

DESENVOLVIMENTO DE AÇOS SINTERIZADOS FE-NI-MO-P

Alexandre Musskopf

Graduando Eng Industrial Mecânica – ICET – Feevale

alexmuskopf@feevale.br

Arão de Matos Dias

Prof. Eng. Industrial Mecânica – ICET – Feevale

arao@feevale.br

Moisés de Mattos Dias

Prof. Eng. Eletrônica - ICET – Feevale

moisesdias@feevale.br

Resumo

Adições de elementos de liga em aços sinterizados tem sido alvo de intensas pesquisas em diversos países. Em geral, os desenvolvimentos envolvem estudos de aprofundamento da técnica de sinterização, com o objetivo de alcançar conhecimento sobre o comportamento das diversas ligas e de suas aplicações em inúmeras áreas da engenharia.

Este estudo aborda o processo convencional para a obtenção de aços sinterizados com adições de níquel, molibdênio e fósforo, com o objetivo de melhorar as propriedades das ligas para uso em peças estruturais. Foram analisadas as propriedades de densidade verde e sinterizada, dureza, tensão de escoamento e microestrutura das amostras. Os resultados são compatíveis com os obtidos em estudos similares.

Palavras-chave: Metalurgia do pó; aços baixa-liga; ligas Fe-Ni-P.

Abstract

Additions of alloy elements in sintered steels have been the purpose of researches in several countries. In general, the developments involve intensive studies of the sintering technique, with the goal to obtain knowledge about several alloys and their applications in several engineering areas.

This study broaches the conventional powder metallurgy process for obtaining sintered steels with additions of nickel, molybdenum and phosphorous, with the aim to enhance the properties of alloys for use in structural parts. The properties of the samples analyzed were: Green and sintered density, hardness, yield strength and microstructure. The results are comparable with those obtained in similar studies.

Key words: Powder metallurgy; low-alloy sintered steels; Fe-Ni-P alloys.

Introdução

O mercado de peças estruturais sinterizadas continuará a expandir paralelamente ao aumento das propriedades mecânicas, ao melhoramento na tecnologia de acabamento e ao desenvolvimento de materiais e tecnologias de manufatura em harmonia com o ambiente [1].

Em relação às tecnologias de fabricação, vários métodos, como o de aumento de densidade do produto final, têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas. Compactação em prensas CNC, por exemplo, produzem produtos com formas complexas com boa precisão dimensional [1].

Aços sinterizados a base de cobre e níquel são os mais utilizados para a fabricação de peças estruturais. O níquel, por possuir uma alta taxa de difusão no ferro, pode ser adicionado na mistura para posterior formação da liga durante o processo de sinterização. O molibdênio e o fósforo aumentam a dureza e a resistência mecânica. O molibdênio, por ser um formador de carbonetos, aumenta a resistência ao desgaste abrasivo. O fósforo, ainda, promove uma fase líquida durante a sinterização, favorecendo o processo de difusão.

A sinterização de ligas utilizando materiais pré-ligados, por exemplo, Fe-Cr, Fe-Ni-Cu, Fe-Cr-C, Fe-Mo-Si, adicionados ao pó de ferro para formação de liga, têm sido estudados por H. Kawata e H. Fujitsuka [2] para uso em inserto de assento de válvula de exaustão.

Pós pré-ligados Fe-4Ni-0,5Mo, com adições suplementares de níquel e cobre, foram pesquisados por T. Tsutsui e K. Ishil [3] para utilização em peças com elevada resistência mecânica, como engrenagens.

Neste estudo, utilizou-se níquel na forma elementar, e molibdênio e fósforo na forma de pré-ligados. O objetivo é desenvolver ligas de alta resistência usando matérias-primas produzidas no Brasil, com exceção do ferro-molibdênio.

O níquel é estabilizador da austenita, e no plano da metalurgia do pó, forma uma solução sólida com o ferro.

