

EFEITO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO NAS LIGAS Fe-30Ni-2Mo e Fe-30Ni-1Mo OBTIDAS POR METALURGIA DO PÓ

V. H. C. Alves¹; R. C. Lima da Silva²; J. P. C. Soares¹; A. V. R. Gomes¹; M. Q. Silva Jr.¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, UFERSA; ²CTMA, IFRN
Av. Contabilista Fernando Vitor, 1521, casa 418, Dix-Sept Rosado, Mossoró-
RN, CEP: 59609-000; victoralves@outlook.com

A Metalurgia do Pó é um processo de fabricação que permite a obtenção de peças sinterizadas com origem a partir de pós metálicos ou não. O método abrange as etapas de obtenção do pó, mistura, compactação e sinterização. A etapa de sinterização, é uma das mais importantes e consiste em fornecer condições necessárias para que ocorra a difusão no pó compactado. O presente trabalho avaliou o efeito da variação da temperatura de sinterização de ligas Fe-30Ni-2Mo e Fe-30Ni-1Mo no processo da Metalurgia do Pó. As amostras foram sinterizadas a 1000°C, 1050°C e 1100°C e submetidas a análise de Microdureza e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A partir dos resultados foi possível observar a presença de duas fases, uma com microdureza média de 168,17HV e a outra com 530,5HV. Através do MEV observou-se um maior coalescimento das partículas com o aumento de temperatura, levando a uma maior densidade.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó, Sinterização, Fe-Ni-Mo, Temperatura de sinterização.

INTRODUÇÃO

A Metalurgia do Pó (MP) é um processo de fabricação alternativo de peças metálicas que se diferencia dos outros processos convencionais pelas características como: utilização de pós metálicos ou não metálicos, fabricação em série de componentes com geometrias complexas, aproveitamento de matéria-prima e alta eficiência energética [1, 2]. Além disso, essa técnica permite que se altere o tipo e a composição dos diversos pós metálicos usados no processo, implicando na obtenção de variadas peças e ligas. Elementos de liga como molibdênio, manganês, níquel e cromo têm sido utilizados com o objetivo de aumentar o desempenho de componentes fabricados por MP [3].

Peças mecânicas, fabricadas por Metalurgia do Pó (MP), encontram várias aplicações nas indústrias automobilística, de eletroeletrônicos, informática, têxtil, equipamentos agrícolas entre outras [2]. As pesquisas por processos de fabricação que utilizem recursos energéticos e materiais de forma mais racional e econômica, encontram na metalurgia do pó uma alternativa aos métodos de fabricações tradicionais [4]. Pois existem preocupações cada vez mais urgentes com a utilização mais racional e econômica dos recursos materiais e energéticos disponíveis, resultando na preservação do meio ambiente.

O controle da porosidade e a homogeneidade das propriedades mecânicas das peças obtidas por MP são um desafio a ser trabalhado. Entender o processo e controlá-lo é vital. Compreender o processo significa poder modificar as condições de sinterização ou características da matéria-prima afim de se melhorar a eficiência energética do processo e melhorar as propriedades do material produzido. Já controlar, implica em prever as propriedades da estrutura sinterizada a partir de matérias-primas específicas, em determinadas condições. Com base nisso, o presente trabalho propôs produzir duas ligas metálicas (Fe-30Ni-2Mo e Fe-30Ni-Mo) obtidas por Metalurgia do Pó através de sinterização por fase sólida com o intuito de viabilizar o uso dessa liga na indústria. Objetivou-se analisar a influência da temperatura de sinterização, sobre as propriedades de microdureza das fases constituintes dos produtos sinterizados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Pós de Ferro (297 μm), Níquel (0,97 μm) e Molibdênio (3,5 μm) adquiridos pela JB Química Indústria e Comércio Ltda foram utilizados na pesquisa. Segundo o fabricante, a obtenção do produto final deu-se por processos de atomização e redução, suas composições químicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos pós, fornecida pelo fabricante.

