

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DO EFEITO DO TEMPO NO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL DE CAVACOS FERROSOS COMPACTADOS SOB ALTA PRESSÃO.

Lucas Ascari Salvalaggio, lucas-salvalaggio@hotmail.com¹

José Mauro Pimenta de Sousa Messias, josemauroufmt@bol.com.br¹

Leonardo Carvalho Brandão, leonardo.c.brandao@hotmail.com¹

Leonardo Resende, resende_leo@hotmail.com¹

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

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

Resumo: No presente trabalho, foi estudado a evolução do efeito do tempo no comportamento microestrutural de compactos de cavacos ferrosos produzidos sob alta pressão ($P > 1000$ MPa). O principal objetivo foi determinar as condições de tratamento térmico adequadas para se obter uma microestrutura recristalizada nos compactos produzidos. Cavacos grosseiros de um aço médio carbono ($\leq 0,85$ mm) provenientes de um processo de usinagem a seco foram compactados a frio sob uma pressão de 3000 MPa, produzindo amostras cilíndricas com diâmetro de 8 mm e 3 mm de altura. Posteriormente, as amostras passaram por um tratamento térmico em um forno elétrico mufla sob atmosfera ar/carbono nas seguintes condições: temperatura de 700 °C e tempo de permanência no forno de até 22 minutos. Todas as amostras obtidas no presente trabalho foram caracterizadas por meio de microscopia ótica e medidas de microdureza. Embora não se possa afirmar com clareza a transição de recristalização para crescimento de grão, os resultados iniciais indicam que, na temperatura de 700 °C, ocorrem alterações microestruturais à medida que aumenta o tempo de tratamento térmico.

Palavras-chave: Compactos de cavacos ferrosos, alta pressão, recristalização, tempo de tratamento térmico, microdureza.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria em geral, até pouco tempo atrás, os resíduos sólidos tais como cavacos ou pós grosseiros, de materiais ferrosos produzidos em processos de usinagem, eram considerados como sobras dos processos que deveriam ser descartados, sem maiores preocupações quanto à sua destinação (Höganäs Press, 2012).

A preocupação mundial com o reaproveitamento de resíduos sólidos tais como cavacos tem levado indústrias a buscar alternativas para o destino final dos mesmos. A Metalurgia do Pó é uma delas, pois, por seu intermédio, pode-se transformar esses materiais em compactos de pós ou de cavacos, sob baixa e alta pressão, respectivamente, 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, 2007).

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 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 extensão 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 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).

A recristalização é o processo de formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação e que são equiaxiais, com baixas densidades de discordâncias, e que são característicos das condições que existem antes do processo de trabalho

a frio. A força motriz para produzir essa nova estrutura de grão é a diferença que existe entre as energias internas do material submetido a deformação e do material sem deformação (Callister, 2002).

Assim, estudou-se, a possibilidade de recristalização de compactos de cavacos ferrosos de aço SAE 1050, de tamanho menor ou igual a 0,85 mm, compactados em alta pressão (3000 MPa) e avaliou-se o efeito do tempo no comportamento da sua microestrutura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, o material de partida usado foi cavacos de aço SAE 1050 obtidos a partir de usinagem a seco em um tarugo desse material. Na Fig. 1 são apresentadas as características dos cavacos cujo diâmetro após peneiramento foi $\leq 0,85$ mm. Enquanto na Fig. 1-a observam-se cavacos com uma distribuição heterogênea de morfologia e comprimento, na Fig. 1-b nota-se no interior desse material uma típica estrutura lamelar composta por finas camadas de aço. Amostras cilíndricas desses cavacos com 8 mm de diâmetro e 3 mm de altura foram produzidas por compactação a frio sob pressão uniaxial de 3000 MPa. Estas amostras passaram por um tratamento térmico em um forno elétrico mufla sob atmosfera ar/carbono nas seguintes condições: temperatura de 700 °C e tempo de permanência no forno de até 22 minutos. Também foi compactada uma amostra (AM3GPa-Comp) de mesmas dimensões, com a finalidade de servir de referência para a análise e discussão dos resultados, ou seja, a mesma não foi submetida a nenhum tratamento térmico.

