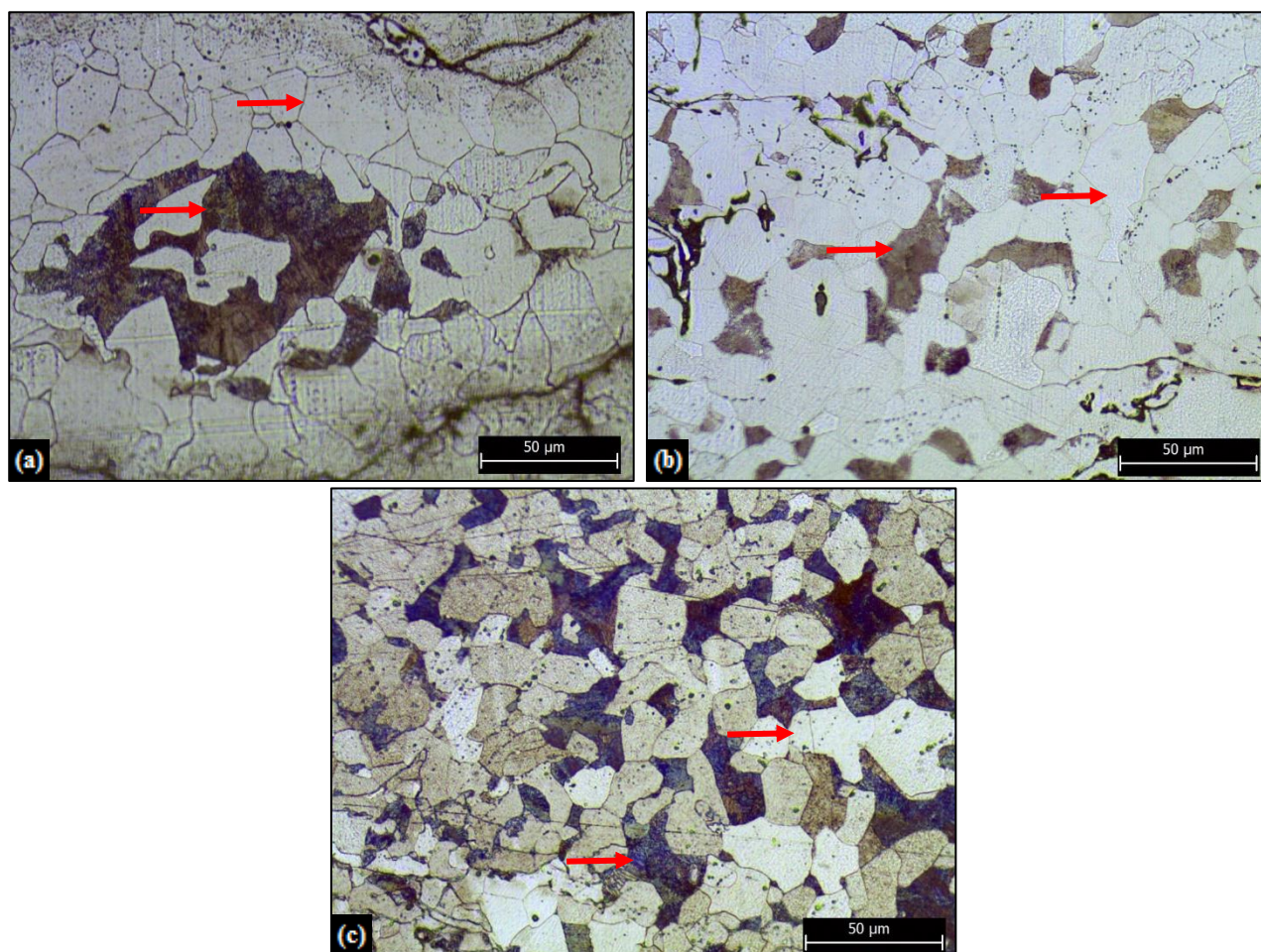


Figura 6: Microestrutura atacada com Nital 3,5% dos compactos obtidos sob alta pressão (2000 MPa) e sinterizados a 1100 °C em diferentes atmosferas: (a) Ar/Carbono, (b) Argônio e (c) Vácuo. (Barra de 50 µm).

A Tab. 2 apresenta os valores de microdureza das amostras original e dos sinterizados previamente compactados em alta pressão. Naqueles previamente compactados em baixa pressão não foi possível medir microdureza devido à sua pobre sinterabilidade (quantidade elevada de poros grandes) presente em sua microestrutura (ver Fig. 3 e os valores de densidade sinterizada na Tab. 1). Nota-se que todos os valores de microdureza dos sinterizados são inferiores aquele apresentado para amostra original. Isso é devido a grande diferença que existe entre as densidades da amostra original e sinterizadas. Na primeira o valor médio medido foi de 7,84 g/cm³ e nas outras o máximo medido foi de 7,24 g/cm³ (amostra sinterizada em vácuo). A aproximação entre esses valores de densidade aproximará os valores de microdureza entre si e consequentemente do valor da amostra original.

