

INFLUÊNCIA DO MOLIBDÊNIO NA DUREZA DE LIGAS Fe-30%Ni*

Mariana Hellen de Freitas Fonseca¹
Cândido Jorge de Sousa Lobo²
Marcelo José Gomes da Silva³

Resumo

Os produtos feitos de ferro puro contendo Ni expandiram enormemente as aplicações de produtos sinterizados, incluindo a fabricação de peças que suportam altas cargas em automóveis tais como transmissões. Deste modo, este trabalho pretende contribuir com um estudo direcionado à identificação de fases em ligas Fe-Ni-Mo sinterizadas a temperatura de 1.100°C e processadas por moagem de alta energia (MAE), buscando relacionar a variação do percentual do molibdênio (0%, 1% e 2%) e a respectiva dureza da liga sinterizada. O estudo demonstrará as fases presentes pela técnica de difração por raios X (DRX) e o perfil de dureza obtidos após a sinterização. Os resultados mostraram a presença de uma fase estável α (CCC ferrita) e uma fase meta-estável γ (CFC Austenita) com formação de solução sólida de molibdênio na ferrita. O perfil de dureza mostrou que existe uma relação linear entre o % de Mo e a dureza das ligas para os valores utilizados neste estudo.

Palavras-chave: Ferro-Níquel-Molibdênio; Metalurgia do pó; Moagem de alta energia; Propriedades mecânicas.

INFLUENCE OF MOLYBDENUM IN HARDNESS ALLOYS Fe-30%Ni

Abstract

Products made of pure iron containing Ni greatly expanded the applications of sintered products, including production of parts that support high loads such as in automotive transmissions. Thus, this work purpose to contribute with a study directed to the identification of phases in Fe-Ni-Mo alloys sintered at temperature of 1,100°C and processed by high energy milling (MAE), seeking to relate the variation the molybdenum percentage (0%, 1% e 2%) and the respective hardness of the sintered alloy. The study will demonstrate the phases presents across the diffraction X-ray technique (DRX) and the hardness profile obtained after sintering. The results showed the presence of stable phase α (CCC ferrite) and the metastable phase γ (CFC Austenite) with solid solution formation of molybdenum in the ferrite. The hardness profile showed that there is a linear relationship between the % Mo and the hardness alloys for the values used in this study.

Keywords: Iron-Nickel-Molybdenum; Powder metallurgy; High energy milling; Mechanical properties.

¹ *Graduanda em Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais, Professor adjunto, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais, Professor adjunto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O estudo da Metalurgia do Pó apresenta grande dificuldade de relacionar a combinação de propriedades a serem desenvolvidas que atendam aspectos como altas resistências mecânicas, com características dos componentes utilizados para a formação da liga.

Adições de elementos de liga em aços sinterizados têm sido alvos de intensas pesquisas [1,2]. Para a Metalurgia do Pó, o principal requisito é que a liga apresente um bom desempenho no que diz respeito à aglomeração das partículas e uma distribuição homogênea na peça sinterizada [3].

A ação de moer por alta energia começa inicialmente em agrupar nas proporções desejadas os pós, em seguida a mistura é introduzida no recipiente do moinho, são adicionadas as esferas de moagem nas proporções devidas (massa pó, massa bola). Logo após a realização das ações relacionadas anteriormente acopla-se o recipiente fechado ao moinho e dá-se início ao processo de moagem. Levando em considerações todos os parâmetros previamente definidos [4].

Segundo Straffelini e colaboradores (1999) [5], a adição do molibdênio promove um aumento de diversas propriedades mecânicas e da temperabilidade. Normalmente, o Mo é adicionado como pó pré-ligado na forma de Fe-Mo. A presença de elementos de liga nos pós pré-ligados reduz a compressibilidade.

