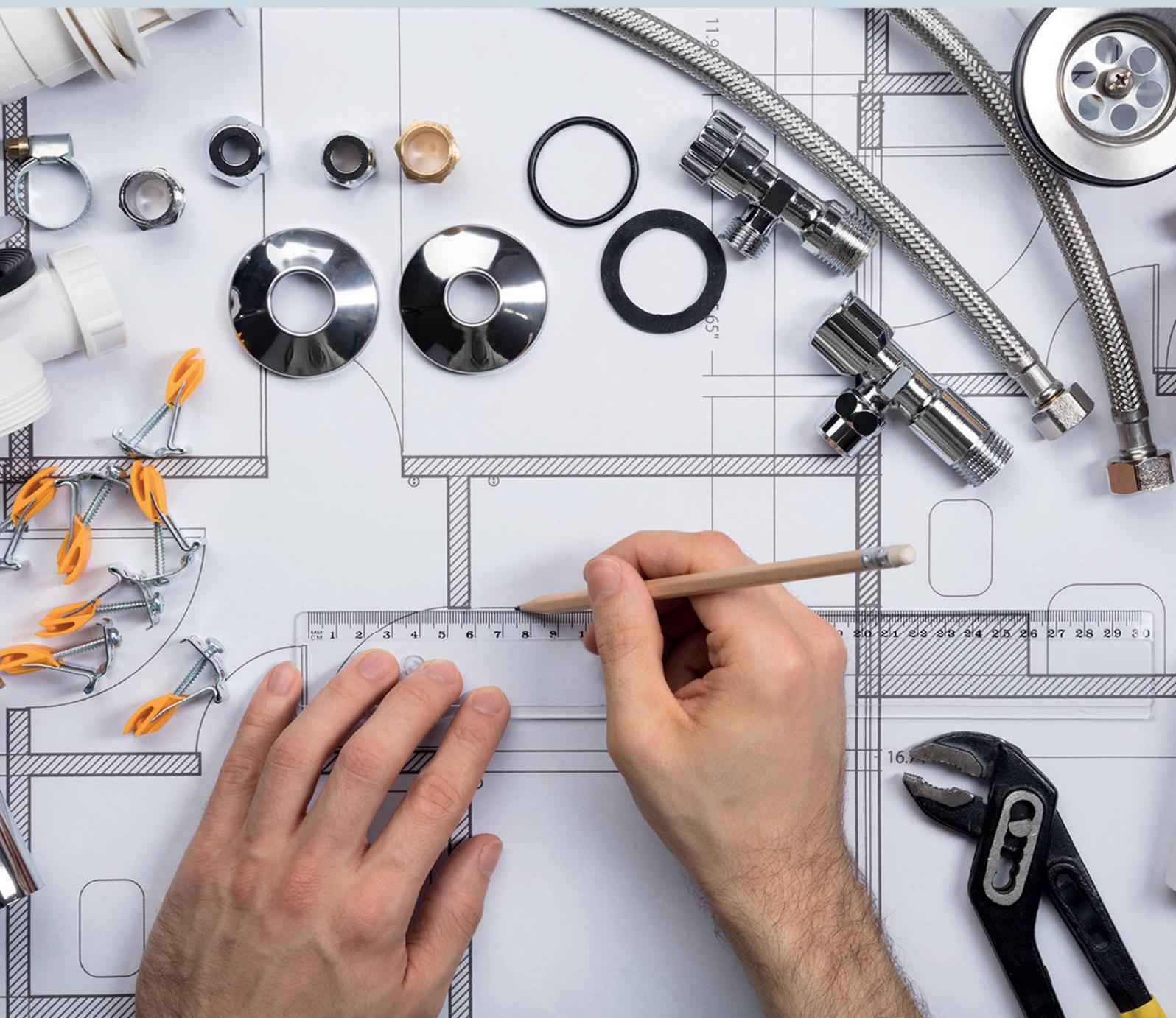


Ciência e Engenharia de Materiais

2

Marcia Regina Werner Schneider Abdala
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

MARCIA REGINA WERNER SCHNEIDER ABDALA

(Organizadora)

