

PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE LIGANTES METÁLICOS PARA FERRAMENTAS DIAMANTADAS A PARTIR DO SISTEMA Fe-Cu-Nb¹

Marcelle Henriques Chagas Santos²

Luciano José de Oliveira³

Zulmira Alice Soares Guimarães⁴

Cássio Santos de Carvalho⁵

Marcello Filgueira⁶

Resumo

As ferramentas de corte diamantadas produzidas por Metalurgia do Pó, são compósitos constituídos de partículas de diamante embebidos numa matriz metálica ligante. A maioria destas ferramentas utiliza como o ligante o Cobalto, devido sua excelente compatibilidade química com o diamante e propriedades de aderência. Porém, o mesmo apresenta várias desvantagens em seu uso. Neste sentido, se propõem estudar ligas Fe-Cu-Nb para atuarem como matriz ligante de ferramentas de corte diamantadas, para processamento de rochas ornamentais e construção civil. Para isso, foram obtidas amostras contendo as seguintes composições: 1Fe:2Cu + (15-25-35)% em peso de Nb. Estas foram processadas via prensagem a quente, em prensa a quente industrial com matriz de eletrografite com nove cavidades cilíndricas. Posteriormente determinou-se a densidade e a análise microestrutural. Para verificar a influência da adição de Nb na resistência mecânica das amostras foi determinada a dureza das amostras estudadas visando definir a melhor composição do sistema estudado para no futuro ser usada em ferramentas diamantadas. Foi observado que a liga de 25% de Nb resulta em melhores valores de dureza entre as ligas estudadas.

Palavras-chave: Ligas Fe-Cu-Nb; Metalurgia do pó; Ferramentas diamantadas.

PROCESSING AND CHARACTERIZATION OF METALIC BINDER FOR DIAMOND TOOLS FROM THE SYSTEM Fe-Cu-Nb

Abstract

The diamond cutting tools produced by powder metallurgy are composites constituted of diamond particles embedded in a metal matrix. Most of these tools employ Cobalt as a bonding metal matrix, for the reason that Co combines good chemical compatibility with diamond and excellent diamond retention. However, it presents several disadvantages in their use. Thus, it is proposed to study alloy Fe-Cu-Nb to act as bonding matrix of diamond cutting tools, to ornamental processing and building construction. To do this, samples were obtained containing the following compositions: 1Fe: + 2Cu (15-25-35) %wt by weight of Nb. These samples were processed via hot pressing, using industrial hot press in eletrografite matrix with nine cylindrical cavities. Subsequently we determined the density, and analysis of the microstructure. To check the influence of Nb addition in the mechanical strength were determined hardness and wear tests of the samples assessed, aiming to define the ideal composition for future use in impregnated diamond tools. It was observed that the alloy contents 25%wtNb results in improved hardness and wear resistance in the studied alloys.

Key words: Fe-Cu-Nb alloy; Powder metallurgy; Diamond tools.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Graduando, Eng. Metalúrgica, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil; marcelle_sts@yahoo.com.br.

³ Matemático. Pós-Doutorando, Eng. e Ciência dos Materiais, Bolsita, UENF, RJ, Brasil; oliver@uenf.br.

⁴ Bióloga. Mestrando, Eng. e Ciência dos Materiais, UENF, RJ, Brasil; zulmiraguimaraes1@yahoo.com.br.

⁵ Tecnologia Rochas Ornamentais. Doutorando, Eng. e Ciência dos Materiais, UENF. cassiotro@gmail.com.

⁶ Eng. Mecânica. Doutor em Eng. e Ciência dos Materiais, Prof. Titular, Lamav, CCT, UENF, RJ, Brasil; marcello@uenf.br.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Os compósitos diamantados são muito efetivos quando do seu uso para processamento de materiais não metálicos, frágeis e duros, tais como cerâmicos, rochas, concreto, vidro, e outros. Estas ferramentas diamantadas abrangem diversas aplicações, como processamento e corte de rochas, especialmente pedras ornamentais, construção civil para corte de concretos, entre outras. Atualmente, a maioria destas ferramentas é produzida pela tradicional rota de prensagem a quente (rota industrial da metalurgia do pó), mas também algumas destas ferramentas são produzidas por prensagem a frio e sinterização – rota convencional da metalurgia do pó⁽¹⁾.

Tão importante quanto a escolha dos diamantes, é a seleção adequada dos ligantes metálicos para estas ferramentas, a qual está fortemente relacionada com o nível de abrasividade do material a ser cortado⁽²⁾. O cobalto funciona como um ligante nas ferramentas diamantadas, 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, o que explica o fato de que, atualmente, a maior parte das ferramentas de corte diamantadas o utiliza como matriz ligante^(3,4). Geralmente, o cobalto (Co) é utilizado em grandes quantidades e, nos últimos anos, grupos de pesquisa tem estudado diferentes proporções^(5,7). Apesar de o Cobalto comportar-se muito bem como ligante para estas ferramentas, o mesmo é altamente tóxico e apresenta uma histórica flutuação em seu preço de mercado, o que influi diretamente no preço final da ferramenta. Isso, foi o maior incentivo para o desenvolvimento de novas ligas alternativas ao cobalto, visando a sua diminuição e/ou eliminação.

Compósitos diamantados a base de ligas Fe-Cu-Co estão sendo desenvolvidos pelas grandes indústrias do setor, como as ligas NEXT, Cobalite HDR e Diabase⁽⁸⁾. Com o objetivo de substituir o Co nos compósitos diamantados essa pesquisa tem a finalidade de estudar o sistema Fe-Cu-Nb.