Este trabalho pretende contribuir com uma obtenção de uma liga Fe-30%Ni, com adição de Molibdênio (0%, 1% e 2%), utilizado como material estrutural, de forma a avaliar: as transformações de fases e microestrutura encontradas na mesma e a influência do %Mo na propriedade mecânica de dureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados pós de Ferro (granulometria de 40 μ m), Níquel (granulometria de 55 μ m) e Molibdênio (granulometria de 55 μ m), fornecidos pela indústria IMASH (SP). A moagem de alta energia foi realizada em um moinho tipo planetário de alta energia da marca Fritsch modelo pulverisette 6. Para a moagem foi utilizada uma jarra de aço inoxidável 316L com esferas de 10 mm de diâmetro na proporção de 1g do material para 10g de esferas (1/10) [6,7].

Para a difração de Raios-X foi utilizado um tubo de cobalto com comprimento de onda $\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$. A metodologia utilizada segue as seguintes etapas:

- Etapa 1: Caracterização morfológica (Microscopia Eletrônica de Varredura) dos pós de Fe-Ni-Mo;
- Etapa 2: Moagem de alta energia da liga Fe30%Ni, tempo de moagem de 2h, velocidade de rotação 200 rpm inserindo percentual de molibdênio em 0% Mo (A1); 0,5%Mo (H1); 1%Mo (H2); 2%Mo (H3);
- Etapa 3: Compactação dos pós (2 corpo de prova cilíndricos por liga de 17mm de diâmetro);
- Etapa 4: Sinterização à 1100°C com taxa de aquecimento de 5°C/min e permanência de 1h à temperatura de sinterização sem atmosfera controlada;
- Etapa 5: Difratograma das ligas A1, H1, H2 e H3;
- Etapa 6: Determinação da dureza (cinco medidas aleatórias em cada corpo de prova das ligas A1, H1, H2 e H3);
- Etapa 7: Teste estatístico ANOVA por software SPSS ANOVA one-way, com Post Hoc de Tukey para análise da influência da % de molibdênio sobre a dureza.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a micrografia do pó de Fe puro obtida no MEV. É possível observar que as partículas apresentam formas distintas que vão desde formatos circulares definidos a irregulares. O formato irregular da maioria de algumas partículas é favorável à sinterização, pois aumenta a sua área superficial específica.

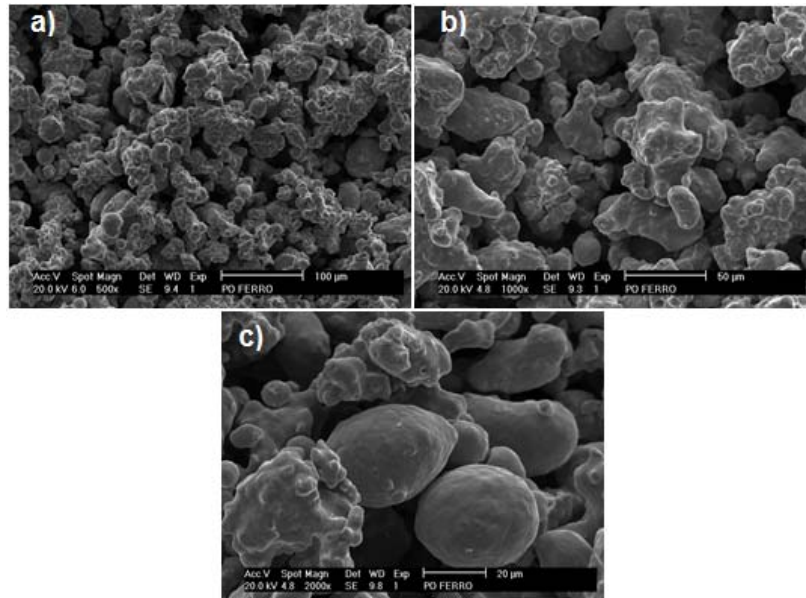


Figura 1 - Micrografias das partículas de pó de Fe puro obtidas pelo MEV. a) 500X, b) 1000X e c) 2000X.