Composição Química dos Pós (%)									
	Fe	Ni	Mo	C	O	Mn	S	Si	P
Pós de Fe	99,58	—	—	0,01	—	0,3	0,005	0,09	0,01
Pós de Ni	—	99,93	—	0,07	—	—	—	—	—
Pós de Mo	—	—	99,82	0,008	0,17	—	—	—	—

FONTE: JB QUÍMICA

A influência da composição química das ligas obtidas por metalurgia do pó foi avaliada através da porcentagem de molibdênio presente. Para isso foram produzidos corpos-de-prova com duas composições diferentes, Fe-30Ni-1Mo e Fe-30Ni-2Mo com composições de 69%Fe + 30%Ni + 1%Mo em peso e 68%Fe + 30%Ni + 2%Mo em peso, respectivamente. Os pós de cada liga foram misturados em um recipiente cônico utilizando um torno mecânico Nardini – Nodus 220 Gold a uma velocidade de 30 rpm por um período de 4 horas.

Amostras de 6,0 gramas em média foram compactadas a frio, em matriz cilíndrica com diâmetro de 15,0 mm, por prensagem uniaxial de ação simples, onde foi utilizada uma prensa hidráulica de capacidade máxima de 15,0 toneladas. A carga de compactação foi de 4,0 toneladas, resultando em uma pressão de 222,0 MPa. A matriz de compactação, por sua vez, é composta por punção superior, matriz e punção inferior. Na Fig. 1 é apresentado um desenho esquemático da matriz de compactação utilizada e a imagem de um corpo-de-prova após a compactação.

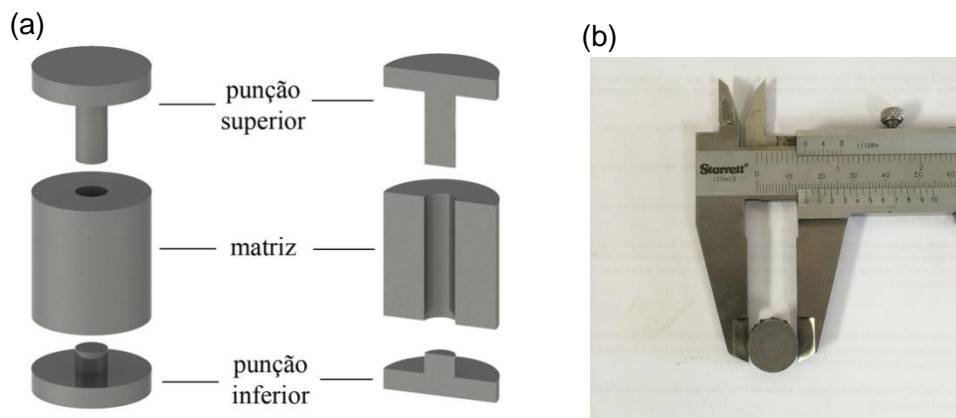


Fig. 1 – Desenho esquemático da matriz de compactação (a) e imagem do corpo-de-prova compactado (b).

A influência da temperatura de sinterização foi estudada utilizando três diferentes temperaturas: 1000 °C, 1050 °C e 1100 °C. O processo ocorreu em um forno elétrico sem proteção gasosa, a uma taxa de aquecimento de aproximadamente 8 °C/min. As amostras foram colocadas no forno a temperatura ambiente onde prosseguiu-se o aquecimento até a temperatura desejada seguido de permanência de 60 minutos e resfriamento ao forno até a temperatura ambiente. Pelo fato das temperaturas de fusão do ferro (1537,85°C), níquel (1454,85°C) e molibdênio (2623°C) serem maiores que a máxima temperatura de sinterização imposta pelo experimento, a sinterização se deu por fase sólida. Na Tabela 2 são apresentadas as informações do processo de preparação das amostras.

Tabela 2 – Características do processo de preparação das amostras por metalurgia do pó.

