

## ESTUDO EXPLORATÓRIO DO EFEITO DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO NA DENSIFICAÇÃO DE CAVACOS DE UM AÇO CARBONO

S.R.S. Soares<sup>1</sup>, L. Resende<sup>1</sup>, L. C. Brandão<sup>1</sup> e J. M. P. S. Messias<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rodovia Rondonópolis-Guiratinga, KM 06 – Sagrada Família, Rondonópolis – MT,  
Brazil. ZIP CODE. 78735-901  
[sergeva2004@yahoo.com.br](mailto:sergeva2004@yahoo.com.br)

*Neste trabalho foi investigado o efeito da alta pressão na compactação e sinterização de cavacos de um aço médio carbono. Pressões de até 3000 MPa foram usadas para compactar os cavacos de aço em uma matriz pistão/cilindro. Os compactos obtidos foram sinterizados na temperatura de 1100°C durante 90 min. sob atmosfera Ar/Carbono (Ar/C). As amostras compactadas e sinterizadas foram caracterizadas por microscopia óptica e medidas de densidade e microdureza. Os valores de 7.55 g/cm<sup>3</sup> e 7.71 g/cm<sup>3</sup> para a densidade verde e sinterizada obtidos nesse trabalho foram muito próximos da densidade teórica do aço (7.84 g/cm<sup>3</sup>). Comparando-se os diferentes efeitos da pressão e temperatura na densificação das amostras, notou-se que a principal responsável como força motriz para o aumento da densificação foi à alta pressão usada no presente trabalho.*

*Palavras-chave: Cavacos, carbono de aço, Alta Pressão, Densificação, Força Motriz de Sinterização.*

## INTRODUÇÃO

Não é economicamente vantajoso reaproveitar cavacos de aço via siderurgia ou fundição para se fabricar peças pequenas desse material<sup>(1)</sup>. Nesse caso uma das técnicas de fabricação mais usadas para produzir peças de pequeno porte é a Metalurgia do Pó. Entretanto sinterizados ferrosos com densidade próxima a teórica obtidos a partir de cavacos ( $\leq 0,85$  mm) com forma irregular via Metalurgia do Pó, exige a sua prévia cominuição, ou presença de fase líquida durante o seu processo de sinterização em temperatura próxima de 1250°C e maiores do que aquelas usadas por fornos industriais. A preocupação com esses fatos têm levado pesquisadores a buscar outras rotas para se sinterizar compactos de cavacos ferrosos. A técnica de Alta Pressão ( $> 1000$  MPa) é uma delas, pois se pode por seu intermédio transformar diretamente esses cavacos em peças de pequeno porte e de grande interesse para a indústria automotiva, eletrônica e aeroespacial.

A compactação a frio sob altas pressões é uma rota bastante promissora para melhorar as condições de sinterabilidade de materiais, porque além de promover uma maior compactação do pó ou cavaco de partida, uma tensão externa aplicada irá somar-se à tensão superficial como força motriz para o processo de sinterização. Adicionalmente, pressões extremamente elevadas permitem a deformação plástica, mesmo de materiais de baixa ductilidade, promovendo um contato íntimo e extenso das partículas ou cavacos e eliminando poros e trincas. Isso tende a diminuir o tempo e/ou a temperatura de sinterização, evitando-se o crescimento excessivo de grãos, sem o uso de aditivos. Além disso as pressões elevadas provocam fratura nos grãos em materiais dúcteis altamente encruados ou frágeis, o que propicia um particulado de partida, para a sinterização, mais fino, sem os riscos de contaminação presentes, quando são usados métodos de cominuição prévia do pó<sup>(2)</sup>.