A Figura 2 apresenta as micrografias das partículas de Ni puro obtidas pelo MEV. Observa-se que as partículas apresentam um formato do tipo irregular a dendrítico, em alguns locais, bastante indefinido, com a aparência de um aglomerado de partículas menores sobre uma partícula maior. Com relação ao tamanho, é possível notar que as partículas possuem um tamanho bem menor que as partículas de Fe.

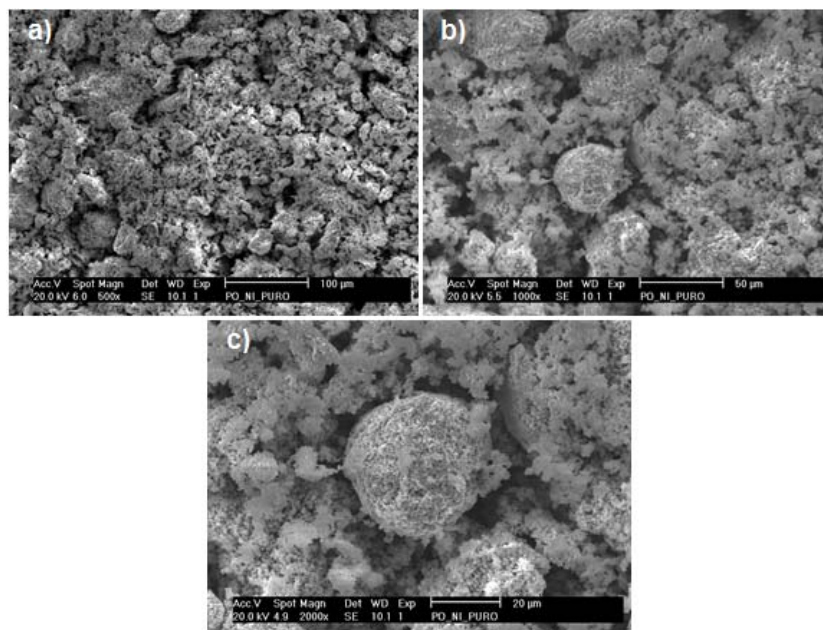


Figura 2 - Micrografias das partículas de pó de Ni puro obtidas pelo MEV. a) 500X, b) 1000X e c) 2000X.

As partículas de Molibdênio possuem o formato mais irregular dentre as matérias primas utilizadas neste trabalho. A maioria de suas partículas é granular e possui tamanho máximo de 40 μm , conforme ilustrado na Figura 3.