Fe (%p)	Ni (%p)	Mo (%p)	Temperatura (°C)	Carga de Compactação (t)
68	30	2	1000	4
68	30	2	1050	4
68	30	2	1100	4
69	30	1	1000	4
69	30	1	1050	4
69	30	1	1100	4

Após a sinterização as amostras foram preparadas para análise metalográfica utilizando lixas de granulometria de 180, 220, 360, 400, 500, 600, 800 e 1200, polimento com pasta diamantada (3µm) e ataque químico (Nital 2%). Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas utilizando um equipamento modelo VEGA 3 LMU do fabricante TESCAN. Em seguida realizou-se ensaios de microdureza, na escala Vickers utilizando uma carga de 50 gf, em um microdurômetro HMV-2E da Shimadzu. Foram realizadas 10 medições de microdureza em cada fase identificada nas imagens.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 2 são apresentadas as imagens de MEV das amostras sinterizadas com 1 e 2% de Mo nas temperaturas de 1000°C, 1050°C e

1100°C. Após a realização das etapas de mistura, compactação e sinterização foi possível perceber que o resultado do processo foi um material que já não pode ser definido como pó metálico. Observa-se que o produto final apresentou coesão entre as partículas e solidez o que é resultado de uma sinterização consolidada.

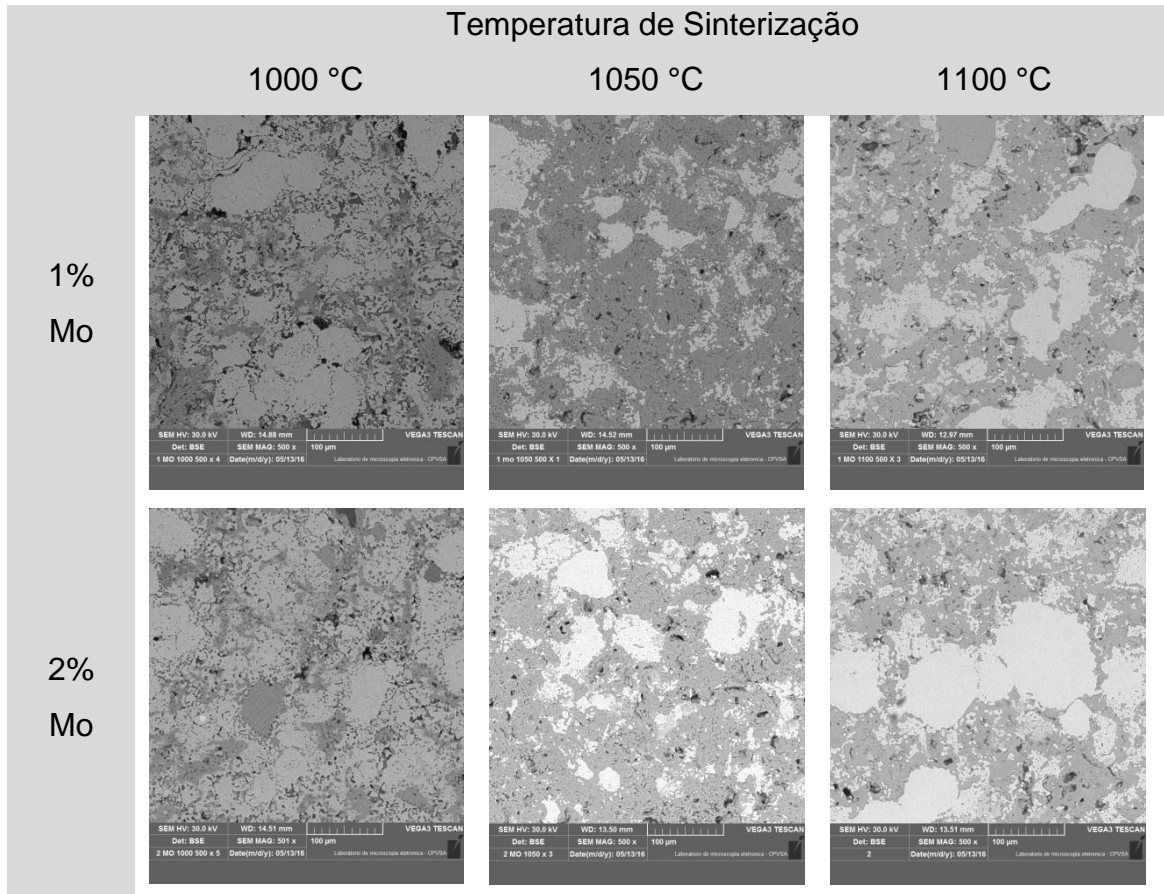


Fig. 2 - Imagens de MEV das amostras sinterizadas com 1 e 2% de Mo nas temperaturas de 1000°C, 1050°C e 1100°C.