Materiais e Procedimentos Experimentais

As amostras de pó de níquel utilizadas nos ensaios foram fornecidas pela Citra do Brasil Comércio Internacional Ltda e pela Hoganas Brasil Ltda, ambas as amostras de níquel foram obtidas pelo processo Carbonila.

As composições químicas do pó de níquel são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do níquel conforme certificados dos fornecedores.

Fornecedor	Elementos, % em peso				
	C	S	Fe	O	Ni
Citra	0,0440	0,0001	0,0010	0,0520	Base
Hoganas	0,1200	0,0010	0,0300	0,1500	Base

A densidade aparente do pó de níquel, INCO T123PM, fornecido pela Citra, é de 2,51 g/cm³. A granulometria dos pós é apresentada na tabela 2 que segue.

Tabela 2 –Granulometria máxima e mínima em μm .

Fornecedor	Mínima	Máxima
Citra	5,8	11,0
Hoganas	3,0	7,0

O pó de ferro, AHC100.29, utilizado em todos os ensaios, foi fornecido pela empresa Höganäs do Brasil Ltda, e é caracterizado como pó de ferro puro obtido pelo processo de atomização a água. Sua densidade aparente está entre 2,90 e 3,05 g/cm³. A composição química é apresentada na tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do pó de ferro.

Elementos	Quantidade Máxima, % em peso
-----------	---------------------------------

C	0,024
S	0,030
O	0,170
Fe	Base

A granulometria dos demais pós utilizados nos ensaios é mostrada na tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica dos principais materiais utilizados.

Materiais	Peneira / Malha					
	+80	+100	+150	+200	+325	-325
Fe (AHC100.29)	2%	12%			10%	30%
Ni (INCO 123PM)			0,1%			

O grafite usado, UF4, foi fornecido pela Höganäs do Brasil, com granulometria conforme tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica do pó de grafite utilizado neste estudo.

Tamanho de partícula	>100 µm	< 2,6 µm	< 6,1 µm	< 11,5 µm	< 17,4 µm
Percentuais	0,005	10,0	50,0	90,0	99,99

Todos os pós utilizados foram misturados em lotes suficientes para a obtenção de quatro amostras de cada liga, nas proporções unitárias conforme apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 – composição química (percentual em peso) das amostras.

Amostra	Estearato Zn	Grafite	P	Ni	Mo	Fe
1	0,80	0,60	-	-	-	Base
2	0,80	0,60	0,50	-	-	Base
3	0,80	0,60	1,00	-	-	Base
4	0,80	0,60	0,50	2,00	-	Base
5	0,80	0,60	1,00	2,00	-	Base
6	0,80	0,60	0,50	2,00	0,50	Base

O fósforo e o molibdênio utilizados nas amostras foram obtidos de compostos pré-ligados. A tabela 7 apresenta as composições químicas desses compostos.

Tabela 7 – Composição química das ligas ferro-molibdênio e ferro fosforoso.

Compostos Pré-Ligados	Elementos Químicos		
	Ferro	Fósforo	Molibdênio
Fe ₃ P	82 %	18 %	-
FeMo	50 %	-	50 %

O grafite adicionado às amostras fornecerá o carbono necessário para a formação da liga e se torna necessário para compensar as perdas de carbono, tanto na reação com o óxido, como no processo de sinterização. O grafite também é responsável pela redução da temperatura de sinterização.

O lubrificante, estearato de zinco, utilizado para a compactação, cuja proporção foi descrita na tabela 5, não entra em combinação com os demais elementos ou ligas.

Um total de 24 corpos de prova foram utilizados num primeiro estágio de testes. Os corpos de prova eram compostos por 6 ligas (tabela 5) de diferentes composições, e foram

compactados em matriz de aço rápido, a uma pressão de 450MPa para densidades entre 6,70 e 7,00 g/cm³, utilizando uma prensa hidráulica universal de ensaios mecânicos marca Pantec, modelo Versat 10000, monitorada por computador. As dimensões dos compactados eram de 16mm de diâmetro por 15mm de altura, aproximadamente. Posteriormente, as amostras foram sinterizadas em forno elétrico de mufla, com atmosfera de N₂-H₂, a temperatura de 1120°C, por 50 minutos. A taxa de aquecimento foi de 5 K/min.