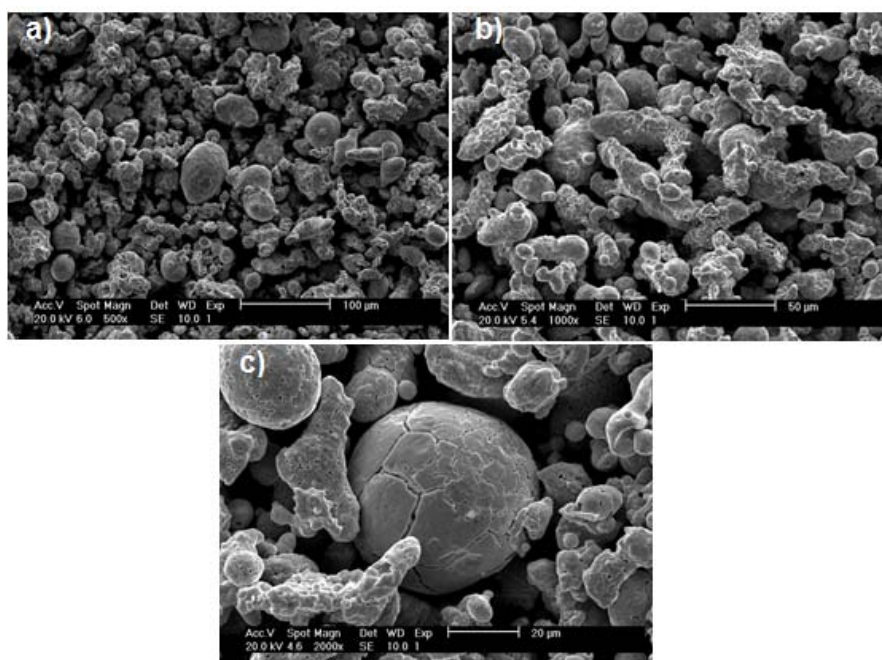


Figura 3 - Micrografias das partículas de pó de Mo puro obtidas pelo MEV. a) 500X, b) 1000X e c) 2000X.

A Figura 4 mostra o difratograma para as ligas H1, H2 e H3 em relação a liga primária A1. O resultado sobreposto colabora para o entendimento das microestruturas resultantes apresentadas pelas ligas.

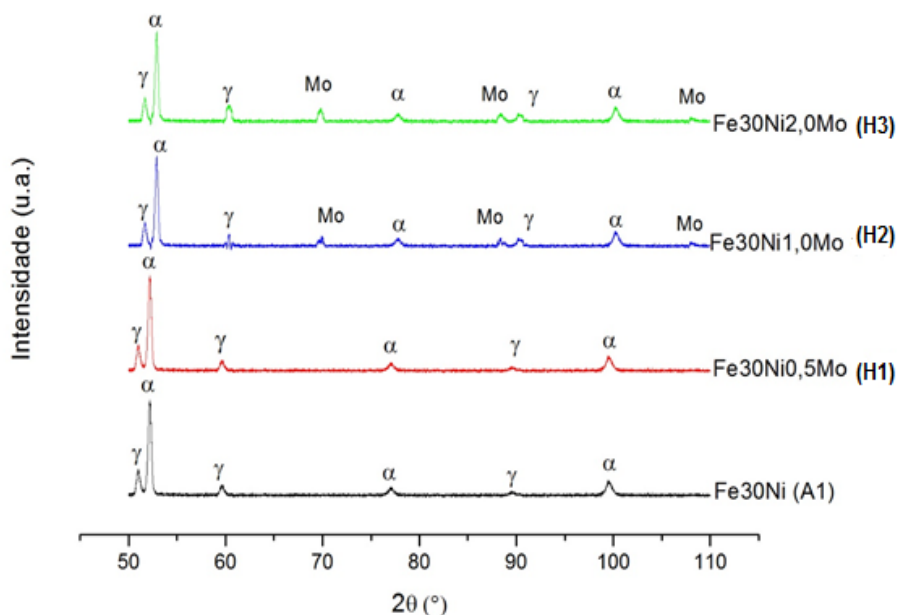


Figura 4 - Difratograma de Raios-x para as ligas A1, H1, H2 e H3.

A liga H1 não apresentou mudança perceptível nas suas fases em relação à liga primária A1, devido ao pequeno percentual de Molibdênio inserido na liga aliado a

heterogeneidade dos produtos inerentes ao processo de metalurgia do pó, uma vez que a área analisada pode não contemplar o aparecimento deste elemento.

Para as Ligas H2 e H3, surgem gradativamente picos correspondentes ao Molibdênio (CCC), em substituição ao Fe₂Mo (HC) (fase laves), como estudado por Andrade [8], apresentando características de dureza e fragilidade muito elevadas.

Este fato sugere que há formação de uma solução sólida do Molibdênio no Ferro como fase metaestável. O difratograma mostra também o aparecimento de picos relativos às fases Ferrita α e Austenita [9].

A dureza das ligas A1, H1, H2 e H3 são apresentadas na Figura 5. Também é apresentada a variação das medidas realizadas em cada liga relacionando o efeito do % de Molibdênio (H1, H2 e H3) e a liga com 0% Mo (A1).