Todas as amostras foram caracterizadas desde a sua condição de partida. Para tanto foram usadas técnicas de caracterização tais com Microscopia Óptica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e medidas de microdureza. Nesse contexto, os cavacos foram caracterizados através de macrografias e do MEV. Posteriormente, realizou-se a microscopia ótica (MO) dos compactos previamente embutidos e devidamente polidos com alumina até uma granulometria $\cong 1 \mu\text{m}$ e também atacados com o reagente químico Nital 3,5%, com o objetivo de identificar alterações microestruturais, importante para caracterizar a evolução da recristalização da microestrutura das amostras. Para isso, foi utilizado um microscópio óptico Leica com ampliação de imagem para até 1000 vezes. A fim de associar a dureza com o nível de deformação presente nas microestruturas após o tratamento térmico, foram realizadas medidas de microdureza em todas as amostras em um microdurômetro Digimess HV-1000. As condições de medidas usadas foram carga de 4,90 N e intervalo de repouso da ponteira sobre a amostras de 10 s.

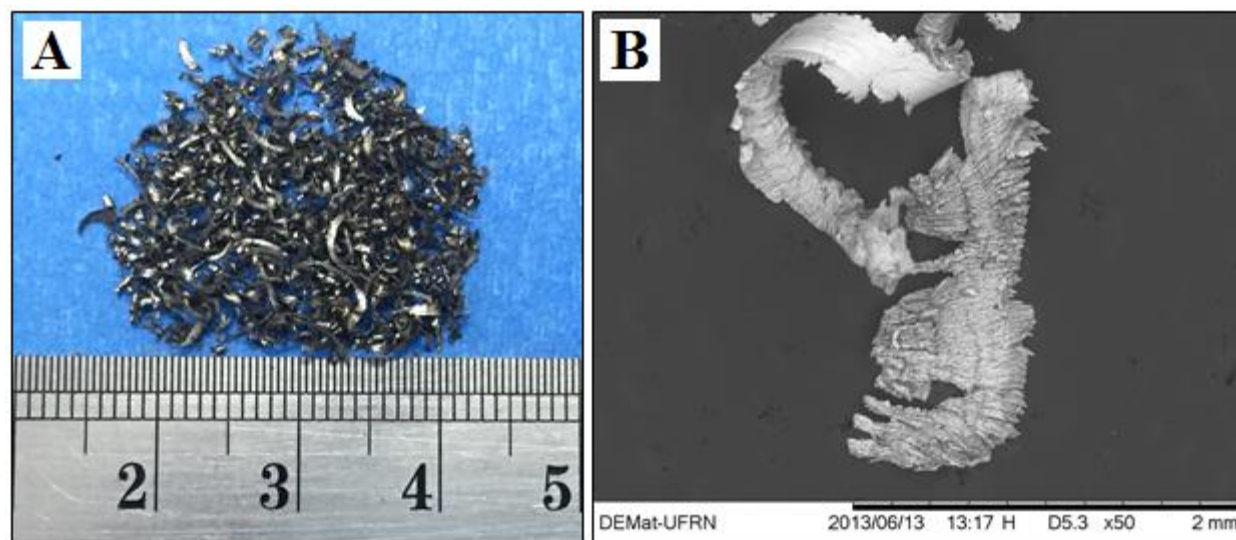


Figura 1 - Cavaco de aço SAE 1050: (a) macrografia dos cavacos após usinagem apresentando uma distribuição heterogênea de morfologia e de comprimento (até 5 mm) e (b) micrografia de MEV mostrando o diâmetro do cavaco menor que 0,85 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como dito anteriormente, cavacos ferrosos foram compactados sob uma pressão uniaxial de 3000 MPa, originando amostras cilíndricas. Na Fig. 2, pode-se observar as microestruturas de uma amostra compactada (AM3GPa-Comp) sem e com ataque de Nital 3,5 %. Observa-se, na Fig. 2-a, a presença reduzida de porosidade (pontos escuros, identificados por setas), um dos benefícios de usar o processo de compactação em alta pressão. Nas Fig. 2-b e Fig. 2-c são apresentadas as microestruturas atacadas quimicamente, sendo possível identificar nelas regiões claras e escuras, que segundo a literatura (Colpaert, 1974), representam a ferrita (ver setas na Fig. 2-c) e a perlita (ver região circulada na Fig. 2-c). Além disso, é possível observar nas Fig. 2-b e Fig. 2-c que a ferrita e a perlita apresentam uma textura com direção preferencial de deformação. Esse resultado é um forte indicativo de que a pressão de 3000 MPa imposta aos compactos gerou nos cavacos um significativo aumento de seu nível de deformação plástica ou encruamento.

Um material quando está encruado, diz-se que ele está termodinamicamente instável. Então, o principal potencial termodinâmico para que a recristalização ocorra é o nível de deformação do material, ou seja, a energia interna armazenada no material pelos defeitos cristalinos, principalmente na forma de discordâncias. À medida que é fornecida temperatura suficiente para difusão dos átomos, essa energia é diminuída pelo rearranjo e diminuição na quantidade de defeitos (Doherty et al., 1997; Haessner, 1978). Quando há a formação de uma região livre de defeitos circundada por um contorno de alto ângulo, a recristalização prossegue por um crescimento desse núcleo sobre a matriz encruada (Padilha e Siciliano, 1996). O crescimento das regiões recristalizadas pela migração de contornos de alto ângulo continua até que os grãos recristalizados se toquem mutuamente. Com isso, as amostras compactadas foram tratadas termicamente em um forno elétrico mufla na temperatura de 700 °C.