Após o processo de sinterização, foram feitas medições de densidade das amostras, utilizando-se o princípio de Arquimedes, em balança de precisão 0,0001g. As análises metalográficas foram realizadas em um microscópio ótico marca Union, monitorado por computador. As curvas de escoamento foram realizadas na mesma prensa de ensaios universal, e as durezas das referenciadas ligas, na condição somente sinterizada, foram obtidas em um durômetro marca Pantec, modelo RASN-B.

Resultados Experimentais e Discussão

Densidades da Amostras

As amostras tiveram suas densidades avaliadas nos estágios de puramente compactadas (Figs. 1 e 2) e sinterizadas (Figs. 3 e 4). De uma forma geral, praticamente não houve variação dimensional nos corpos de prova após a sinterização.

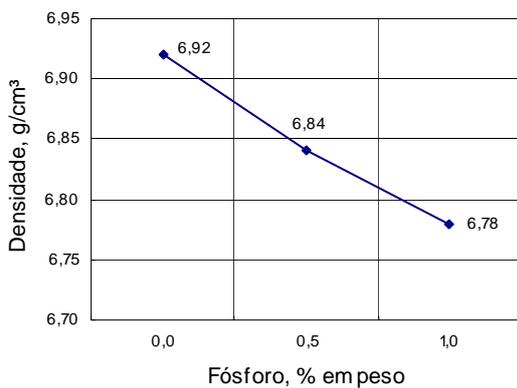


Figura 1 - Densidades da liga Fe-0,6C, com adições de fósforo, na condição compactada.

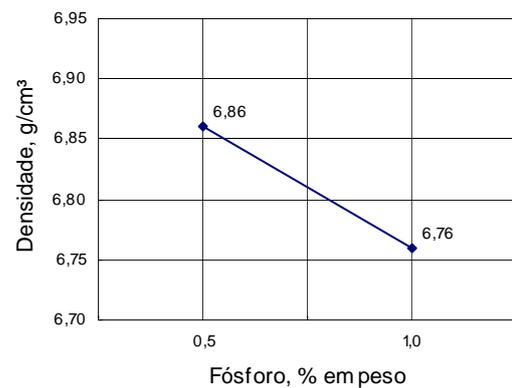


Figura 2 - Densidades da liga Fe-2Ni-0,6C, com adições de fósforo, na condição compactada.

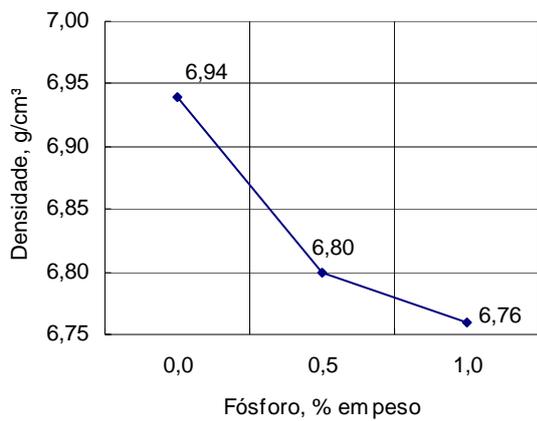


Figura 3 - Densidades da liga Fe-0,6C, com adições de fósforo, na condição sinterizada.

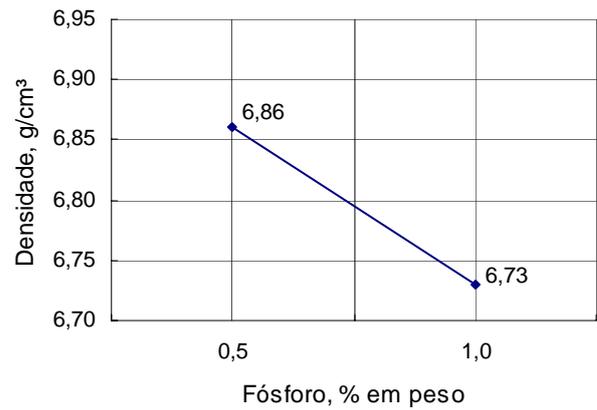


Figura 4 - Densidades da liga Fe-2Ni-0,6C, com adições de fósforo, na condição sinterizada.