1.2 Objetivo

Esta proposta tem como principal objetivo, estudar ligas Fe-Cu-Nb para atuarem como matriz ligante de ferramentas diamantadas de corte, para processamento de rochas ornamentais e construção civil.

1.3 Revisão da Literatura

1.3.1 Seleção de ligantes

Muitos fatores são envolvidos na seleção da matriz ligante, e no caso de segmentos diamantados impregnados, os seguintes fatores são dominantes:

- resistência ao desgaste;
- capacidade de retenção do diamante;
- parâmetros usados no processo de fabricação.

Segundo Przyklenk:⁽²⁾ “a seleção dos ligantes depende fundamentalmente da abrasividade do material a ser cortado”. Ele averiguou que normalmente usa-se tungstênio (W) para o corte de materiais de dureza extremamente elevada, tal qual o

concreto, o cobalto (Co) é usado em ligas de W-Co, para materiais de alta dureza como os granitos, e o Co, Co-bronze, Fe-Co, Fe-bronze são ligantes empregados no corte de materiais de dureza mais moderada, como os mármore.

Quando do seu beneficiamento, é pouco disponível no mercado nacional, e é muito caro (R\$ 400,00/Kg) quando comparado com pós facilmente encontrados no mercado brasileiro, por exemplo, o ferro (R\$ 4,00/Kg) e o cobre (R\$ 12,00/Kg). Isso foi o maior incentivo para o desenvolvimento de novas ligas alternativas usando pós pré-ligados (*prealloyed*), os quais normalmente possuem uma concentração de cobalto 30% menor e, por conseguinte estão menos expostos à histórica flutuação de preço apresentada pelo cobalto ao longo dos anos.

Pode-se observar que nos últimos anos iniciava estudos de tendência da substituição do cobalto por ligas de Cu-Fe-Co, Co-Cu-Sn, Fe-Co-Cu-Sn e outras ligas alternativas^(5,6,7,9). Em 2001 foram desenvolvidas duas novas ligas pré-ligadas Cu-Fe-Co (NEXT), processadas pela rota de prensagem a quente (*hot pressing*), onde se usou pressões de 30 a 35 MPa, temperaturas de sinterização entre 600 e 750°C, para um tempo de 3 minutos⁽³⁾.

Tabela 1. Resultado da densificação, dureza e resistência a abrasão de ligas Fe-Cu-Co

Material	Densidade (%)	Dureza Rockwell B	Resistência a abrasão (%)
NEXT 100 ¹	76,64±0,77	118,9±0,2	2,096±0,055
Cobalite HDR ²	98	108	-
Diabase V07 ³	98,5	94-97	-

1: pré-ligado 50%Cu-25%Fe-25%Co, prensagem a quente 35 MPa/800°C/3minutos; ⁽³⁾
2: pré-ligado Fe-7%Cu-27%Co, prensagem a quente 35 MPa/800°C/3minutos; ⁽⁶⁾
3: pré-ligado 45-65%Fe-40%Cu-(20-40)%Co, prensagem a quente 35MPa/800°C/3min. ⁽¹⁰⁾

Desta maneira, diante do exposto, fica clara a importância do desenvolvimento de novos materiais para atuarem como matrizes ligantes para adesão de diamantes, sobretudo no que tange à redução e/ou eliminação do teor de cobalto nestas ligas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho, foram estudadas as matrizes metálicas ligantes para ferramentas diamantadas do sistema Fe-Cu-Nb variando os teores de 15 a 35%Nb em peso, de acordo com as seguintes composições:

- 28,34%Fe – 56,66%Cu – 15%Nb
- 25%Fe – 50%Cu – 25%Nb
- 21,67%Fe – 43,33%Cu – 35%Nb

2.1 Processamento da Liga Fe-Cu-Nb

De acordo com as composições apresentadas para a liga Fe-Cu-Nb, foram misturados os pós de ferro atomizado, com tamanho médio de partícula de 50µm e cobre atomizado, com tamanho médio de partícula de 67 µm, provenientes da empresa Metal Pó. Enquanto que o nióbio, que sofreu hidrogenação – moagem – desidrogenação, com tamanho médio de partícula de 37 µm (400 mesh) foi cedido pelo Departamento de Engenharia de Materiais – Escola de Engenharia de Lorena – DEMAR-EEL-USP.

Tabela 2. Composição química do pó de ferro (produzido via atomização – Metal Pó) - % em peso

Fe	S	Mn	Tl	Cu	Zn	Os
98,524	0,605	0,380	0,213	0,130	0,076	0,073

Tabela 3. Composição química do pó de cobre (produzido via atomização – Metal Pó) - % em peso

Cu	Ca	Ac	Gd	Sn	I
98,827	0,503	0,199	0,194	0,162	0,1116

Tabela 4. Composição química do pó de nióbio (produzido por hidrogenação - cominuição - desidrogenação – DEMAR-EEL-USP) - % em peso

Nb	Cu
99,760	0,240

As Tabelas 2 a 4 mostram a caracterização qualitativa dos pós de ferro, cobre e nióbio respectivamente. Pode-se observar, que em média, a pureza dos pós metálicos está na ordem de mais 98%. Isso mostra que o pequeno grau de impurezas encontradas não influencia os resultados.