No presente estudo compactos de cavacos de aço provenientes de torneamento a seco foram compactados e posteriormente sinterizados. O conjunto de resultados obtidos mostrou que é possível reaproveitar cavacos ( $\leq 0,85$  mm) de aço médio carbono e produzir sinterizados altamente densificados com e sem o uso da temperatura, através de técnicas não convencionais de sinterização, tal como a alta pressão usada nesse trabalho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse estudo foram usados cavacos metálicos obtidos através de operações de corte a seco realizadas num tarugo de aço SAE 1050. As típicas fases presentes na microestrutura desse material são apresentadas na figura 1. Com a finalidade de criar um padrão de referência para a análise e discussão dos resultados foi usinada uma amostra original (AM00) a partir do referido tarugo de aço descrito acima com mesmas dimensões das amostras compactadas. Compactos de cavacos de aço ( $\varnothing \leq 0,85$  mm) com morfologia irregular e distribuição heterogênea de comprimento (ver figura 2), foram produzidos sob pressão de 2000 MPa. A seguir as amostras cilíndricas desses cavacos com 8 mm de diâmetro e 3 mm de altura foram submetidas a um tratamento térmico, novamente compactadas em pressão de 2000 MPa e finalmente sinterizadas sob a temperatura de 1100°C em atmosfera ar carbono (ar / C) durante 90 minutos. A densidade das amostras compactadas e sinterizadas foi medida pelo método picnométrico <sup>(3, 4)</sup> e foram realizadas 10 medidas em cada uma delas. Para determinar a densidade relativa das mesmas, os valores obtidos foram comparados com o valor de densidade medida na amostra original (AM00), adotada como teórica no presente trabalho (7,84 g/cm<sup>3</sup>). A microestrutura das amostras previamente polidas com alumina até uma granulometria  $\cong 1\mu\text{m}$  foi analisada por microscopia óptica e/ou eletrônica de varredura. As medidas de microdureza (HV) foram realizadas num microdurômetro Digimess HV-1000 utilizando carga de 9,8 N, com intervalo de repouso da ponteira de 10 s.

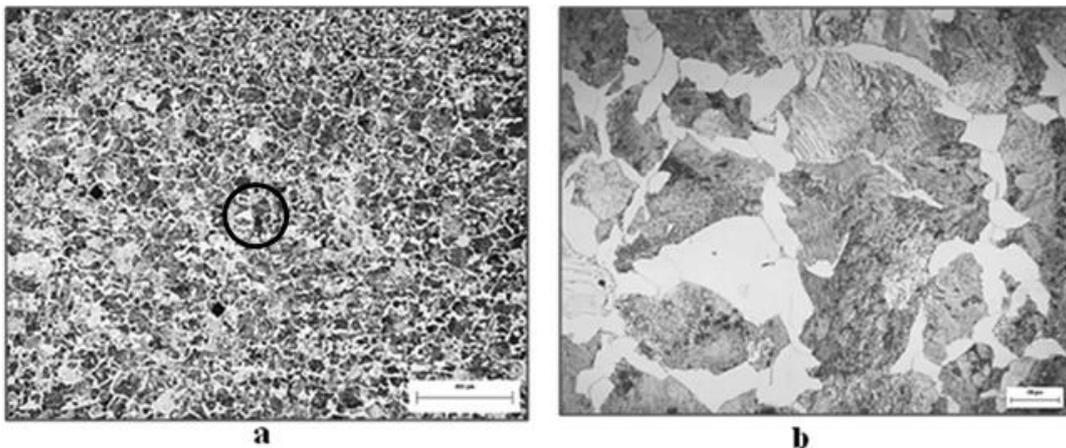


Figura1. Imagens MO da microestrutura da amostra padrão (AM00) atacada com Nital 3.5%: a) distribuição homogênea de fases típicas para um aço SAE 1050 (tamanho da barra = 400  $\mu\text{m}$ ); b) Identificação das fases ferrita (região clara) e perlita (região escura) presentes na área circulado (tamanho da barra = 20  $\mu\text{m}$ ).