Ciência e Engenharia de Materiais

2

Atena Editora

2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C569 Ciência e engenharia de materiais 2 [recurso eletrônico] / Marcia Regina Werner Schneider Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Ciência e Engenharia de Materiais; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-85107-63-5

DOI 10.22533/at.ed.635183010

1. Engenharia. 2. Materiais I. Abdala, Marcia Regina Werner Schneider. II. Série.

CDD 620.11

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Você já percebeu a importância dos materiais na sua vida diária? Os materiais estão provavelmente mais imersos na nossa cultura do que a maioria de nós imagina. Diferentes segmentos como habitação, saúde, transportes, segurança, informação/comunicação, vestuário, entre outros, são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais.

De fato a utilização dos materiais sempre foi tão importante que os períodos antigos eram denominados de acordo com os materiais utilizados pela sociedade primitiva, como a Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, etc.

A humanidade está em constante evolução, e os materiais não são exceções. Com o avanço da ciência e da tecnologia a cada dia surgem novos materiais com características específicas que permitem aplicações pormenorizadas e inovação nas mais diferentes áreas.

Todos os dias centenas de pesquisadores estão atentos ao desenvolvimento de novos materiais e ao aprimoramento dos existentes de forma a integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras.

Estamos entrando em uma nova era caracterizada por novos materiais que podem tornar o futuro mais fácil, seguro e sustentável. O campo da Ciência e Engenharia de Materiais aplicada está seguindo por novos caminhos. A iminente escassez de recursos está exigindo inovações e ideias criativas.

Nesse sentido, este livro evidencia a importância da Ciência e Engenharia de Materiais, apresentando uma coletânea de trabalhos, composta por quatro volumes, que permitem conhecer mais profundamente os diferentes materiais, mediante um exame das relações entre a sua estrutura, as suas propriedades e o seu processamento.

Considerando que a utilização de materiais e os projetos de engenharia mudam continuamente e que o ritmo desta mudança se acelera, não há como prever os avanços de longo prazo nesta área. A busca por novos materiais prossegue continuamente...

Boa leitura!

Marcia Regina Werner Schneider Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CARBETO DE VANÁDIO NA MOAGEM E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 52100, PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ	
<i>Leandra Fernandes de Oliveira</i>	
<i>Bruna Horta Bastos Kuffner</i>	
<i>Daniela Sachs</i>	
<i>Gilbert Silva</i>	
<i>Geovani Rodrigues</i>	
CAPÍTULO 2	12
INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM INNERSHIELD NAS CARACTERÍSTICAS DA SOLDA DE UM AÇO ESTRUTURAL ASTM – A36	
<i>Waldemir dos Passos Martins</i>	
<i>Paulo Victor Cunha Caetano</i>	
<i>Valdemar Silva Leal</i>	
<i>Valter Alves de Meneses</i>	
CAPÍTULO 3	25
CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO AÇO INOXIDÁVEL 17-4 PH NITRETADO UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	
<i>Ane Caroline Celestino Silva</i>	
<i>Lucas da Silva Vicente</i>	
<i>Christian Egídio da Silva</i>	
<i>Cristina de Carvalho Ares Elisei</i>	
<i>Cirlene Fourquet Bandeira</i>	
<i>Sérgio Roberto Montoro</i>	
CAPÍTULO 4	32
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO BAIXO CARBONO APÓS PROCESSO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	
<i>Vanessa Moura de Souza</i>	
<i>Vinicius Martins</i>	
CAPÍTULO 5	43
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS MATRIZES METÁLICAS DO SISTEMA FE-CU-NB OBTIDAS POR Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Marcello Filgueira</i>	
CAPÍTULO 6	58
ESTUDO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA 356.0	
<i>Laura Ferrazza Kirch</i>	
<i>Amanda Yuki Shimosaka</i>	
<i>Dalmarino Setti</i>	
CAPÍTULO 7	65
ESTUDO SOBRE O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO DAS MATRIZES METÁLICAS DE FE-CU-25%NB E FE-CU-25%CO DURANTE A Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Adriano Corrêa Batista</i>	
<i>Luis Guerra Rosa</i>	
<i>Paulo Santos Assis</i>	