As densidades teóricas do Fe (ρ_{TA}), Cu (ρ_{TB}) e Nb (ρ_{TC}) são respectivamente: 7,87 g/cm³, 8,92 g/cm³ e 8,57 g/cm³. Assim, segundo a regra das misturas para sistemas particulados⁽¹¹⁾, temos que para o cálculo da densidade teórica de cada matriz (ρ_T) é:

$$\rho_T = \frac{m_A + m_B + m_C}{\frac{m_A}{\rho_{TA}} + \frac{m_B}{\rho_{TB}} + \frac{m_C}{\rho_{TC}}} \quad (1)$$

As misturas dos pós foram realizadas durante 30 minutos em um misturador industrial para metais e diamantes, fabricado pela *Pyramid*, disponível no Setor de Materiais Super Duros – SMSD/UENF, seguido de prensagem a quente.

As sinterizações foram realizadas na prensa a quente industrial *Pyramid* os pós misturados e homogeneizados são prensados a quente em uma matriz de grafite com 4 cavidades cilíndricas de 11 mm diâmetro. Onde a prensagem dos pós ocorre simultaneamente com aplicação de temperatura (sinterização). Isso foi feito na prensa a quente industrial – Pyramid, e foram utilizados os seguintes parâmetros:

- T = 850°C
- P = 35 MPa
- t = 3 minutos

Cabe ressaltar, que o parâmetro temperatura está baseado no que se utiliza na indústria para a manufatura de compósitos diamantados para serras e pérolas de fios diamantados por exemplo (800°C a 850°C). Esta é a pressão e tempo ideais para a prensagem a quente de compósitos diamantados, justificando serem estes valores mundialmente utilizados⁽³⁾.

2.2 Caracterização das Amostras

Foi realizada a preparação metalográfica das amostras produzidas por metalurgia do pó, posteriormente as amostras foram levadas ao microscópio ótico, para que fosse feita a aquisição das imagens.

Para avaliar a efetividade da sinterização determinou-se a densidade das amostras estudadas. A densidade teórica (ρ_T) foi calculada pela Equação 1, enquanto que a densidade aparente (ρ_a) foi obtida utilizando a Equação 2.

$$\rho_a = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Onde: M é a massa em gramas e V é o volume em cm³ da amostra metálica.

A Equação 3 mostra como foi alcançado os valores para a densidade relativa (ρ_R) em %, a qual demonstra a diferença entre a densidade experimental (aparente) e a teórica.

$$\rho_R = \frac{\rho_a}{\rho_T} \quad (3)$$

As matrizes metálicas, preparadas metalograficamente, tiveram suas durezas medidas a partir de um penetrador de esfera de aço (1/16"). Os testes de dureza HRB foram realizados aplicando-se pré-carga de 10 kgf e uma carga de 55 kgf e 5 indentações por amostra.

As microscopias eletrônicas de varredura e Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva (EDS), foram realizadas no microscópio eletrônico Shimadzu, SSX-550, disponível no LAMAV/CCT/UENF, sendo as imagens geradas a partir de elétrons secundários (SE) com aumentos de 100x e 200x. Foi realizada a microanálise pontual, obtendo informações sobre a composição química da amostra de forma qualitativa.

3 RESULTADOS

A densidade aparente (ρ_a) e o erro absoluto (ϵ) estão apresentados na Figura 1.

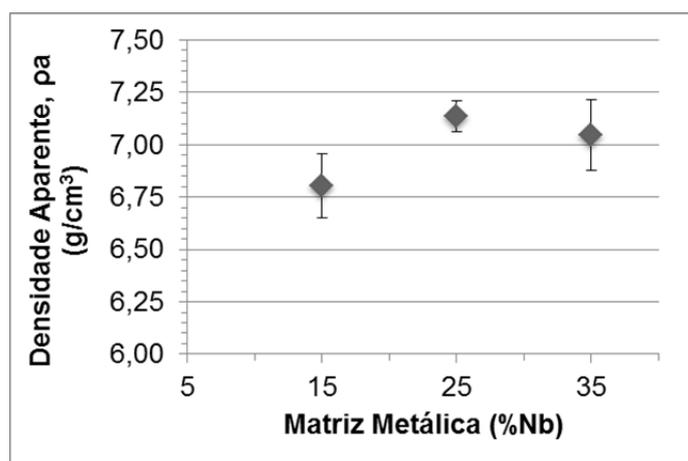


Figura 1. Gráfico da densidade aparente das matrizes metálicas.

A densidade relativa (ρ_R), calculada com o auxílio da Equação 2.3, está apresentada na Figura 2.

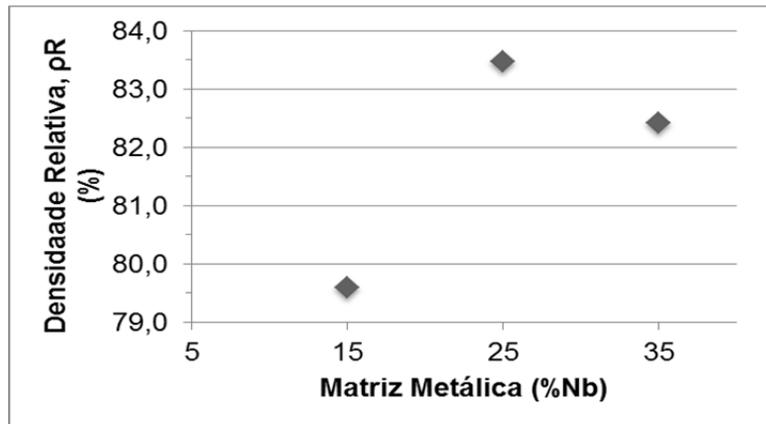


Figura 2. Gráfico da densidade relativa das matrizes metálicas.

