

OBTENÇÃO DE LIGAS Fe-Cu VIA METALURGIA DO PÓ: MICROESTRUTURA, DUREZA E LIMITE DE ESCOAMENTO

P.D. Pacheco; L.J. de Oliveira; R. Quintanilha; R.S. Guimarães; M. Filgueira*

UENF, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, 28013-602, Campos dos Goytacazes, RJ

Recebido: 7 de setembro, 2007; Revisado: 19 de setembro, 2007

Palavras-chave: Sinterização, ferro-cobre, microestrutura, dureza, tensão de escoamento.

RESUMO

O cobalto (Co) é o metal mais utilizado no mundo como matriz ligante para diamantes em ferramentas de corte, entretanto este metal é caro, seu beneficiamento gera problemas ambientais e humanos. Neste tocante, nos últimos 5 anos, várias pesquisas vem sendo conduzidas no sentido de minimizar o teor de Co, via geração de ligas alternativas, sobretudo as de Fe-Cu-Co. Apresenta-se neste trabalho uma caracterização parcial de ligas Fe-Cu, como parte de uma tentativa exploratória de eliminar totalmente o Co. Assim, apresenta-se a microestrutura e as propriedades mecânicas dos sistemas Fe-(5-10-15-20-25-30-35-40)%pCu. Todas as ligas foram processadas por Metalurgia do Pó convencional: mistura dos pós, prensagem a 350 MPa e, sinterização a 1150°C durante 25 minutos, sob vácuo de 10^{-2} mbar. A possível formação de fases foi avaliada via difração de raios-x e, o aspecto microestrutural investigado por microscopia ótica. Também foram conduzidos ensaios de dureza Brinell e, foi medida a tensão de escoamento de todos os compósitos produzidos. Foi detectada a presença de solução sólida Fe-Cu em todas as amostras, o que é altamente benéfico no que tange à melhoria das propriedades mecânicas deste sistema. Amostras com adição de 20%pCu apresentaram os resultados mais interessantes para uso como matriz ligante de ferramentas diamantadas.

ABSTRACT

Cobalt (Co) is the most used metal matrix in diamond cutting tools. Nevertheless, this metal is expensive; its raw material processing generates environmental and human health problems. In this point of view, in the last 5 years several works have been done towards the reduction of Co content in the matrix composition, by studying new alloys, mainly Fe-Cu-Co ones. This paper presents the partial Fe-Cu alloys characterization, as a part of an exploratory attempt to eliminate Co from the metal matrix composition. In this sense, microstructural aspects and mechanical properties of the Fe-(5-10-15-20-25-30-35-40)%pCu alloys were evaluated. The alloys were processed via conventional powder metallurgy route: elemental powders blending, pressing at 350 MPa, and sintering at 1150°C during 25

minutes, under a vacuum of 10^{-2} mbar. Fe-Cu solid solution was observed by XRD patterns and microstructure by optical microscopy. It was also conducted Brinell hardness tests, and the yield strength was measured for samples in all compositions. It was detected the presence of solid solution for all samples, what is beneficial for the mechanical properties improvement. Samples with 20%wt Cu addition showed best results for posterior use as matrix in diamond tools.

1. INTRODUÇÃO

As ferramentas diamantadas conhecidas como impregnadas, são produzidas por Metalurgia do Pó, uma técnica de processamento que oferece a facilidade da mistura de diferentes pós e, conseqüentemente a possibilidade de criar novos materiais compósitos com propriedades físicas e mecânicas especiais [1].

A seleção dos metais ligantes para tais ferramentas diamantadas, é fortemente dependente da abrasividade e dureza do material a ser cortado. Normalmente usa-se tungstênio (W) para materiais de dureza extremamente elevada, tal qual o concreto. O cobalto (Co), ligas de W-Co para materiais de alta dureza como os granitos. Cobalto, cobalto-bronze, ferro-cobalto e ferro-bronze são ligantes empregados no corte de materiais de dureza mais moderada, como os mármore [2].

Atualmente, a maior parte das ferramentas de corte diamantada utiliza como matriz ligante o cobalto, pois combina perfeita compatibilidade química com o diamante nas temperaturas de processamento, uma adequada retenção do diamante e excelente resistência ao desgaste após processamento ou operação de corte [3,4].