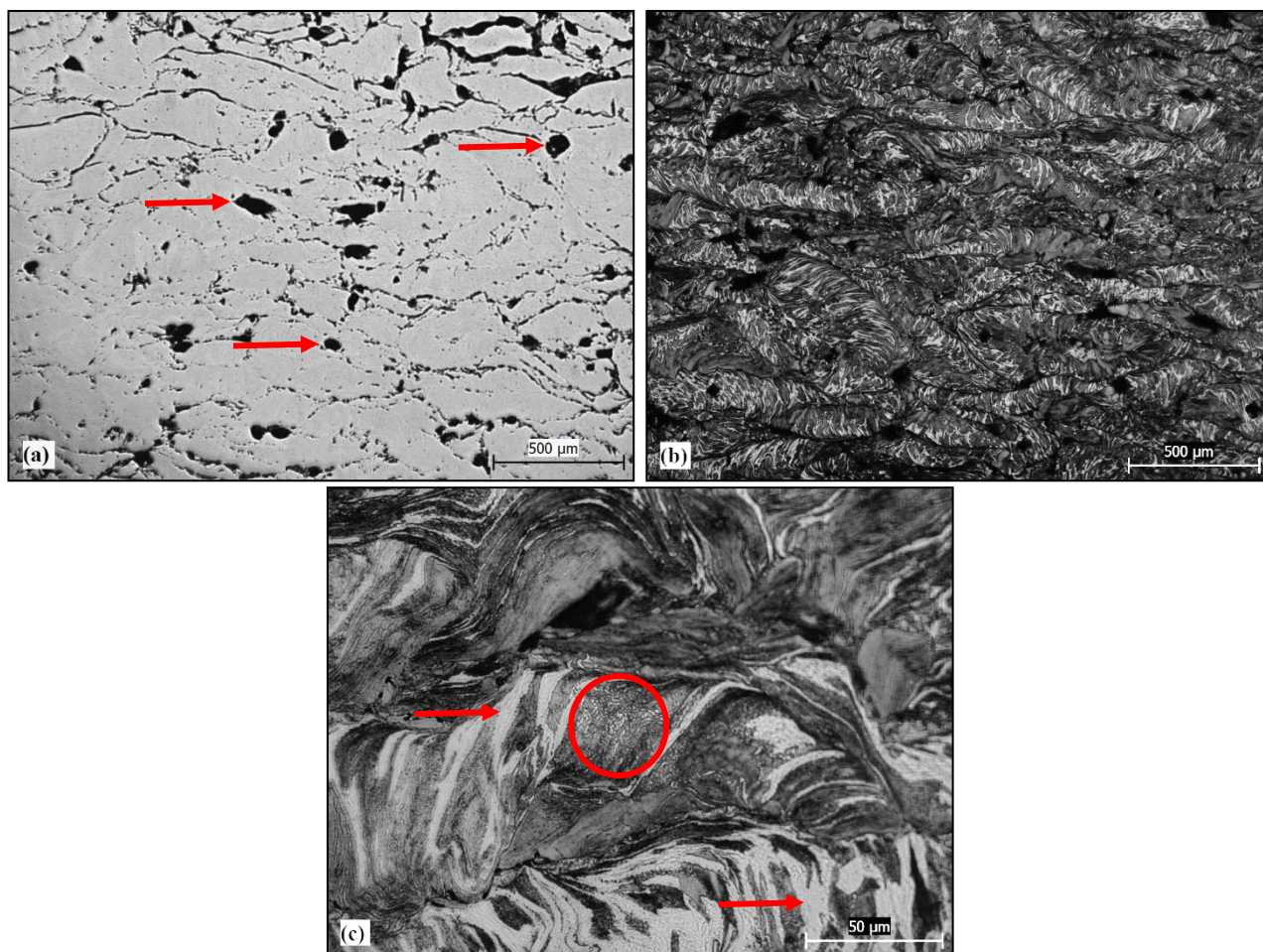


Figura 2 – Microestrutura da amostra compactada em 3000 MPa (AM3GPa-Comp): a) amostra polida (barra de 500 µm), b) amostra atacada com Nital 3,5 % (barra de 500 µm) e c) amostra atacada com Nital 3,5 %, com destaque para a ferrita (seta) e a perlita (círculo) (barra de 50 µm).

Como o objetivo principal deste trabalho é estudar o efeito do tempo de tratamento térmico no comportamento microestrutural das amostras compactadas, na Fig. 3 é possível analisar a evolução microestrutural das amostras compactadas e tratadas termicamente. Foram utilizados tempos de tratamento térmico de até 22 minutos, como está apresentado, em sequência, nas micrografias da Fig. 3: a) amostra tratada termicamente por 10 minutos (AM3GPa-10min); b) amostra tratada termicamente por 15 minutos (AM3GPa-15min); c) amostra tratada termicamente por 19 minutos (AM3GPa-19min) e d) amostra tratada termicamente por 22 minutos (AM3GPa-22min).

Comparando a Fig. 3-a com a Fig. 2-c não é possível dizer que ocorreram grandes alterações em relação a textura de deformação na microestrutura das amostras, ou seja, os grãos ferríticos e perlíticos encontram-se ainda deformados preferencialmente numa direção. Provavelmente, a temperatura de 700 °C e o tempo de 10 minutos não foram suficientes para a difusão dos átomos e consequente diminuição