Como esperado, as amostras se apresentaram como liga metálica, havendo assim interação metalúrgica. Apesar do aspecto poroso, característico de um produto oriundo da técnica de Metalurgia do Pó, pode-se notar uma superfície coesa e densificada, fruto da difusão interatômica. Yamanoglu et al (2012)[4] estudaram o efeito da adição de níquel à ligas Fe-Mo e observaram que a adição de níquel afetou a densificação dos corpos sinterizados, resultando em corpos mais densos. No que se refere a temperatura de sinterização, a partir da Fig. 2 notou-se maior coalescimento ao aumentar a temperatura de sinterização nas duas ligas. Tal comportamento pode ser

descrito por uma maior energia fornecida ao se elevar a temperatura o que favorece a difusão atômica resultando em amostras mais densificadas.

Nota-se nas duas composições (1 e 2% de Mo) a presença de duas fases distintas. A heterogeneidade na distribuição de fases presentes dificulta a homogeneidade de propriedades ao longo do corpo de prova já que assume-se que essas fases possuem características metalúrgicas e mecânicas distintas. De acordo com o diagrama de fases apresentado no ASM Handbook (1990) para uma liga Fe-Ni, as fases presentes em uma liga de composição Fe-30%Ni, a temperatura ambiente, são a ferrita e o composto intermetálico FeNi₃.

Na Fig. 3 são apresentados os resultados de microdureza medidas na fase clara e escura. Pode-se observar que todas as amostras exibiram comportamento semelhante, onde a fase escura mostrou-se mais dura que a fase clara. A fase clara apresentou valores abaixo de 200 HV (Fig 3a), já a fase escura apresentou valores acima de 300 HV (Fig. 3b), com tendência de aumento a medida que se elevou a temperatura de sinterização. Lobo (2014) estudou ligas Fe-Ni e Fe-Ni-Mo obtidas por MP e encontrou microdurezas compatíveis com os valores das ligas caracterizadas neste estudo. Valores elevados de microdureza observados na fase escura podem estar associados a precipitação da fase intermetálica endurecedora (FeNi₃). Azadehranjbar *et al.* (2013)[7] produziram ligas FeNi₃ por moagem mecânica com diferentes tempos de moagem e sinterização à 1040 °C por 1 hora em vácuo e obtiveram valores de microdureza de 350 para 2 horas de moagem e 720 após 20 horas de moagem. De acordo com aqueles autores a formação de solução sólida (Fe, Ni) com o aumento do tempo de moagem é um dos fatores que contribui para o aumento na microdureza da fase FeNi₃ [8]. Essa diferença de valores foi encontrada na presente pesquisa para a fase escura nas diferentes temperaturas de sinterização.

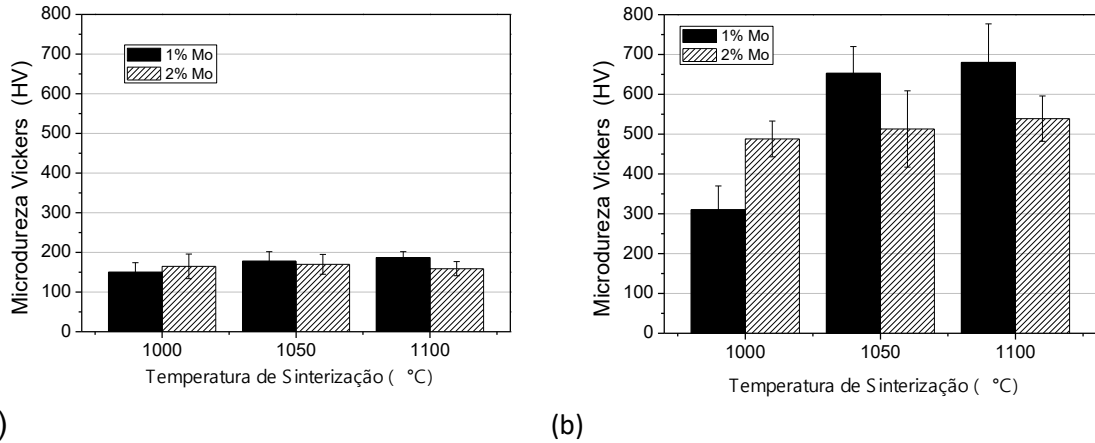


Fig. 3 – Medidas de microdureza Vickers das duas fases encontradas nas micrografias das amostras com 1 e 2% de Mo (a) fase clara (b) fase escura.