Metalografia

A Figura 5 mostra o aspecto metalográfico da liga Fe-0,5P-0,6Grafite, com ataque nital 3%, e aumento 400x.

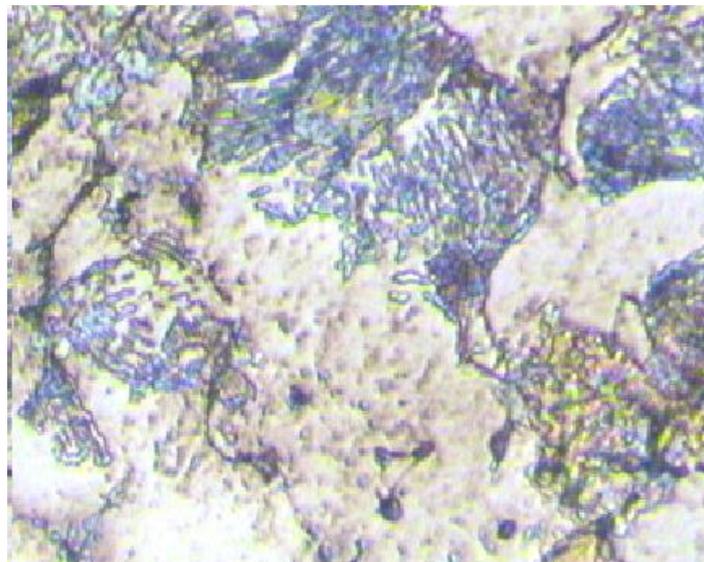


Figura 5 – Aspecto microestrutural da liga Fe-0,5P-0,6Grafite. Ataque nital 3%. 400x.

A Figura 5 apresenta a microestrutura da liga Fe-2,0Ni-1,0P-0,6Grafite.

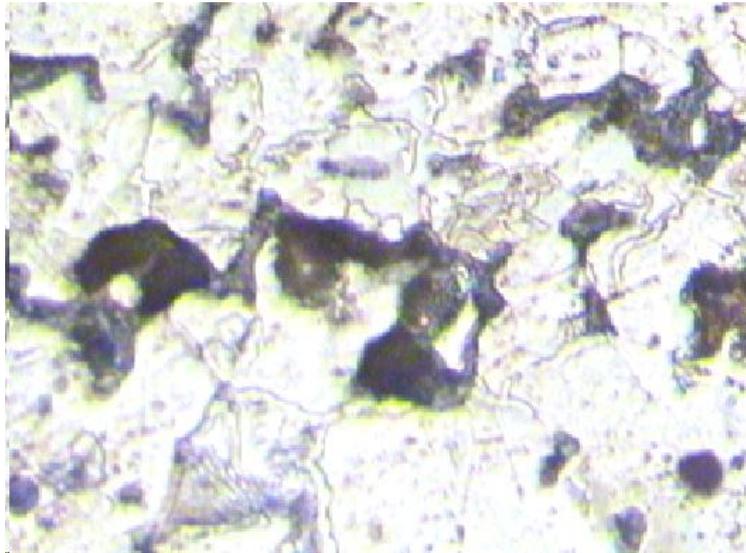


Figura 5 – Aspecto da microestrutura da liga Fe-2,0Ni-1,0P-0,6Grafite. Ataque nital 3%. Aumento 400x.

Tensão de Escoamento

A tabela 8 apresenta os resultados dos testes de compressão realizados com as amostras. O fósforo e o níquel provocaram um aumento da tensão de escoamento, o que era esperado. O molibdênio provocou um pequeno decréscimo no limite de escoamento, talvez pela formação de carbonetos em combinação com o fósforo, e estes carbonetos não estarem dissolvidos na matriz.