da energia interna armazenada nos cavacos pelos defeitos cristalinos. Possivelmente, pode ter ocorrido o fenômeno de recuperação na amostra AM3GPa-10min, pois, após o aquecimento, não é observado modificações de forma nem de tamanho de grão, ou seja, não ocorreu o surgimento de novos grãos recristalizados. Porém, um dos efeitos da recuperação é a modificação de algumas propriedades físicas e mecânicas do material tratado termicamente, devido a eliminação de discordâncias em excesso presentes no material em virtude do encruamento (Novikov, 1994). Isso poderá ser confirmado com os resultados de microdureza, apresentados posteriormente.

Já nas Fig. 3-b e Fig. 3-c verifica-se a presença de novos grãos recrystalizados, maiores ou menos equiaxiais, porém a microestrutura das amostras ainda apresenta uma grande quantidade de textura de deformação. De acordo com a literatura (Padilha e Siciliano, 1996), a amostra AM3GPa-15min pode estar no início da recrystalização, com o surgimento de alguns grãos menores ao lado de grãos deformados que estão alongados. Já a amostra AM3GPa-19min provavelmente está num estágio com mais de 50% de recrystalização e se encaminhando para uma recrystalização completa, devido ao maior número de novos grãos recrystalizados, os quais se tocam mutuamente, e também ao desaparecimento gradual dos grãos deformados.