Figura 2. Micrografias dos cavacos como-usinados, mostrando a distribuição heterogênea de comprimento (até 5 mm) e morfologia.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 apresenta imagem das microestruturas das amostras compactadas em alta pressão (AM01) e (AM02) antes e após o seu tratamento térmico respectivamente. Embora em ambas amostras possam estar presentes simultaneamente e de forma dinâmica as etapas de soldagem, deformação plástica, encruamento e fratura<sup>(5)</sup>, existe uma diferença básica entre elas que influenciou no processo das densificações dos compactos. Comparando a microestrutura da amostra AM01 com a aquela da AM02, fica evidente que houve uma redução significativa no tamanho da porosidade. Esse fato é um forte indicativo de que o grau de encruamento produzido na microestrutura da AM01 foi através do tratamento térmico removido da AM02. A deformação dessa última amostra foi facilitada quando ela foi novamente submetida a 2000 MPa e isso se traduziu na redução do tamanho de seus poros e conseqüentemente no aumento de sua densidade verde. Esses resultados mostram que sem alterar a pressão de compactação (2000 MPa), é possível aumentar a densificação dos compactos sem o uso de temperatura, a partir do retorno de suas microestruturas a um estado próximo ao seu original<sup>(6)</sup>.

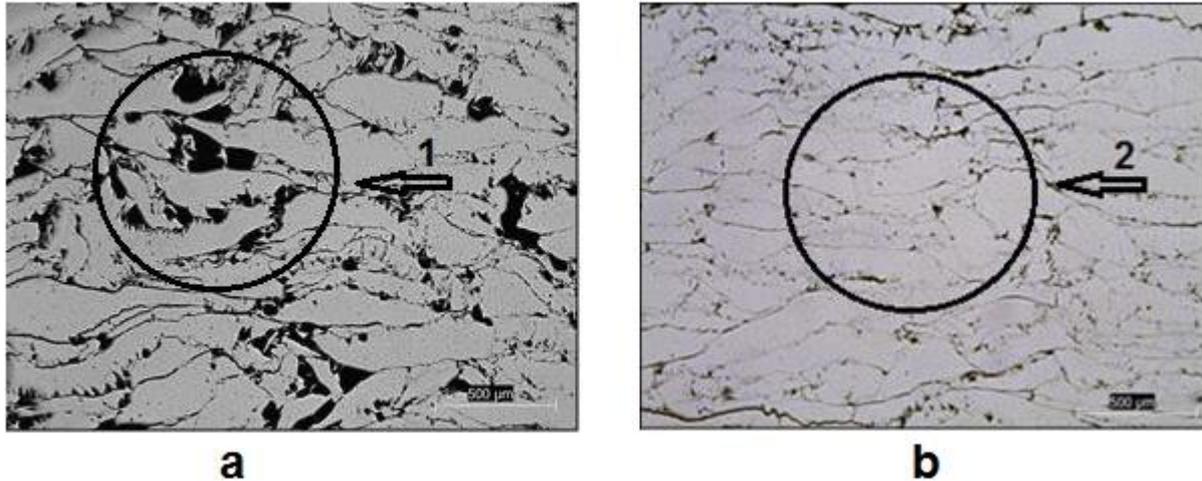


Figura 3. Imagem da microestrutura dos compactos produzidos sob pressão de 2000 MPa: a) AM01 sem o prévio tratamento térmico; b) AM02 com o prévio tratamento térmico.

A tabela 1 apresenta os valores de densidade verde e microdureza obtidos para as amostras compactadas em alta pressão (AM01) e (AM02) antes e após o seu tratamento térmico respectivamente. Observa-se que o valor da densidade da amostra AM01 ( 7,18 g/cm<sup>3</sup>) é menor do que aquele obtido para amostra AM02 (7,55 g/cm<sup>3</sup>). Esses resultados são coerentes com a discussão descrita no parágrafo anterior, onde foi apresentado uma associação entre o grau de encruamento presente na microestrutura compactada e a densificação dos compactos submetidos à alta pressão. Além disso, segundo a literatura<sup>(7)</sup>, o valor de densidade relativa de 96,30 % medido na amostra AM02, é típico de uma microestrutura em estágio final de sinterização (≥ 95%). Fato esse de grande importância, visto que, com o uso de técnicas convencionais de compactação e sem o uso de temperatura de sinterização, é improvável obter valores de densidade tão elevados em compactos de cavacos com diâmetro ≤ 0.85 mm e comprimento de até 5 mm.