A sinterização por fase líquida (SFL) é largamente utilizada para ligas Fe-Cu [5]. As características de solubilidade do sistema Fe-Cu, podem resultar em expansão volumétrica, comumente chamado "inchaço". A fase líquida formada pela fusão do cobre [6], é responsável por esse indesejável inchaço que ocorre nos minutos iniciais de sinterização [5,7,8].

Normalmente não se atinge elevadas densificações na sinterização de ligas Fe-Cu. O cobre líquido se espalha pelos

* marcello@uenf.br

contornos das partículas de Fe. Após o inchaço, ocorre uma compensação de contração da sinterização sólida final do Fe, após a aniquilação da fase líquida pela saturação com grãos e partículas de Fe em solução, o que acarreta um considerável ganho em resistência mecânica, também devido à presença de solução sólida de Fe-Cu [9].

O endurecimento por formação de solução sólida de cobre em ferro promove o aumento de algumas propriedades mecânicas de interesse. Dentre elas pode-se destacar a resistência à tração e a dureza, as quais podem ser acrescidas de até 40%, em comparação ao cobre e ferro puros [10].

Este trabalho exploratório investiga as propriedades mecânicas e o aspecto microestrutural do sistema Fe-Cu, uma liga alternativa para uso em ferramentas diamantadas impregnadas.

2. METODOLOGIA

Foram preparadas as misturas de pós nas composições Fe-(5-10-15-20-25-30-35-40)%pCu, mediante uso de um misturador cônico industrial – Pyramid – durante 20 min. A etapa de compactação foi realizada sob uma pressão de 350 MPa [11], em matriz uniaxial de aço de diâmetro 8 mm, produzindo corpos verdes de altura 8mm.

As sinterizações foram realizadas a 1150°C/25 min. sob vácuo de 10^{-2} mmHg, em forno tubular com 9 eletrodos de SiC – bp Engenharia. Microestruturas foram observadas via microscopia ótica – Zeiss Jenavert. Formação de fases foi observada por DRX – Seifert URD 65. Dureza Brinell foi medida para cada composição – Pantec RBS, carga de 63 kgf. Foram também realizados ensaios de compressão – máquina universal de ensaios Instron, a fim de se obter a tensão de escoamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Microestrutural

As figs. de 1 a 4 mostram o aspecto microestrutural das amostras de Fe-Cu em quatro diferentes estequiometrias apresentadas. Pode-se claramente observar o contraste entre as partículas de Fe e Cu, com este último sendo regiões “vermelhas” na matriz de Fe.

Nas figs. 1 e 2, pode-se observar a presença de poros grandes (preto), o que pode ser explicado devido ao provável inchaço sofrido pelo sinterizado, o que é um comportamento clássico para este sistema quando da sinterização por fase líquida. Em concordância com Kaisser [6], à temperatura de 1150°C o cobre encontra-se líquido, e seus átomos são totalmente dissolvidos no ferro, gerando porosidade residual onde encontravam-se as partículas sólidas originais de cobre.

Nas figs. 3 e 4, nota-se a diminuição da quantidade de poros com o aumento do teor de cobre no composto. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que com o aumento do teor de Cu, aumenta-se a quantidade de fase líquida, o que promove uma maior densificação, ou seja, os átomos da

fase líquida são pouco dissolvidos no sólido, fazendo com que a fase líquida ocupe os poros remanescentes. Essa porosidade remanescente pode ser, também, atribuída novamente ao provável inchaço do sinterizado.

É novamente importante ressaltar, que o Cu funde a 1084°C e forma uma fase líquida nos primeiros minutos de sinterização e, após esta etapa, onde havia Cu sólido se torna região de porosidade, como consequência da penetração do Cu líquido nos contornos de grão do Fe, originando o inchaço.