Na Fig. 3-d, referente a amostra tratada termicamente por 22 minutos, nota-se que desapareceram os grãos ferríticos e perlíticos deformados preferencialmente numa direção. De acordo com a literatura, o desaparecimento dessa textura deformada pode ser o indicativo da presença de uma recrystalização primária a 100% na microestrutura do material (Sousa, 2006). Além disso, é possível verificar que os novos grãos recrystalizados se tocam mutuamente, indicando que houve um crescimento das regiões recrystalizadas pela migração de contornos de alto ângulo (Padilha e Siciliano, 1996).

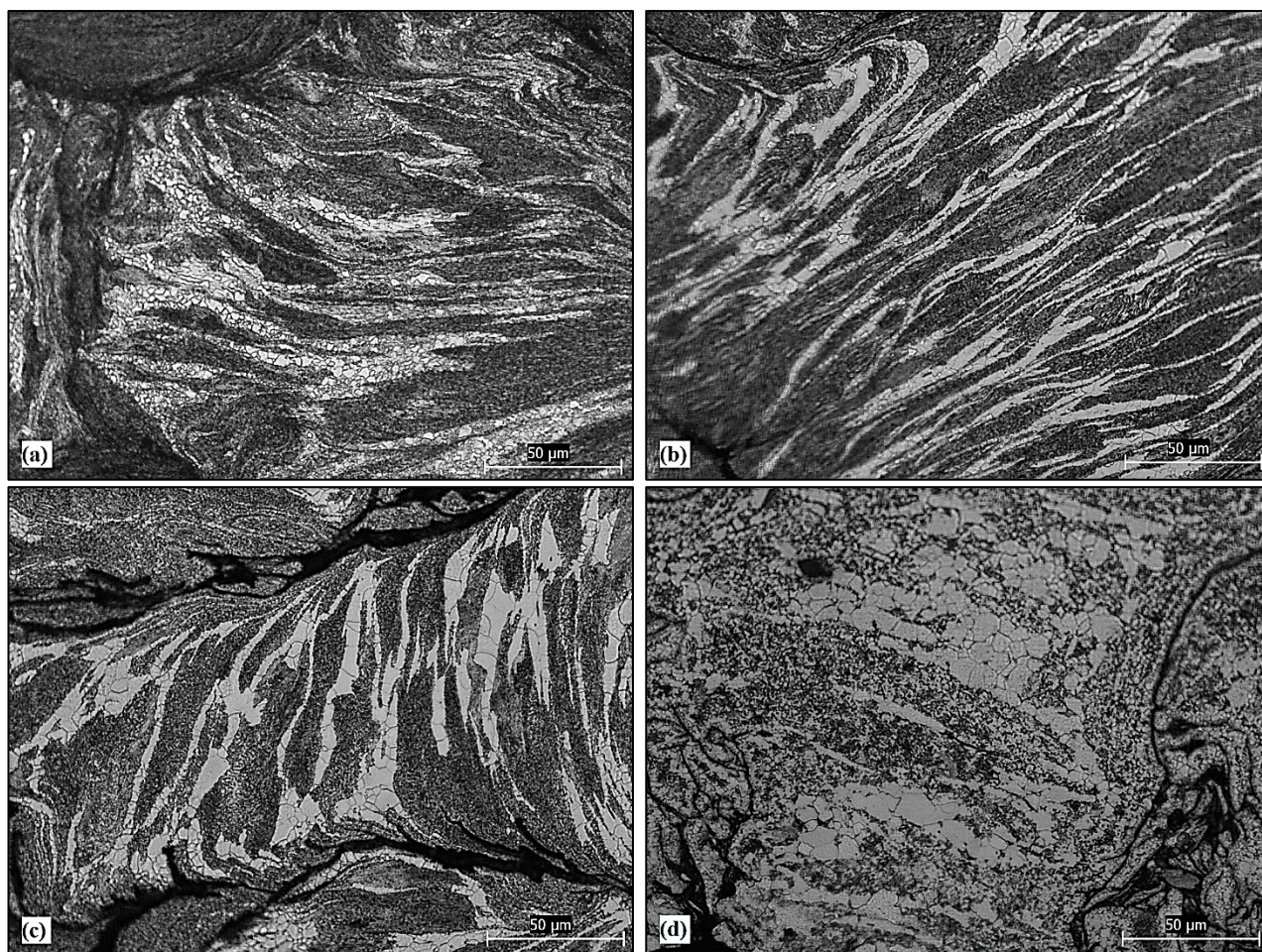


Figura 3 – Microestrutura das amostras compactadas em 3000 MPa, tratadas termicamente em diferentes tempos e atacadas com Nital 3,5 % (barra de 50 µm): a) AM3GPa-10min, b) AM3GPa-15min, c) AM3GPa-19min e d) AM3GPa-22min.

A Tab. 1 e a Fig. 4 apresentam os valores de microdureza da amostra compactada e daquelas compactadas e tratadas termicamente em diferentes tempos. De acordo com a literatura (Resende, 2014), o valor médio da microdureza de um aço SAE 1050 é 210 ± 17 HV, valor esse que será utilizado nas próximas discussões. A amostra AM3GPa-Comp é a que apresenta o maior valor de microdureza, coerente com a micrografia apresentada nas Fig. 2-b e Fig. 2-c, nas quais as fases ferrita e perlita apresentaram uma textura com direção preferencial de deformação, ou seja, encontram-se com um elevado nível de encruamento.

Nota-se que a medida que o tempo de tratamento aumenta, os valores de microdureza das amostras diminuí. O valor de microdureza da amostra AM3GPa-10min é menor do que o valor de microdureza da amostra apenas compactada, reforçando a hipótese de que possa ter ocorrido o fenômeno de recuperação nesta amostra. Na recuperação, as propriedades físicas e mecânicas que sofreram modificações devido ao encruamento tendem a voltar aos