As matrizes metálicas obtidas pela prensagem a quente foram submetidas ao teste de Dureza Rockwell B (HRB), conforme Figura 3. Observa-se que existe uma variação na dureza HRB para as matrizes metálicas à base de Nb.

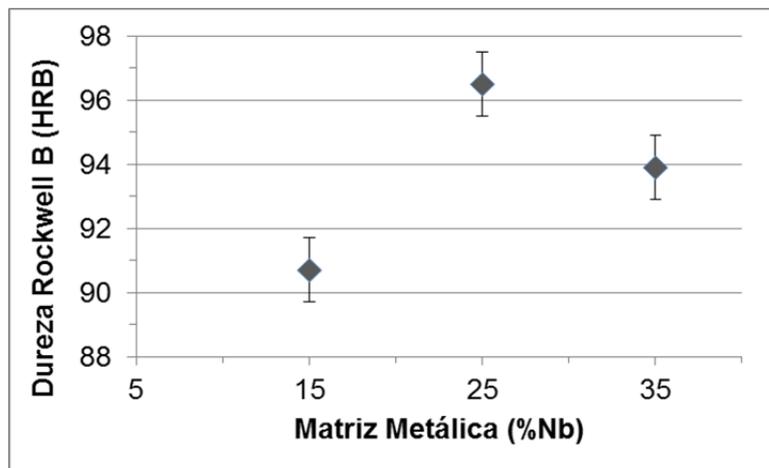


Figura 3. Dureza HRB das matrizes metálicas.

As amostras foram levadas ao microscópio ótico, para que fosse feita a aquisição das imagens (Figuras 4, 6) de forma a permitir avaliar, juntamente com os valores de densidade encontrados, a porosidade através de análise de imagens obtidas.

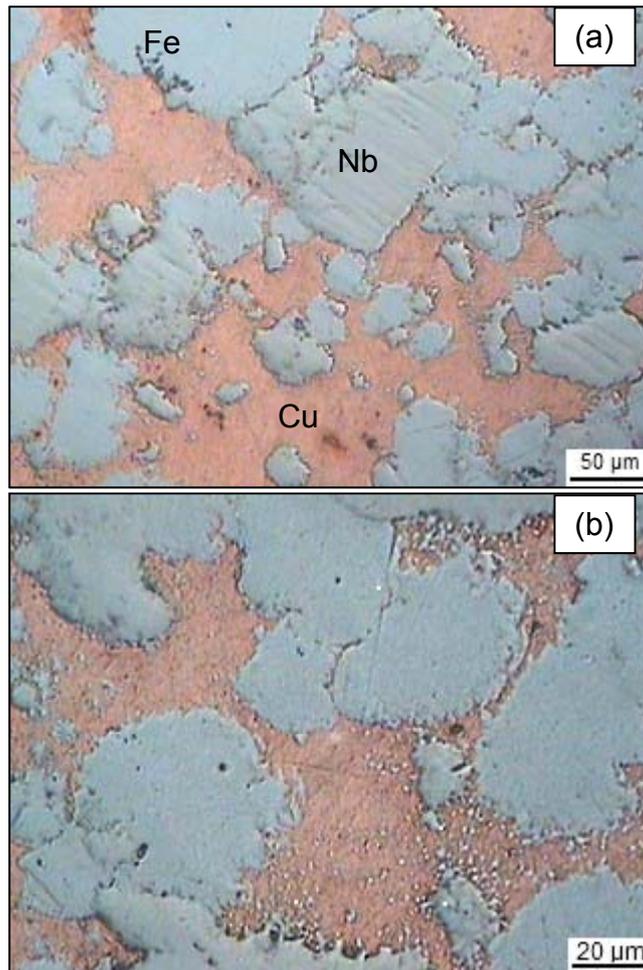


Figura 4. Microestrutura da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–15%Nb observada em campo claro. Ampliação: (a) 200x e (b) 500x.