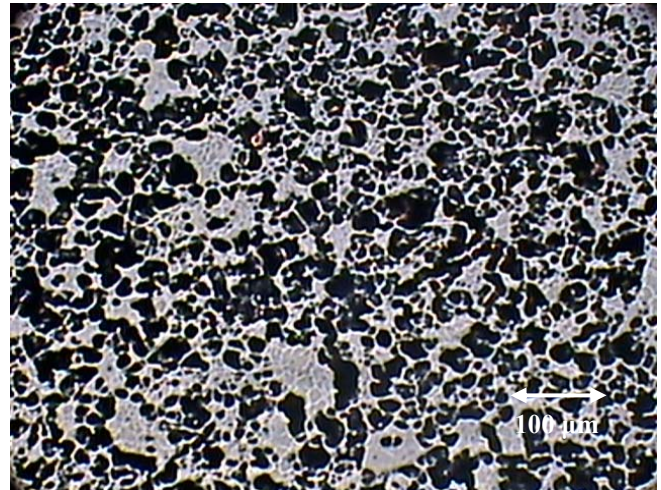


Figura 1 – Micrografia do sistema Fe-5%pCu.

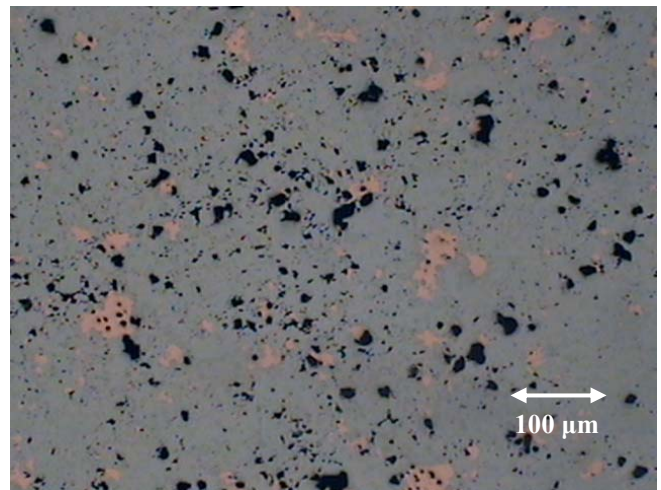


Figura 2 – Micrografia do sistema Fe-10%pCu.

O inchaço é um comportamento normal durante sinterização por fase líquida para o Fe-Cu, no qual a solubilidade do aditivo (Cu) no metal base (Fe) é bem maior que a do recíproco, conforme já explanado. Esse comportamento está em perfeita concordância com a ref.[12], para essa temperatura de sinterização. Neste tocante, pode-se dizer que, teores residuais de porosidade pós-sinterização favorecem a remoção de calor de ferramentas diamantadas impregnadas, via refrigeração em meio líquido – normalmente água [13].

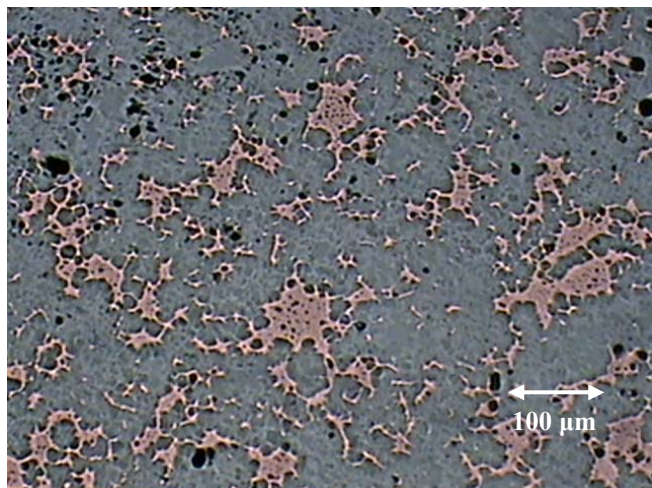


Figura 3 – Micrografia do sistema Fe-25%pCu.

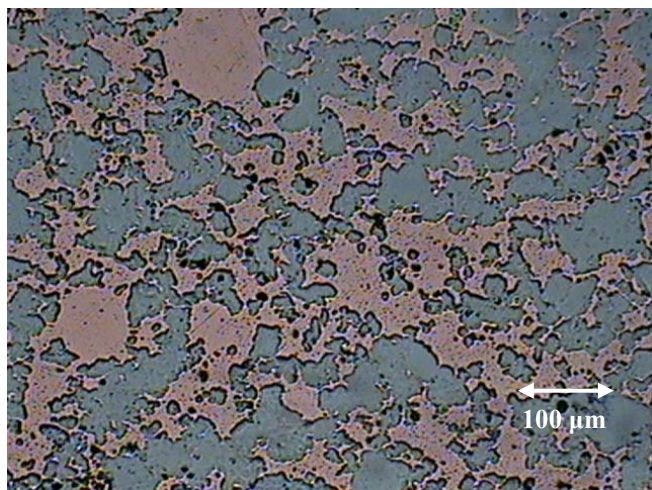


Figura 4 – Micrografia do sistema Fe-35%pCu.