Os valores de microdureza das amostras AM01 e AM02 são também apresentados na tabela 1. Comparando os resultados entre si observa-se que a primeira apresentou os maiores valores de microdureza. Como discutido anteriormente, isso provavelmente se deve principalmente a diferença de grau de deformação plástica (encruamento) presente nas microestruturas das amostras AM01 e AM02.

Tabela 1 Valores de densidade e microdureza das amostras compactadas em alta pressão.

Amostras	Densidades (g/cm <sup>3</sup> )		Microdureza (HV)
	Verde	Relativa (%)	
AM01	7.18 ±0,020	91.58	346.43 ± 30.73
AM02	7,55±0,023	96.30	199.47 ± 20.39
AM00	7,84±0,032	100	210.23 ± 16.62

**Obs.:**  
Densidade considerada como teórica medida na amostra AM00: 7,84 (g/cm<sup>3</sup>).

A figura 4 apresenta as microestruturas das amostras compactadas em alta pressão (2000 MPa) e sinterizadas em 1100°C. Comparando as microestruturas sinterizadas com aquelas compactadas apresentadas na Figura 3, observa-se que em todas as microestruturas sinterizadas ocorreu uma redução do tamanho dos poros e conseqüentemente aumento de sua densificação. As microestruturas são típicas de estágio final de sinterização ( $\leq 95\%$ ). Embora a temperatura de 1100°C tenha contribuído para isso o seu efeito nesse sentido não foi tão significativo quanto o da pressão. A força motriz produzida pela pressão para sinterizar as amostras foi significativamente maior do que aquela gerada pela temperatura. A partir desse fato quanto maior a densidade relativa de compactação (verde) maior a densidade relativa de sinterização. Esses resultados mostram os diferentes efeitos da pressão e temperatura na densificação das amostras. Embora a temperatura tenha contribuído para a redução da quantidade e tamanho dos poros nas amostras, ela não foi tão eficiente como a pressão. A principal responsável como força motriz para o aumento da densificação nas amostras foi a alta pressão usada no presente trabalho. Além disso, a rota adotada para elevar a densidade da amostra AM02 foi mais eficiente do que aquela usada somente para amostra compactada e posteriormente sinterizada em 1100°C durante 90 minutos.

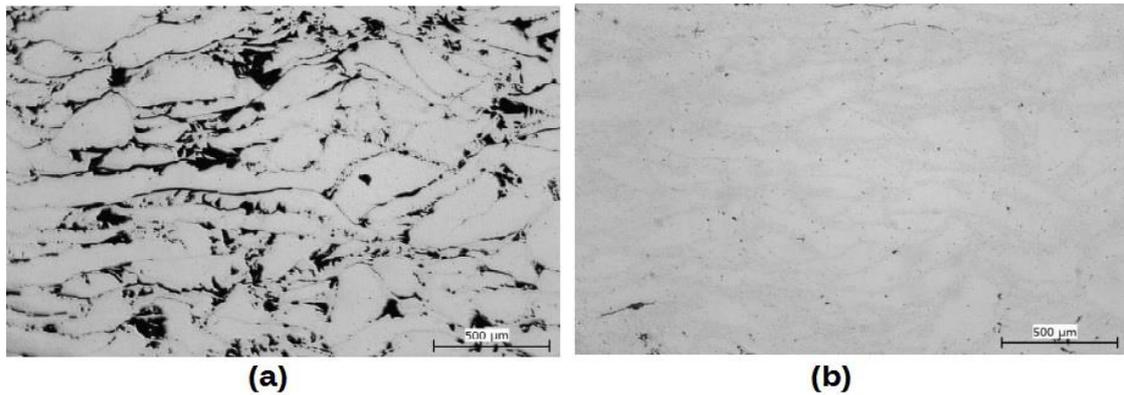


Figura 4. Micrografia das amostras sinterizadas em 1100°C durante 90 minutos: (a) amostra AM01 (b) amostra AM02.