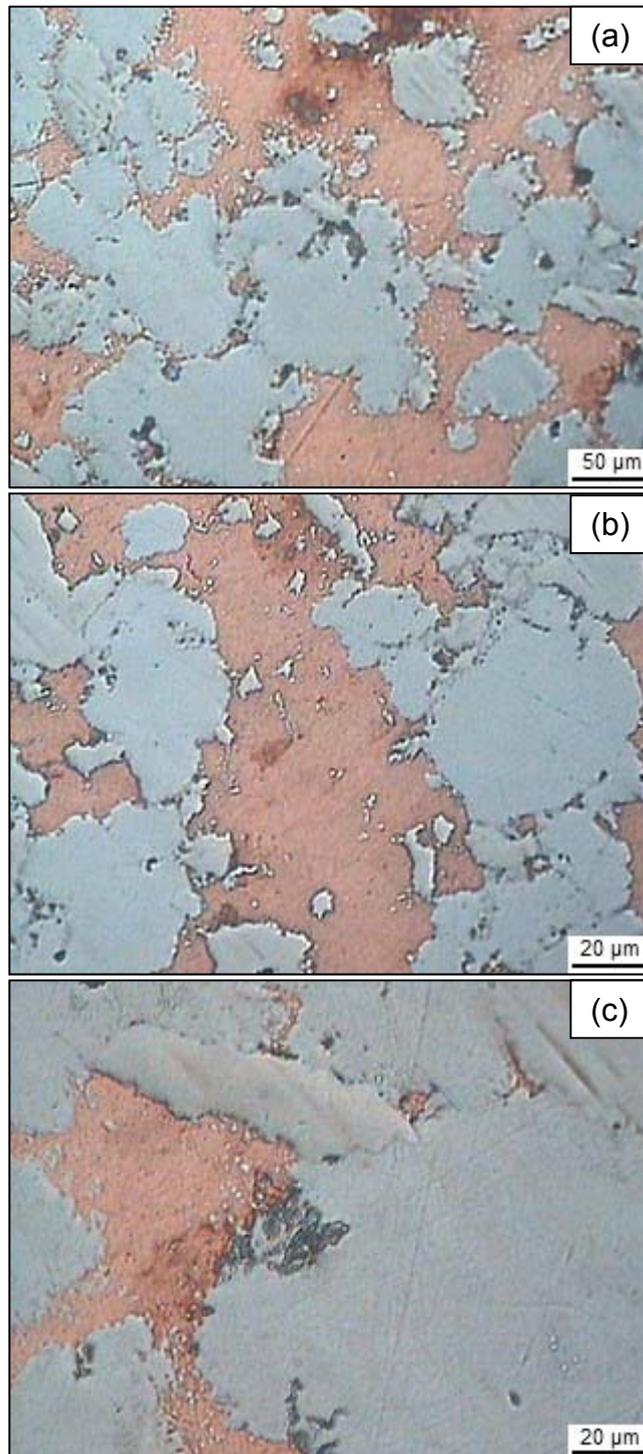


Figura 5. Microestrutura da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–25%Nb observada em campo claro. Ampliação: (a) 200x e (b,c) 500x.

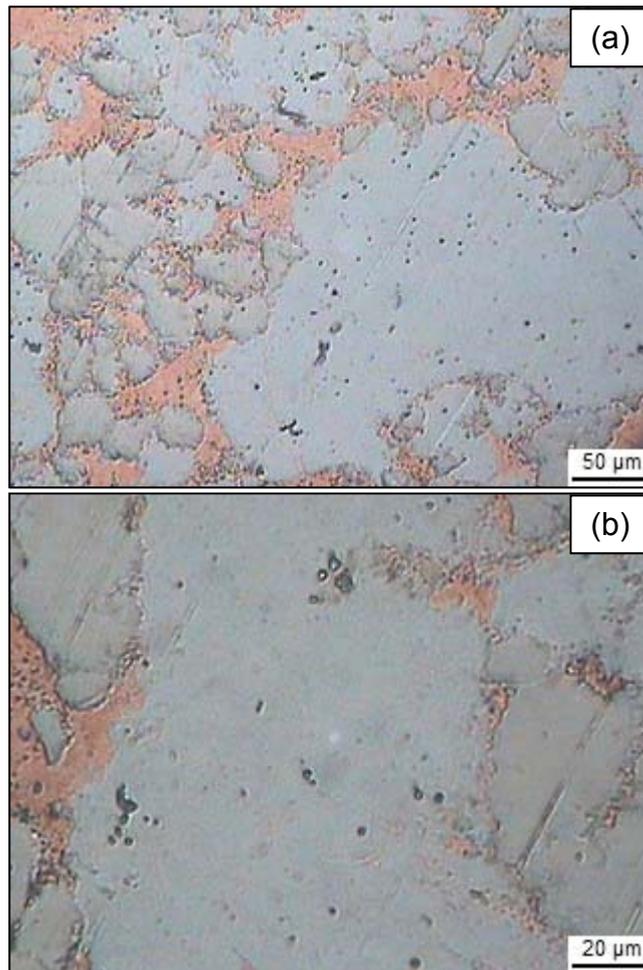


Figura 6. Microestrutura da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–35%Nb observada em campo claro. Ampliação: (a) 200x e (b) 500x.

As micrografias obtidas por MEV mostram o contraste topográfico, por elétrons secundários (SE) das ligas metálicas. A distribuição de elementos químicos em diferentes regiões das ligas metálicas foi determinada pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), sendo realizada microanálise de modo pontual.

A microestrutura da liga 28,34%Fe – 56,66%Cu – 15%Nb está apresentada pela Figura 7, a qual revela aglomerações de partículas de Fe e Nb dispersos na matriz de Cu, uniformemente.