seus valores originais (Novikov, 1994). Como não foi observado nenhuma modificação de forma nem de tamanho de grão na micrografia da amostra (Fig. 3-b), esse resultado de microdureza pode estar relacionado a eliminação de discordâncias em excesso presentes no material encruado. Comparando os desvios padrões dessas amostras, observa-se que a tratada

apresenta um valor maior. Isso pode ser um indicativo que o tempo de 10 minutos não foi suficiente para produzir uma microestrutura uniforme na amostra AM3GPa-10min.

As amostras com tempo de tratamento térmico variando de 15 a 22 minutos apresentam valores de microdureza coerentes com a evolução de uma microestrutura para o estágio de recristalização. A amostra AM3GPa-15min apresenta valor de microdureza menor que as anteriores. Isso pode ser um indicativo do início da recristalização na microestrutura dessa amostra. Porém, o valor de desvio padrão elevado ($\pm 14,80$ HV) mostra que ainda não foi obtido uma microestrutura uniforme na amostra tratada em 15 minutos. Há ainda a presença de grãos deformados que estão alongados e texturizados (Fig. 3-b). As amostras AM3GPa-19min e AM3GPa-22min apresentam os menores valores de microdureza e de desvio padrão, indicando que estão próximas de uma recristalização completa. Comparando o valor de microdureza e o baixo desvio padrão da amostra tratada termicamente por 22 minutos com o valor de microdureza encontrado na literatura para o aço SAE 1050, pode-se dizer que essa amostra está próxima do seu estado original, pois os valores são praticamente iguais. Ou seja, desapareceram os grãos ferríticos e perlíticos deformados preferencialmente numa direção e surgiram novos grãos recristalizados na AM3GPa-22min (Fig. 3-d). Provavelmente, se o tratamento térmico for realizado em tempos superiores a 22 minutos, ocorrerá o crescimento dos grãos na microestrutura das amostras.