A tabela 2 apresenta os valores de densidade e microdureza obtidos para as amostras sinterizadas em 1100°C. Nota-se que os valores de densidade relativa das amostras compactadas sob alta pressão e posteriormente sinterizadas, encontram-se entre 94,91 e 98,32 % e são coerentes com a discussão apresentada anteriormente, para as microestruturas das amostras sinterizadas apresentadas na Figura 4. Além disso, o aumento da densidade sinterizada da amostra AM02 para 7,71 g/cm<sup>3</sup> apresenta-se mais próximo de 100%, ou seja, daquele medido para amostra padrão (AM00).

Analisando os valores de microdureza apresentados na tabela 2 com os seus desvios respectivos, nota-se um comportamento coerente dessa propriedade mecânica com as alterações microestruturais observadas na amostra AM02, ou seja, o aumento da densificação influenciou no aumento dos valores médios de microdureza. O desvio padrão ainda elevado se deve a não obtenção de amostras totalmente densas (100%).

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

Amostras	Densidades (g/cm <sup>3</sup> )		Microdureza (HV)
	Sinterizada	Relativa (%)	
AM01	7.44 ±0,027	94.91	162.23 ± 30.76
AM02	7,71±0,020	98.32	207.81 ± 38.67
AM00	7,84±0,032	100	210.23 ± 16.62

Obs.:

Densidade considerada como teórica medida na amostra AM00: 7,84 (g/cm<sup>3</sup>).

## CONCLUSÕES

A alta pressão contribuiu de uma forma dinâmica para a atuação simultânea ou não da deformação, soldagem, encruamento e fratura em materiais dúcteis como o

usado no presente estudo, e isso se traduziu em valores de densidade verde típicos de amostras sinterizadas que se encontram no estágio final de sinterização;

O grau de deformação (encruamento) presente em todas as amostras compactadas produziu valores médios de microdureza maiores do que aqueles medidos na amostra original;

Diferentemente do encontrado na literatura para sinterização de amostras via técnicas convencionais, foi desenvolvida no presente trabalho uma rota que é reproduzível para a obtenção de corpos altamente densificados sem o uso de temperatura.

Embora a temperatura tenha contribuído para a redução do tamanho dos poros na microestrutura das amostras, ela não foi tão eficiente como a pressão. A principal responsável como força motriz para a redução do tamanho de poros e conseqüentemente aumento da densificação nas amostras foi a alta pressão usada no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

1. FENTON, M. Iron and Steel Recycling in the United States in 1998. **Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States**. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Reston, 1998.
2. SOARES, S. R. S. Sinterização de TiB<sub>2</sub> em Altas Pressões. 2003. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.
3. REILLY, J.; RAE, W. N. Physico-Chemical Methods. London: Methuen & CO LTD., 1954.
4. PRATTEN, N. A. Review: the precise measurement of the density of small samples. *Journal of Materials Science*, v.16,p.1737-1747, 1981.
5. RESENDE, L. Estudo do comportamento da sinterização de compactos de cavacos de um aço SAE 1050 obtidos sob alta pressão. 2014. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
6. BRANDÃO, L. **Estudo da densificação de cavacos ferrosos submetidos à alta pressão**, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Mecânica – Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas do campus Universitário de Rondonópolis da Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, 2015.

7. GERMAN, R. Sintering Theory and Practice. New York: J, Wiley & Sons, 1996.  
550 p.

## **A PRELIMINARY STUDY OF EFFECT OF COMPACTION PRESSURE IN DENSIFICATION OF STEEL CHIPS**

*The compaction of powdered materials is carried out primarily to increase the density of the material. If the ultimate goal of the over-all process is the attainment of minimum porosity, compaction is responsible for most of the densification. This work aims at evaluating the effects of on the compaction and subsequent sintering of steel chips. Pressures up to 3000 MPa were used to compact the steel chips in a piston/cylinder matrix. The compacts obtained were sintered at 1100°C for 90 min under of carbon atmosphere. The samples were characterized by optics microscopic, density and micro hardness measures. Green and sintered densities values were 7.55 g/cm<sup>3</sup> and 7.71 g/cm<sup>3</sup> respectively. Results demonstrated that densification of samples was increased significantly by compaction pressure.*

**Keywords:** *Chips, Carbon Steel, High Pressure, Densification, Driving Force of Sintering.*