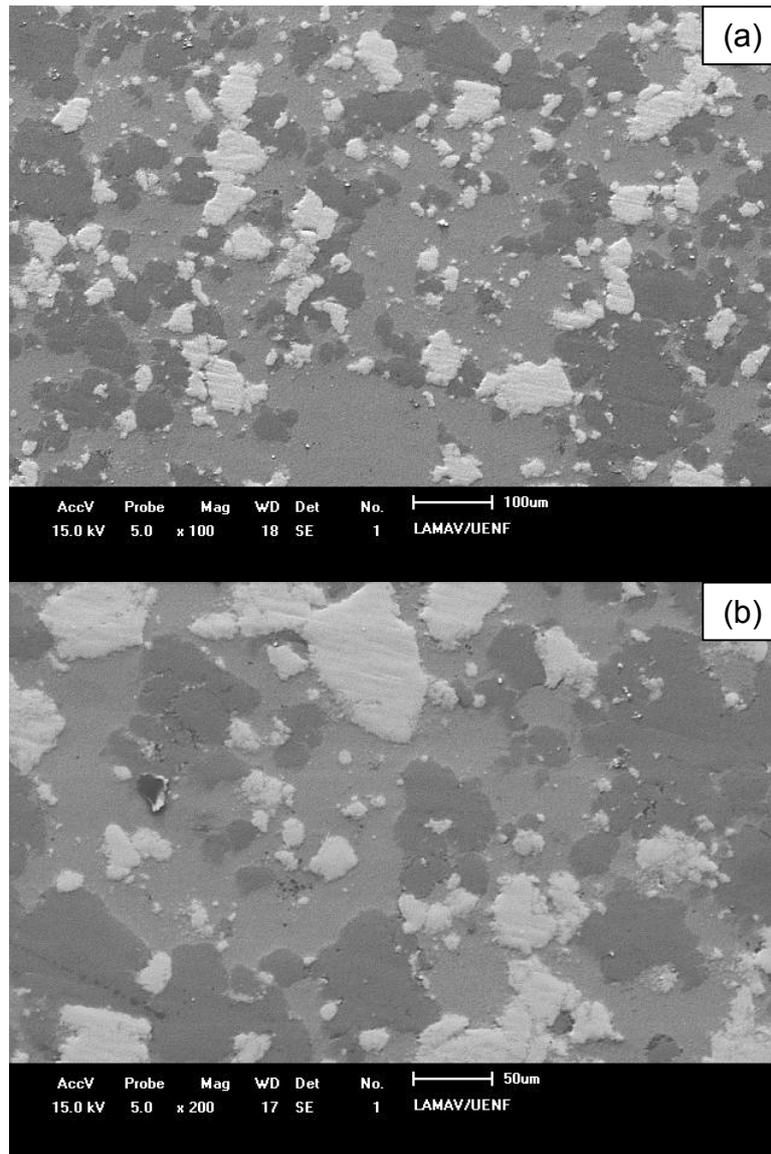


Figura 7. Microestrutura da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–15%Nb observada com SE. Ampliação: (a) 100x e (b) 200x.

Na Figura 10 apresenta-se a imagem da microestrutura da liga 28,33%Fe–56,66%Cu–15%Nb obtida por MEV em elétrons SE com o aumento de 200x, com a identificação das regiões onde foi realizada a análise por EDS pontual. Nas Figuras 9 a 11 são apresentados os espectros de emissão característica de raios X desta liga.

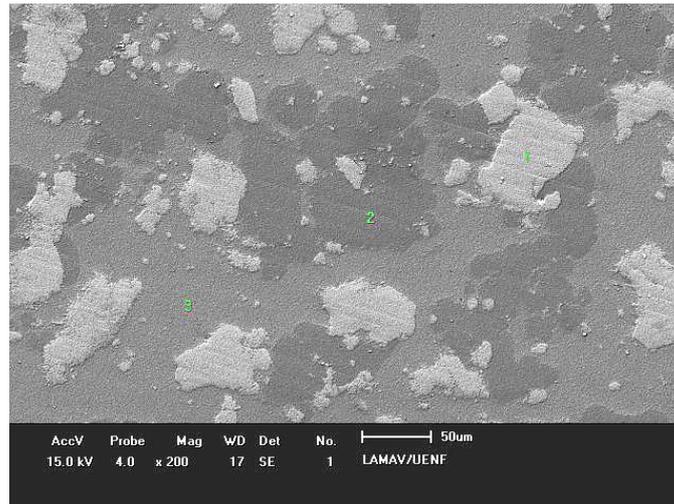


Figura 8. Microestrutura da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–15%Nb, com a identificação das regiões da microanálise pontual por EDS.

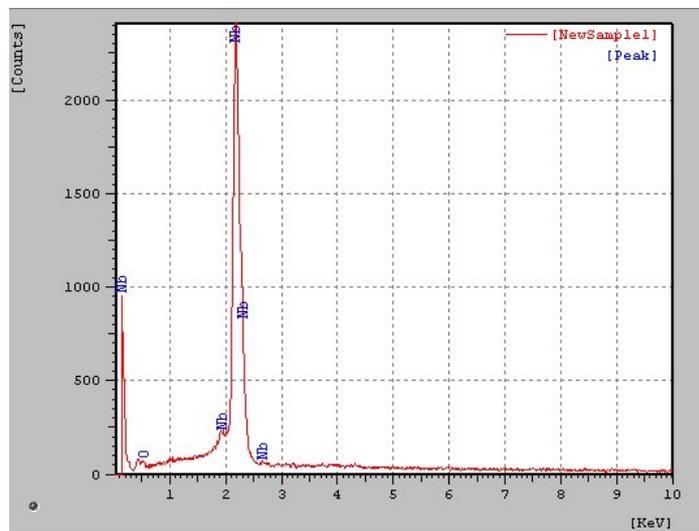


Figura 9. Espectros de emissão característica de raios x da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–15%Nb, no ponto 1 (Figura 8).

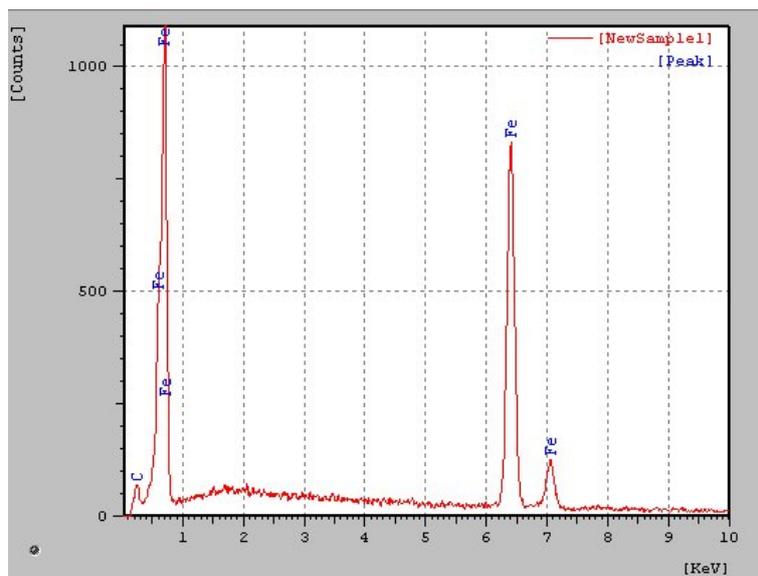


Figura 10. Espectros de emissão característica de raios x da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–15%Nb, no ponto 2 (Figura 8).