Tabela 1: Valores de microdureza (HV) das amostras. Valores médios obtidos em 10 medidas.

Amostras	Microdureza (HV)
AM3GPa-Comp	$391,03 \pm 16,79$
AM3GPa-10min	$319,34 \pm 19,29$
AM3GPa-15min	$270,56 \pm 14,80$
AM3GPa-19min	$238,77 \pm 5,13$
AM3GPa-22min	$203,62 \pm 5,72$
Obs: Microdureza do aço SAE 1050: 210 ± 17 HV (Resende, 2014).	

O gráfico apresentado na Fig. 4 facilita o acompanhamento da evolução da microdureza na microestrutura da amostra de aço SAE 1050 compacta e também daquelas amostras tratadas termicamente. Com o aumento do tempo de tratamento térmico, as microdurezas tendem a se aproximarem do valor de microdureza encontrado na literatura para esse aço, sendo um indicativo de que o material, anteriormente encruado, provavelmente voltou as suas propriedades originais.

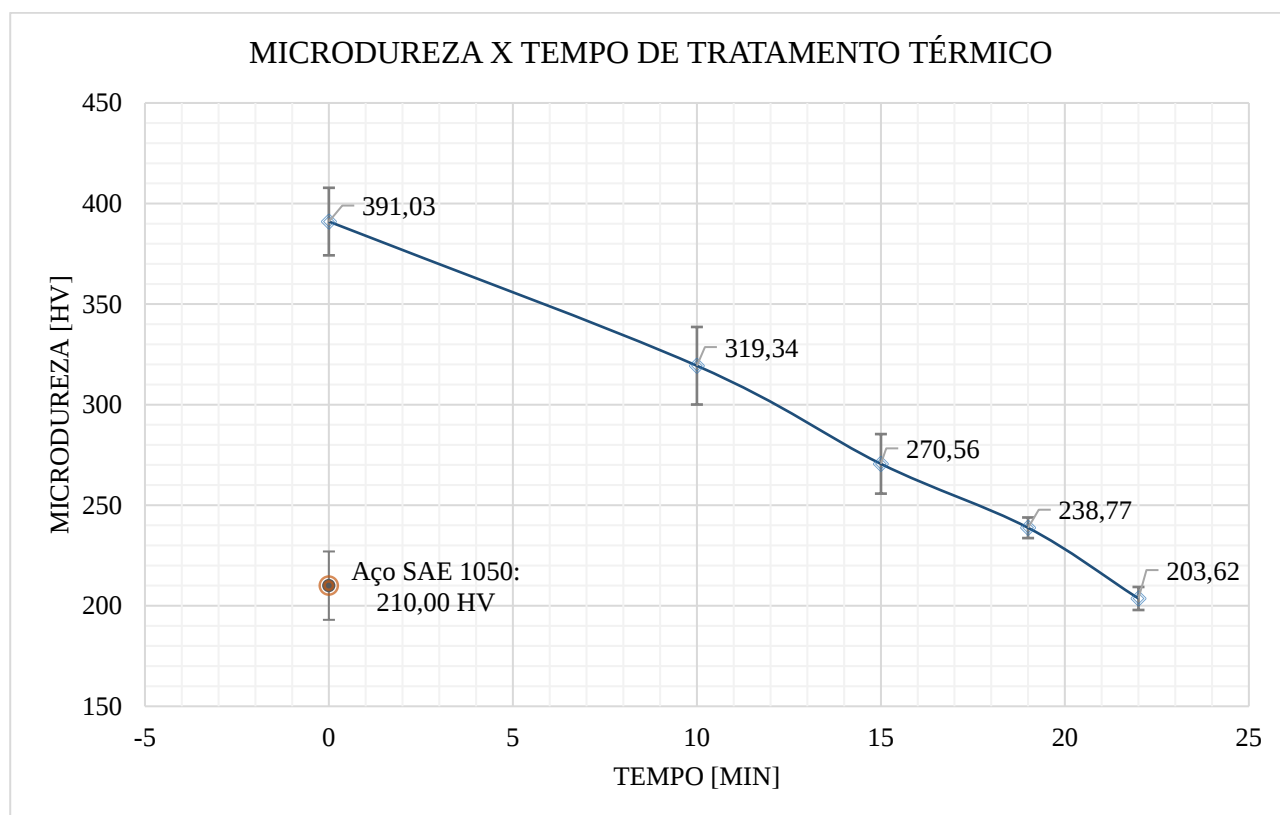


Figura 4 – Gráfico da evolução da microdureza em função do tempo de tratamento térmico.