3.2 Análise Estrutural

Os resultados da difração de raios-x podem ser vistos nas figs. 5 a 8. Foram observadas duas reflexões principais, a primeira ($50,448^\circ$) - referente ao Cu, enquanto a segunda ($52,551^\circ$) - indicando a formação de solução sólida do sistema Fe-Cu, fato positivo para as propriedades mecânicas do sistema.

3.3 Dureza Brinell

Na fig. 9 é mostrado os valores de dureza Brinell em função dos teores de cobre. Observa-se que não há sensível diferença nos valores obtidos, principalmente quando os desvios-padrão, ou seja, a dureza se encontra no mesmo patamar para todas as amostras, em qualquer composição.

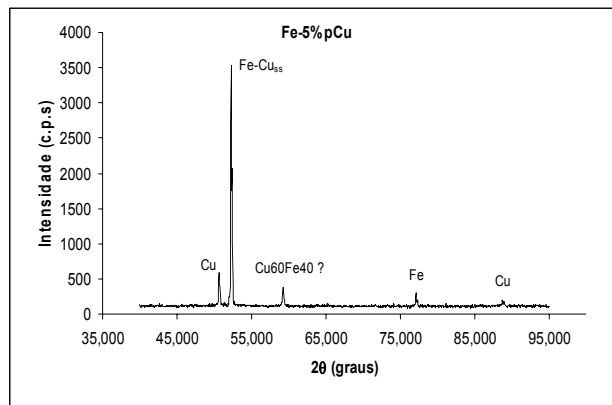


Figura 5 – Difratograma do sistema Fe-5%pCu.

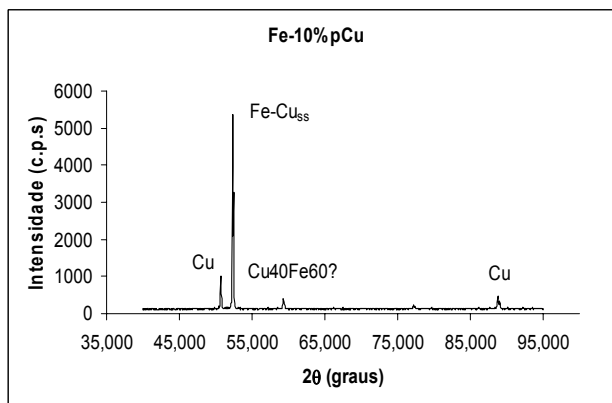


Figura 6 – Difratograma do sistema Fe-10%pCu.

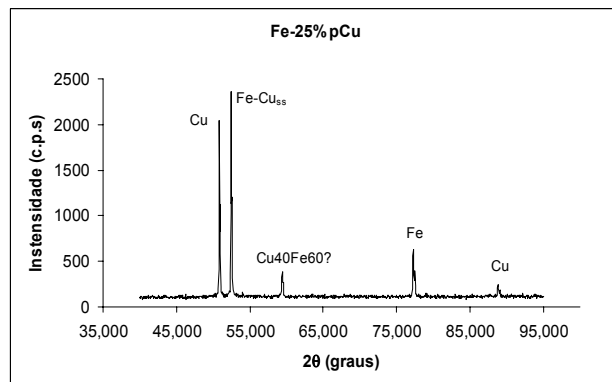


Figura 7 – Difratograma do sistema Fe-25%pCu.

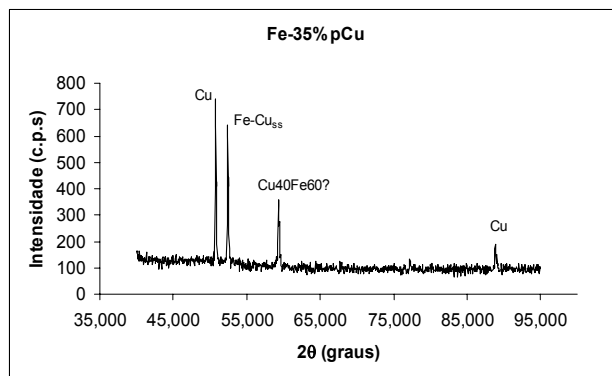


Figura 8 – Difratograma do sistema Fe-35%pCu.