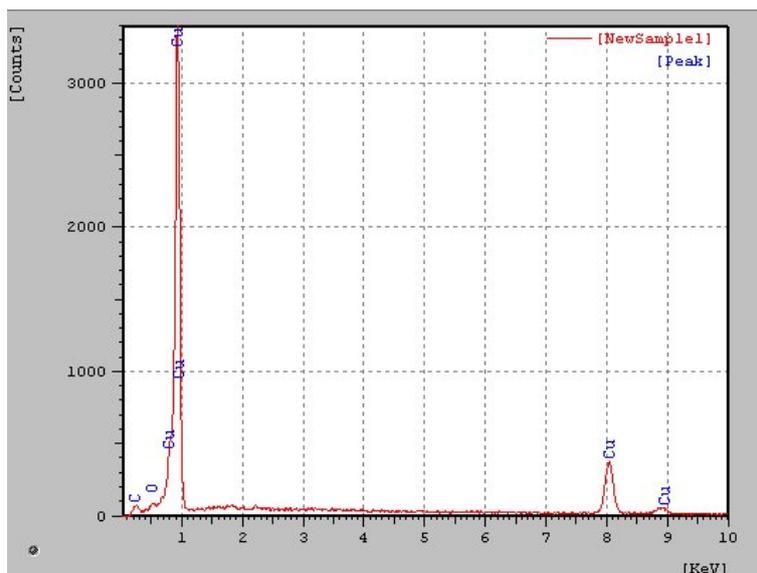


Figura 11. Espectros de emissão característica de raios x da liga 28,33%Fe– 56,66%Cu–15%Nb, no ponto 3 (Figura 8).

4 DISCUSSÃO

4.1 Densificação

Pode-se verificar que para as concentrações de nióbio estudadas houve uma pequena linearidade no gráfico devido aos valores de ρ_a serem próximos. Isso ocorre, pois os valores de densidade aparente encontrados não variaram de forma significativa para os compósitos estudados, principalmente considerando os desvios. Mostrando assim, que a prensagem das amostras foi efetiva e os parâmetros foram utilizados uniformemente para todas as ligas.

Visto que a porosidade de forma controlada é importante, pois age acomodando os diamantes que são inseridos na matriz metálica, todas as amostras apresentaram uma densificação satisfatória comparada com as obtidas pelas ligas Fe-Cu-Co apresentadas na Tabela 1. A menor densidade foi encontrada para a liga com 15%Nb o que indica um aumento da densidade com o aumento do teor de Nb. Na Figura 4 percebe que para os diferentes teores de nióbio estudados no sistema Fe-Cu-Nb, o maior valor de densidade encontrado foi para o teor de 25%Nb. O baixo valor de densidade encontrado para a liga de 35% de Nb justifica-se pela maior porosidade encontrada nessa liga como pode ser visto na Figura 7.

Esta relação entre poros e densidade pode ser explicada pelo fato de que o principal mecanismo de transporte de massa para a densificação é basicamente limitado pela fase rica em Cu. As quantidades presentes de partículas sólidas induzem uma alta deformação que agem aumentando a força motriz para a densificação⁽³⁾.

4.2 Dureza

Uma vez que a densidade está associada ao mecanismo de transporte de massa durante a prensagem a alta temperatura, onde as quantidades presentes de partículas sólidas induzem uma alta deformação no Cu que age aumentando a força motriz para a densificação e conseqüentemente a diminuição de porosidade e aumento na dureza⁽³⁾. De acordo com a Figura 5, de 15% a 25% Nb houve um acréscimo no valor de dureza, passando de 90,7 para 96,5 HRB. Mas ao aumentar o

teor de Nb para 35%, ocorre um decréscimo no valor da dureza, 93,9 HRB. Este mesmo comportamento foi observado pela densificação, a qual resulta em um material mais denso, o que acarreta numa melhor dureza, Figura 4. Comparado com a literatura (Tabela 1) as matrizes metálicas estudadas não tiveram valor de dureza superior.

4.3 Microestrutura

No aspecto óptico, a liga possui uma estrutura constituída de aglomerados de Fe e Nb, distribuídos por toda a matriz de Cu de forma homogênea. Na Figura 4b observa-se difusão e esta ocorre no sentido de aglomerar as fases de mesma composição. Esta liga com 15%Nb apresentou pequenos poros esféricos indicando o estágio final e efetividade da sinterização do estado sólido⁽¹²⁾.

Observa-se uma ligação existente entre a interface dos grãos de Nb e os de Fe, onde não se percebe a presença do contorno de grão como nas ligas de 15% e 25% sendo mais aparente para ultima. Pela análise do diagrama Fe-Nb, acredita-se ocorrer, nessa região, formação de soluções sólidas, duas fases intermediárias entre o sistema Fe-Nb: fase Laves ϵ -Fe₂Nb, μ -Fe₂₁Nb₁₉⁽¹³⁾.