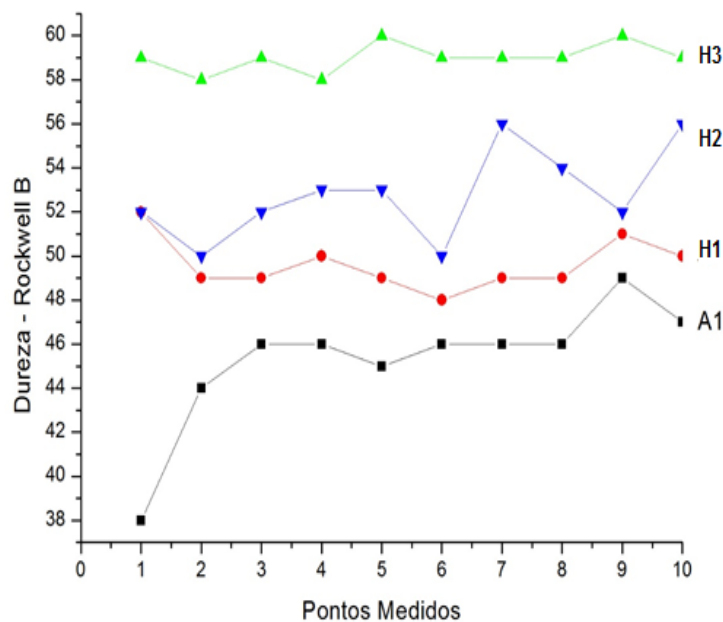


Figura 5 - Perfil de dureza das ligas A1 H1, H2 e H3.

Verifica-se que a liga H3 possui dureza mais elevada que as ligas A1, H1 e H2, mostrando que possivelmente exista uma relação direta entre dureza e o percentual de Molibdênio. A Tabela 1 mostra os valores de dureza média e desvio padrão das medidas realizadas nas amostras que apresentam a liga H3 como de maior dureza média para este parâmetro (59,00 HRB).

Tabela 1 - Dureza média das ligas A1, H1, H2 e H3.

Amostra	Dureza Média (HRB)	Desvio Padrão
A1	45,30	2,86
H1	49,60	1,67
H2	52,80	1,17
H3	59,00	0,67

Buscando identificar a influência do % de molibdênio na dureza, recorreu-se a ANOVA one-way, com Post Hoc de Tukey. O nível de significância para todos os teste foi fixado em $\alpha \leq 0,05$, sendo analisados pelo programa estatístico SPSS versão 21.0. Os resultados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do Teste Anova para as propriedades de Dureza, M.E. e LRT das variáveis.

Variável	Propriedade	Teste Anova		Conclusão
		F	Sig	
Elemento de liga	Dureza	111,110	0,000	Influencia
	Coef. Dureza	0,017	0,983	Não influencia

Destaca-se nos resultados a comprovação da influência do % Mo na dureza das ligas. No entanto, o teste realizado com o coeficiente angular (variação de dureza/ variação de %Mo) mostra que as médias do coeficiente angular não variaram, indicando que os percentuais de molibdênio utilizados possuem relação linear e crescente com a dureza.

A Figura 6 apresenta o gráfico das médias de dureza contra o percentual de molibdênio e sua respectiva lei de formação (equação) para o intervalo medido.