Liga	Tensão de Escoamento, MPa	Deformação, %
Fe - 0,6 Grafite	160	5,3
Fe - 0,5 P - 0,6 Grafite	245	6,8
Fe - 1,0 P - 0,6 Grafite	350	4,0
Fe - 2,0 Ni - 0,5 P - 0,6 Grafite	370	4,5
Fe - 2,0 Ni - 1,0 P - 0,6 Grafite	400	4,3
Fe - 2,0 Ni - 0,5 P - 0,5 Mo - 0,6 Grafite	325	3,0

Tabela 8 – Tensão de escoamento e deformação em altura.

A adição do níquel aumentou o limite de escoamento entre 20 e 50%, dependendo do teor de fósforo. Esta margem pode ser aumentada ainda mais se o níquel estivesse totalmente difundido em uma solução sólida [5]. O níquel propicia um aumento visível das propriedades elásticas através da retenção de austenita dúctil.

O fósforo, desde que não adicionado em percentuais acima de 1%, não confere ao aço sinterizado uma diminuição excessiva da resistência ao impacto como é visto nos processos convencionais (fundição, laminação). Em contrapartida, este elemento eleva a dureza e o limite de escoamento do aço quando forma com o ferro uma fase homogênea.

Durezas das Amostras

A tabela 9 apresenta os resultados dos testes de dureza feitos nas amostras sinterizadas.

Liga	Dureza, RB
Fe - 0,6 Grafite	42
Fe - 0,5 P - 0,6 Grafite	64
Fe - 1,0 P - 0,6 Grafite	74
Fe - 2,0 Ni - 0,5 P - 0,6 Grafite	67
Fe - 2,0 Ni - 1,0 P - 0,6 Grafite	71
Fe - 2,0 Ni - 0,5 P - 0,5 Mo - 0,6 Grafite	67

Tabela 9 – Dureza das amostras sinterizadas.

Uma análise mais criteriosa nos números da tabela acima, obtidos nos ensaios de dureza, confirma o aparecimento de um perfil de microestruturas mais duras nas amostras com contêm fósforo na sua composição. As amostras que contêm Ni não tiveram a dureza aumentada, o que poderia ser obtido após tratamento térmico.

Conclusões

Considerando os resultados, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- Uma vantagem do uso do níquel é o melhor controle dimensional das peças sinterizadas, o que não ocorre quando se utiliza o cobre.
- O fósforo, embora cause uma certa fragilização dos aços baixa-liga, aumenta a resistência mecânica e a dureza dos materiais para uso em peças estruturais. A tensão de escoamento, utilizada em projetos de peças mecânicas, é satisfatória.
- O níquel, embora não mostrado nesse trabalho, favorece o aumento da tenacidade, o que é importante quando se utiliza o fósforo.

Referências

1. ENDO, H. Technology Trends in Sintered Structural Parts. **Hitachi Powdered Metals Technical Report**, vol.1, 2002. p.3-8.
2. Kawata, H. & Fujitsuka, H. Development of Co- and Pb-free Exhaust Valve Seat Insert Material. **Hitachi Powdered Metals Technical Report**, vol.2, 2003. p.18-24.
3. Tsutsui, T. & Ishil, K. Research on Fe-Ni-Cu-Mo-C based High-strength Sintered Steel Produced Without Quenching Process. **Hitachi Powdered Metals Technical Report**, vol.2, 2003. p.12-17.
4. STEPHENSON, T. F., SINGH, T., CAMPBELL, S. T. Performance Benefits in Sintered Steels With Extra-Fine Nickel, Hoganas, publicação interna. 2004.
5. CAMPBELL, S. T., SINGH, T., STEPHENSON, T. F. Improved Hardenability of P/M Steels using Extra-Fine Nickel Powder, Hoganas, publicação interna. 2004.