São observadas manchas escuras na fase Cu, Figura 5b, provavelmente decorrente da presença de cristais de Fe na matriz de Cu⁽¹⁴⁾.

A estrutura da liga com 35%Nb mostrou-se similar às ligas anteriores, mas se difere em relação à quantidade de poros existentes. E nesta liga não se pode perceber, como nas ligas com 15 e 25%Nb, a ligação existente entre a interface dos grãos de Fe e Nb, onde estaria ocorrendo a formação de soluções sólidas.

Figura 8, a qual revela aglomerações de partículas de Fe e Nb dispersos na matriz de Cu, apresenta a identificação das regiões onde foi realizada a análise por EDS pontual. Nas Figuras 9 a 11 são apresentados os espectros de emissão característica de raios X desta liga, as quais comprovam a presença dos elementos Fe, Cu e Nb. O contraste em cinza claro do ponto 1 da Figura 8 é uma solução sólida rica em Nb; o aglomerado mais escuro que se encontra no ponto 2 é a fase Fe e a região em cinza escuro, ponto 3, se refere a fase dúctil Cu.

Por toda amostra verificou-se a presença das fases de forma homogênea. A detecção de oxigênio nesta liga pode estar relacionada à formação de óxidos na superfície da amostra durante contato com o ar atmosférico e a presença de C pode ser devido a difusão do carbono da matriz na amostra.

Para as demais ligas contendo 25% e 35% espera-se obter as mesmas fases em proporções diferentes, pois por microscopia ótica não foi constatado a presença de novas fases com a variação do teor de nióbio.

Dessa forma, para todas as ligas metálicas à base de Nb a estrutura é sempre a mesma: fases sólidas de Fe e Nb dispersos na matriz dúctil de Cu. Não foi confirmado a presença de soluções sólidas, podendo ocorrer entre os contornos de grãos de Fe e Nb.

5 CONCLUSÃO

As matrizes metálicas Fe–Cu–Nb apresentaram estruturas similares, com grãos da fase rica em ferro, Fe(α), grãos da fase Nb embebidos na fase dúctil Cu.

Foi visto através da densidade que a prensagem das amostras foi efetiva e os parâmetros foram utilizados uniformemente para todas as ligas. A dureza das amostras teve o mesmo comportamento da densidade apresentadas por elas. A

matriz 25%Fe – 50%Cu – 25%Nb apresentou resultados satisfatórios e superiores para densificação e dureza, o que indica ser a composição mais adequada para servir no futuro como matriz metálica no estudo das ferramentas diamantadas.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Faperj pela bolsa concedida para realização do projeto de pesquisa. Agradece também, ao técnico do Lamav, Renan, pela ajuda com o processamento das ligas.

REFERENCIAS

- 1 YAMAGUCHI, K.; TAKAKURA, N.; IMATANI, S. Compaction and Sintering Characteristics of Composite Metal Powders. *Journal Materials Processing Technology*. v.63, 1997. p. 364-369.
- 2 PRZYKLENK, K. Diamond Impregnated Tools – Uses and Production. *Toolmaking*. IDR. n.4.1993.
- 3 VILLAR, M. D. Consolidation of diamond tools using Cu-Co-Fe based alloys as metallic binders. *Powder Metallurgy*. n.1. v.44. 2001. p. 82-90.
- 4 SHIBUTA, D. et al. Recovery of Diamond from Diamond Tool Scrap. Mitsubishi Metal Corporation. Japanese Patent. 1983.
- 5 WEBER, G.; WEISS, C. (Diamix – A Family of Bonds Based on Diabase . *Industrial Diamond Review*. n.2. 2005. p. 28-32.
- 6 CLARK, I.E.; KAMPHUIS, B. Cobalite HDR – A New Prealloyed Matrix Powder for Diamond Construction Tools. *Industrial Diamond Review*. n.3. 2002. p.177-182.
- 7 OLIVEIRA, L.J.; FILGUEIRA, M. Aplicação de ligas de Fe-Cu-SiC como matriz ligante em ferramentas diamantadas. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*. n.1, v.26. 2007. p.15-20
- 8 OLIVEIRA, L.J. Mecanismos de Desgaste de Compósitos Metal-Diamantes Obtidos por Metalurgia do Pó. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ Universidade Estadual do Norte Fluminense. UENF. 2009. 129p.
- 9 Oliveira, L.J.; Bobrovnitchii, G.S.; Filgueira, M. (2007). Processing and Characterization of Impregnated Diamond Cutting Tools Using a Ferrous Metal matrix. *Int. J. Refract. Metals and Hard mater*. V.25. pp.328-335.
- 10 A.P. Barbosa. Processamento por metalurgia do pó e caracterização da liga Fe-Cu-Co para ferramentas diamantadas. Dissertação Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ Universidade Estadual do Norte Fluminense. UENF. 2008. 113p.
- 11 GERMAN, R.M. Principles of Powder Metallurgy. MPIF. New Jersey. 1992.
- 12 Oliveira, L.J. Processamento e Caracterização do Sistema Fe-Cu-Diamante Para Uso em Pérolas de Fios Diamantados. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ Universidade Estadual do Norte Fluminense. UENF. 2005. 122p.
- 13 RAMAN, A. *Proc. Indian Acad. Sci.* v.65A. 1967. p.256.
- 14 REN, H.; WANG, H.; LIU, Z.; AN, Z. Nanometer Stripe Microstructure of Supersaturated Solid Solution in Fe-Cu Alloy. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 14(1). 2007. p. 64-68.