Outro aspecto interessante é com relação aos valores de microdureza das amostras sinterizadas em diferentes atmosferas. Enquanto os sinterizados em vácuo apresentaram os maiores valores médios de microdureza, aqueles sinterizados em Ar/C e argônio apresentaram os menores. Além disso, em função do elevado desvio padrão, apresentado na Tab. 2, isso foi mais significativo na amostra sinterizada em atmosfera Ar/C. Esses resultados são coerentes com aqueles discutidos no parágrafo anterior sobre a descarbonetização das amostras e consequente alteração do percentual das fases presentes na microestrutura do aço de partida. Enquanto no sinterizado em vácuo não se nota qualitativamente alterações significativas na composição de fases de sua microestrutura, naqueles produzidas em argônio e Ar/C observa-se o contrário e isso se traduziu nos diferentes valores médios de microdureza medidos nesses materiais.

Tabela 2 - Valores de microdureza das amostras sinterizadas em 1100 °C.

AMOSTRAS	MICRODUREZA (HV)
AM0-00	210,23 ± 16,62
AM4-AP	98,73 ± 9,33
AM5-AP	130,51 ± 15,30
AM6-AP	98,98 ± 21,04

Obs: AM0-00 (Amostra original), AM4-AP (sinterizada em argônio e compactada em alta pressão), AM5-AP (sinterizada em vácuo e compactada em alta pressão) e AM6-AP (sinterizada em ar/carbono e compactada em alta pressão).

4. CONCLUSÕES

A alta pressão contribuiu de uma forma dinâmica para a atuação simultânea ou não da deformação, soldagem, encruamento e fratura de materiais dúcteis, tais como o aço SAE 1050 e isso se traduziu num aumento da densidade sinterizada.

Os compactos de cavacos grosseiros ($\leq 850 \mu\text{m}$) obtidos apresentaram valores de densidade relativa de até 93% quando sinterizados na temperatura de 1100°C .

Por meio desses resultados preliminares, levando em conta o grau de porosidade, a distribuição das fases e os estágios de sinterização e medidas de microdureza das amostras processadas, há um indicativo de que a atmosfera controlada a vácuo é a mais indicada para a sinterização de cavacos de um aço SAE 1050 compactados sob alta pressão.

5. REFERÊNCIAS

- Cobos, A. “Estudo da Descarbonetação Durante a Sinterização por Plasma de Aço Carbono”. 2003. 83 (Mestrado). PPGCEM, UFSC, Florianópolis, SC.
- Colpaert, H. “Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns”. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- Costa, F. A. “Síntese e Sinterização de Pós Compósitos do Sistema W-Cu”. 2004. 195 (Doutorado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP, São Paulo, SP.
- Delforge, D. Y. M. et al. Sinterization of a mixture of stainless steel scrap and powder from the same material. A new technology to recycle metals? Rem-Revista Escola De Minas, v. 60, n. 1, p. 95-100, Jan-Mar 2007. ISSN 0370-4467.
- German, R. M. Fundamentals of Sintering In: Engineered Materials Handbook, v. 4. Ceramics and Glasses. ASM International. Metals Park, Ohio (1991), p. 261-269.
- German, R. M. Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, Princeton, N. J., p. 78,129, 132,1984.
- Pratten, N. A. “Review: the precise measurement of the density of small samples. Journal of Materials Science”, v.16, p.1737-1747, 1981.
- Reilly, J.; Rae, W. N. “Physico-Chemical Methods”. London: Methuen & CO LTD., 1954.
- Soares, S. R. S. “Sinterização de TiB₂ em Altas Pressões”. 2003. 124 (Doutorado). PGCIMAT, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Willian, J.; Barnes, E.; Scott, R. e Hall, A.; Sintering of uranium oxides of composition UO₂ to U₃O₈ in various atmospheres. J. Nucl. Mater., v. 1, p. 28-38, 1959.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EFFECT OF THE ATMOSPHERE IN COMPACT DENSIFICATION OF FERROUS CHIPS.

Lucas Ascari Salvalaggio, lucas-salvalaggio@hotmail.com¹

Leonardo Resende, resende_leo@hotmail.com¹

Sergio Renato da Silva Soares, sergeva2004@yahoo.com.br¹

Franciné Alves da Costa, francineac@yahoo.com²

¹Universidade Federal de Mato Grosso, Rodovia Rondonópolis-Guiratinga, km 06 (MT-270) - Sagrada Família, Rondonópolis-MT, 78735-901.

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Avenida Senador Salgado Filho 3000 - Campus Universitário, Natal-RN, 59078-970.

Abstract. This study investigated the effect of the atmosphere in compact densification of ferrous chips. The main objective was to investigate the influence of the atmosphere in the sintering of these materials without the use of additives. Steel chips ($\leq 0,85 \text{ mm}$) from a dry milling process they were cold compacted under pressures of 500 MPa and 2000 MPa. The compacts obtained with a diameter of 8 mm and a height of approximately 3 mm were subjected to different atmospheres (Air / carbon, argon and vacuum) of according under heating rate of $20^\circ\text{C}/\text{min}$ for 90 minutes at a temperature of 1100°C . Sintered were characterized by optical microscopy, density measurements and micro hardness. Initial results showed that the atmosphere influence the behavior of the microstructure of the sintered samples.

Keywords: Sintering atmosphere, high pressure, mechanical properties.