Isto pode ser explicado pelo fato que para baixos teores de Cu, a microestrutura é porosa (até 10%pCu), entretanto o efeito negativo da porosidade é compensado pela dureza do Fe, a qual é 60% mais elevada que a do Cu – vide ref.[15]. Por outro lado, ao aumentar a quantidade de Cu, a dureza da matriz é compensada pela formação de solução sólida, aliada a uma microestrutura densa.

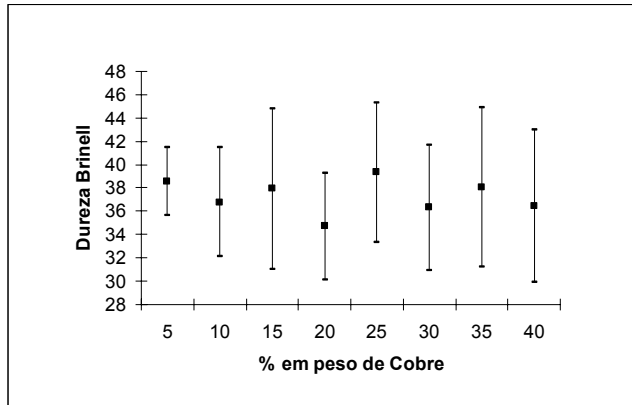


Figura 9 – Valores de dureza (HB) para o sistema Fe-(5-10-15-20-25-30-35-40)%pCu.

3.4 Tensão de Escoamento (σ_e)

Na fig.10, observa-se que a tensão visivelmente diminui com o aumento do teor de Cu em Fe, sendo a máxima em torno de 75 MPa, para Fe-5%pCu. Isso pode ser explicado pelo fato do Fe apresentar o dobro da resistência do Cu puro ($\sigma_{eFe} = 100$ MPa e $\sigma_{eCu} = 50$ MPa) – vide refs.[14,15].

Conforme explanado por Oliveira [15] e por Oliveira e colaboradores [16], é muito importante que a matriz ligante nas ferramentas diamantadas apresente uma capacidade de deformação satisfatória, aliada a uma tensão de escoamento desejável, sem ocorrência de deformação permanente. Isso vai assegurar que durante os choques mecânicos oriundos do processo de corte, a matriz metálica não venha a falhar prematuramente, e ao mesmo tempo mantenha os cristais de diamantes fixos.

No que tange à deformação elástica, a tab.1 mostra a influência das adições de Cu. Observa-se nesta tabela que o valor

mais moderado para ϵ é 1,35%, obtido para as amostras com adição de 20%pCu

3.5 Considerações Finais

Diante da fundamentação apresentada, há uma tendência à escolha da liga Fe-20%Cu dentre as estudadas, para possível uso como matriz ligante em ferramentas diamantadas, uma vez que os resultados de dureza apontaram para um mesmo valor mediano para todas as composições, e o diferencial foi a tensão de escoamento, onde sugere-se o uso de um valor intermediário, no caso 65 MPa (entre 55 e 75 MPa), para atender às condições de satisfatória resistência, com capacidade de deformação.

Vale informar que Oliveira [15] estudou variações de Fe-(5-10-15-20)%pCu, e através de ensaios de dureza, compressão e resistência à abrasão, definiu que a composição com 20%pCu é a mais adequada, e produziu compósitos diamantados com tal composição para a matriz ligante e, comparando com liga comercial (ferramenta diamantada), obteve resultados satisfatórios para o corte de mármore. Este resultado também gera efeitos positivos no custo da ferramenta, uma vez que abre a possibilidade da eliminação do Co, e mais, o uso de teor reduzido de Cu (20%p) se faz importante, já que o mesmo é da ordem de 3 vezes mais caro que o Fe.