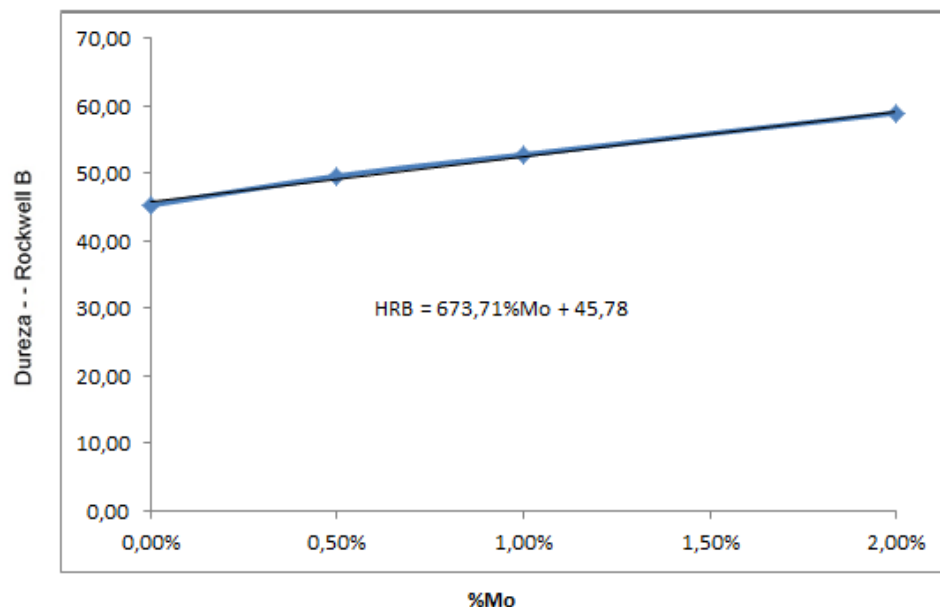


Figura 6 - Gráfico da média das durezas para a variável elemento de liga – Curva de tendência e lei de formação.

Através da lei de formação (equação) é possível extrair que o comportamento da dureza é linear crescente (coeficiente angular positivo) para esse intervalo de percentual de Molibdênio.

4 CONCLUSÃO

O Molibdênio inserido nas quantidades especificadas formou uma solução sólida substitucional na estrutura da ferrita, causando endurecimento da fase e conseqüentemente, aumento da dureza da liga resultante.

A variável elemento de liga para o processamento à alta energia (ligas H1, H2 e H3) apresentou influência confirmada estatisticamente na propriedade de dureza, com comportamento previsível através da curva de tendência. Entre as ligas estudadas com inclusão de molibdênio (0 - 2% Mo) é possível afirmar que há uma relação linear crescente entre essa variável e sua propriedade de dureza.

Agradecimentos

Ufersa
UFC

REFERÊNCIAS

- 1 Kawata H, Fujitsuka H. Development of Co- and Pb-free Exhaust Valve Seat Insert Material. Hitachi Powdered Metals Technical Report. 2003. p. 18-24.
- 2 Tsutsui T. Technical Trends in the development of structural Materials and Outlook for the Future. 2008. [capturado 22 fev. 2012]. Disponível em: www.hitachi-pm.co.jp/tec/tec2008_e_03.pdf
- 3 Shaeffer L, Savi JR, Rodrigues WC, Martins V, Limberger RP. Efeito da adição de Nb, Mo, Cr e Ti na microestrutura do WC-6Co. 2010; 6(3): 162-172.
- 4 Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling, Progress in Materials Science. 2001. p. 1-184.
- 5 Straffelini G, Molinari A, Danninger H. Impact notch toughness of high-strength porous steels, Mat. Sci. and Eng. A. 1999. p. 300-309.
- 6 Pinto GB. Análise do Efeito do tempo de moagem de alta energia no tamanho de cristalito e microdeformação da rede cristalina do WC-Co. [Dissertação]. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2008.
- 7 Manuel JB. Efeito da Moagem de Alta energia na microestrutura e nas propriedades magnéticas do compósito WC-10%p.Co. [Tese]. Natal: Universidade Federal do Rio grande do Norte; 2008.
- 8 Andrade TF. Precipitação de fase Laves no Aço Inoxidável Superferrítico 28%Cr-4%Ni-2%Mo-Nb. [Dissertação]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2006.
- 9 Calado WR. Envelhecimento dinâmico em um aço resistente ao fogo com substituição parcial do Cu e Cr por P e Si. [Dissertação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2008.