4. CONCLUSÕES

As condições de tratamentos térmicos usados no presente trabalho, foram eficientes para se identificar aquele mais adequado para se obter um comportamento microestrutural semelhante ao observado no aço SAE 1050 em seu estado de estrutura original.

Embora não se possa afirmar com clareza a transição de recristalização para crescimento de grão, os resultados iniciais indicam que, na temperatura de 700°C, ocorreram alterações microestruturais coerentes com a evolução de uma microestrutura encruada para uma recristalizada à medida que aumenta o tempo de tratamento térmico.

A fim de investigar a transição da recristalização para o crescimento de grão, as amostras serão submetidas a uma análise de difração de Raios X.

5. REFERÊNCIAS

- Callister Jr., W. “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- Colpaert, H. “Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns”. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.
- Delforge, D. “Cavaco de um Aço Inoxidável Austenítico Reciclado por Metalurgia do Pó: Uma Rota Alternativa para o Reaproveitamento de Materiais Metálicos”. 2007. 94 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.
- Doherty, R.; Hughes, D.; Humphreys, F.; Jonas, J.; Juul Jensen, D.; Kassner, M.; King, W.; Mcnelley, T.; Mcqueen, H.; Rollett, A. “Current issues in recrystallization: a review”. Materials Science and engineering A. v. 238, p. 219-274. 1997.
- Haessner, F. “Systematic survey and basic problems of recrystallization”. In: Frank Haessner Editor. Recrystallization of metallic materials. Stuttgart, Germany: Institut für Werkstoffkunde und Herstellungsverfahren Technische Universität Braunschweig, 1978. Cap. 1. p. 1-10.
- Höganäs Press. “O novo mundo da sinterização”. Höganäs Press, p. 6-8, set. 2008. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/recompo/Hoganas_Press.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2012.
- Novikov, I. “Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais”. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1994.
- Padilha, A.; Siciliano Jr., F. “Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura”. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.
- 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.
- Soares, S. R. S. “Sinterização de TiB2 em Altas Pressões”. 2003. 124 (Doutorado). PGCIMAT, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Sousa, G. “Influência do Tratamento térmico de Recozimento de Recristalização em Aço SAE 1010 Deformado Plasticamente a Frio”, 2006. Monografia de Graduação em Engenharia Metalúrgica – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ouro Preto, 2006.

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

José Mauro Pimenta de Sousa Messias, josemauroufmt@bol.com.br¹

Leonardo Carvalho Brandão, leonardo.c.brandao@hotmail.com¹

Leonardo Resende, resende_leo@hotmail.com¹

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

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

Abstract. *In this study, the evolution of the effect of time on the microstructural behavior of compact ferrous chips produced under high pressure was studied ($P > 1000$ MPa). The main objective is to determine the appropriate heat treatment conditions to obtain a recrystallized microstructure produced in compact. Chips of a medium carbon steel ($\leq 0,85$ mm) from a dry milling process were cold compacted at a pressure of 3000 MPa to produce cylindrical samples with a diameter of 8 mm and 3 mm in height. Subsequently, the samples were subjected to a heat treatment in an electric muffle furnace under atmosphere air/carbon under the following conditions: temperature 700 °C and permanence time in the furnace up to 22 minutes. All samples obtained in this study were characterized by optical microscopy and microhardness measurements. Although we can not say clearly recrystallization transition to grain growth, the initial results indicate that the temperature of 700 °C, microstructural changes occur with increasing time of heat treatment.*

Keywords: *Compacts ferrous chips, high pressure, recrystallization, time heat treatment, microhardness.*