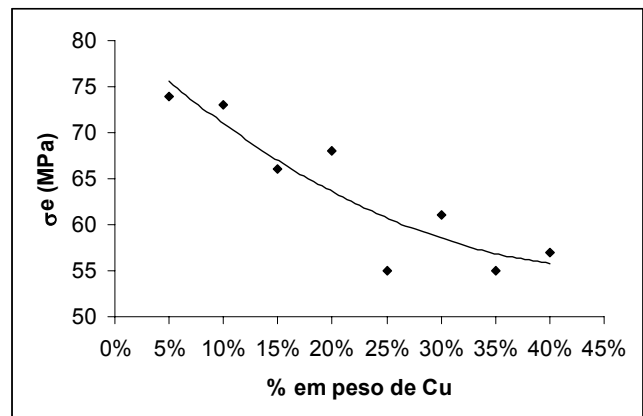


Figura 10 – Valores de σ_e das diferentes composições.

Tabela 1 - Valores da deformação elástica percentual (ϵ) das diferentes composições.

%pCu	5	10	15	20	25	30	35	40
	0,91 ± 0,08	1,07 ± 0,11	1,14 ± 0,09	1,35 ± 0,10	1,33 ± 0,08	1,42 ± 0,13	1,38 ± 0,07	1,39 ± 0,09

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais deste trabalho, podem ser pontuadas as seguintes conclusões:

- As micrografias mostram a efetividade da sinterização por fase líquida, a diminuição da quantidade de poros com o aumento do teor de cobre e uma distribuição homogênea do cobre em ferro;

- Houve a formação solução sólida Fe-Cu em todas as estequiometrias estudadas, o que é benéfico no que tange a melhoria das propriedades mecânicas;
- A dureza Brinell foi pouco sensível ao incremento do teor de cobre, com valor médio de 38 HB;
- A tensão de escoamento σ_e é reduzida com o aumento do teor de cobre em ferro e, varia de 55 a 75MPa.
- Sugere-se a composição Fe-20%Cu como a melhor, dentre as estudadas, para posterior uso como matriz ligante em ferramentas diamantadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq por financiar este trabalho, via projeto (nº 475465/03-2), à CAPES e FAPERJ pelas bolsas de estudo concedidas.

REFERÊNCIAS

1. YAMAGUCHI, K., *Journal of Materials Processing Technology* 63 (1997) 364.
2. DEL VILLAR, M., *Powder Metallurgy* 44 (2001) 82.
3. CLARK, I.E., *Industrial Diamond Review* 3 (2002) 177.
4. SHIBUTA, D., *Recovery of Diamond from Diamond Tool Scrap*. Mitsubishi Metal Corporation. Japanese Patent. 1983.
5. LENEL, F.V. *Powder Metallurgy: Principles and Applications*. MPIF, Princeton, 1980.
6. KAYSSER, W.A. Dr. rer.nat. Thesis (1978). University of Stuttgart.
7. KAYSSER, W.A., PETZOW, G., Basic Mechanisms of Liquid Phase Sintering. In: *Sintered Metal-Ceramic Composites*. ed. by UPADHYAYA, G.S. Elsevier Science Publishing. New York, 1984, p.51.
8. HUPPMANN, W.J., *Zeitschrift für Metallkunde* 12 (1979) 792.
9. THÜMLER, F.; OBERACKER, R., *Introduction to Powder Metallurgy*, The Institute of Materials, London, 1993.
10. TANDON, R.; JOHNSON, J., *Powder Metal Technologies and Applications* 7 (1998) 565.
11. SILVA, V.F.; SAMPAIO, M.V.C.; CARVALHO, E.A.; BOBROVNITCHII, G.S.; FILGUEIRA, M., *Materials Science Forum* 498-499 (2005) 16.
12. ASM HANDBOOK, *Alloy Phase Diagrams* 3, 3.ed., ASM International, New York, 1979, p. 168.
13. PRZYKLENK, K., *Industrial Diamond Review* 4 (1993) 192.
14. OKADA, A.; MAEDA, H.; HAMADA, K.; ISHIDA, I., *Journal of Nuclear Materials* 271-272 (1999) 133.
15. OLIVEIRA, L.J., *Processamento e Caracterização do Sistema Fe-Cu-Diamante para uso em Pérolas de Fios Diamantados*. Dissertação de Mestrado (2005). PPGE/CM/UENF. Campos de Goytacazes (RJ).
16. OLIVEIRA, L.J.; PARANHOS, R. P. DA R.; GUIMARÃES, R. DA S.; BOBROVNITCHII, G.S.; FILGUEIRA, M., *Powder Metallurgy* 50 (2007) 148.