Pode-se observar que a temperatura de sinterização influenciou o resultado final da microdureza, onde o aumento da temperatura de sinterização resultou em aumento de microdureza nas duas fases, para as amostras com 1% de molibdênio. As amostras com 2% de molibdênio mostraram variação sutil na microdureza com a variação na temperatura de sinterização.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa objetivou avaliar o efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas de ligas Fe-Ni-Mo obtidas por metalurgia do pó. Os resultados permitiram concluir que:

1. O aumento da temperatura de sinterização resultou em aumento na dureza das fases nas amostras com 1% de molibdênio, observado pelo resultado de microdureza.
2. O produto final apresentou coesão entre as partículas e solidez o que é resultado de uma sinterização consolidada, confirmada pelas imagens de MEV. Além disso, observou-se maior coalescimento ao se aumentar a temperatura de sinterização.
3. Duas fases distintas se formaram nas ligas estudadas que provavelmente referem-se as fases ferrita e FeNi₃ conforme sugerido pelo diagrama de equilíbrio de fases da liga Fe-Ni;

4. A microdureza apontou a provável precipitação de fase intermetálica endurecedora (FeNi_3) na matriz de ferrita como resultado do processo de sinterização e resfriamento lento das amostras no forno.

REFERÊNCIAS

- [1] ESPINOZA, F. R. M. *et al.* Obtenção de peças sinterizadas de titânio aplicadas na área médica. ***Estudos Tecnológicos - Vol. 6, n° 2: 104-111 (mai/ago 2010)***
- [2] DELFORGE, D. Y. M. *et al.* Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais? ***REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): 95-100, jan. mar. 2007***
- [3] YILMAZ, R.; EKICI, M.R. Microstructural and hardness characterisation of sintered low alloyed steel. ***Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Volume 31 Issue 1 November 2008***
- [4] YAMANOGLU, R.; KARAKULAK, E.; ZEREN, M. Mechanical and wear properties of pre-alloyed Molybdenum P/M steels with nickel addition. ***J. Min. Metall. Sect. B-Metall. 48 (2) B (2012) 251 – 258***
- [5] ASM Handbook Vol 3 – **Binary Alloy Phase Diagrams**, ASM International, 1990.
- [6] LOBO, C. J. S. **Estudo das propriedades mecânicas de ligas Fe-Ni e FeNi-Mo processadas por metalurgia do pó**. 2014. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- [7] AZADEHRANJBAR, S.; KARIMZADEH, F. and ENAYATI, M. H. Properties of bulk Fe–Ni/CNT nanocomposites prepared by mechanical milling and sintering. ***International Journal of Modern Physics B***. Vol. 27, No. 20 (2013).
- [8] AZADEHRANJBAR, S.; KARIMZADEH, F. and ENAYATI, M. H. Synthesis and characterization of nanocrystalline FeNi and Ni_3Fe alloys. ***International Journal of Modern Physics B*** Vol. 25, No. 7 (2011) 1013–1019.

EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE IN ALLOYS Fe-Ni-30 2 Mo and Fe-30Ni-1Mo OBTAINED BY POWDER METALLURGY

The Powder Metallurgy is a manufacturing process that allows to obtain parts Sintered originating from metallic powders or not. The method includes the steps of obtaining a powder mixture, compacting and sintering. The sintering step is one of the most important and is to provide conditions for diffusion to occur in the compressed powder. This study evaluated the effect of sintering temperature variation of Fe-30Ni-2Mo alloys and Fe-30Ni-1Mo in the process of Powder Metallurgy. The samples were sintered at 1000 ° C, 1050 ° C and 1100 ° C and subjected to microhardness analysis and scanning electron microscopy (SEM). From the results it was observed the presence of two phases, one with average microhardness 168,17HV and the other with 530,5HV. By SEM it was observed a higher coalescence of the particles with increasing temperature, leading to a higher density.

Keywords: Powder Metallurgy, Sintering, Fe-Ni-Mo, Sintering Temperature.