CAPÍTULO 8	84
TRANSIÇÃO OBSERVADA ENTRE OS MODOS DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR “RISCAMENTO” E POR “ROLAMENTO” EM WC-CO P20 E AÇO-FERRAMENTA M2	
<i>Ronaldo Câmara Cozza</i>	
CAPÍTULO 9	92
ANÁLISE DA DUREZA E MICROESTRUTURA DO AÇO ABNT 1045 APÓS TÊMPERA E REVENIMENTO	
<i>João Paulo Montalván Shica</i> <i>Matheus Henryque Almeida e Silva</i>	
CAPÍTULO 10	105
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE RIGIDEZ SOBRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE PLACAS DE ALUMÍNIO	
<i>Pietro Olegário da Silva</i> <i>Adriana Amaro Diacenco</i>	
CAPÍTULO 11	118
ANÁLISE DA MICRODUREZA E CORROSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW NA CHAPA DE AÇO DOBRADA TIPO U	
<i>Josemairon Prado Pereira</i> <i>Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves</i>	
CAPÍTULO 12	129
ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA UTILIZANDO MÉTODO DIRETO E EQUAÇÕES DE SOLDAGEM	
<i>Thyálita Coêlho Moreira Mousinho</i> <i>Thaís Spíndola Garcêz</i> <i>José Francisco dos Reis Sobrinho</i> <i>Nelson Guedes de Alcântara</i>	
CAPÍTULO 13	138
MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO ND:YAG EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L	
<i>Dair Ferreira Salgado Junior</i> <i>Vicente Afonso Ventrella</i> <i>Juno Gallego</i>	
CAPÍTULO 14	153
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LÂMINAS DE SERRA NO CORTE DA MADEIRA COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	
<i>Daniel Villas Bôas</i> <i>Elder Jesus Lima Machado</i> <i>Vanessa Ferreira Neves</i>	
CAPÍTULO 15	160
O EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE HOMOGENEIZAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO EM DEFORMAÇÃO A FRIO DAS LIGAS TI-35NB E TI-35NB-0,15SI	
<i>Késia Filadélfia Dionizio Silva Ramos</i> <i>Helton José Rodrigues Cabral</i> <i>Reinan Tiago Fernandes dos Santos</i> <i>Wilton Walter Batista</i>	
CAPÍTULO 16	173
LIGA DE MAGNÉSIO AZ91D: AVALIAÇÃO DA BIODEGRABILIDADE E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	
<i>Ronaldo Veronês Nascimento</i> <i>Ângela Beatriz Coelho Arnt</i> <i>Marcio Roberto da Rocha</i> <i>Steferson Luiz Stares</i>	

CAPÍTULO 17	184
INFLUÊNCIA DO PH E DO TEMPO DE IMERSÃO NA SILANIZAÇÃO JUNTO DE TANINOS PARA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE AÇOS GALVANIZADOS	
<i>Bruno Pienis Garcia</i> <i>Álvaro Meneguzzi</i>	
CAPÍTULO 18	194
A NEW PROCEDURE TO DETERMINE THE PERMITTIVITY OF RADAR ABSORBING MATERIALS	
<i>Tamara Indrusiak Silva</i> <i>Iaci Miranda Pereira</i> <i>Jorge A. Mitrione Souza</i> <i>Marbey Manhães Mosso</i> <i>Ângelo M. Leite Denadai</i> <i>Jéferson Gomes da Silva</i> <i>Alan Reis de Oliveira</i> <i>Bluma Guenther Soares</i>	
CAPÍTULO 19	204
DESENVOLVIMENTO DE UM REVESTIMENTO A BASE DE NIÓBIO PARA PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO DE AÇO-CARBONO (SAE 1020)	
<i>Paloma Detlinger</i> <i>Brian Utri</i> <i>Guilherme Arielo Rodrigues Maia</i> <i>Rodrigo Helleis</i> <i>Cynthia Beatriz Fürstenberger</i> <i>Everson do Prado Banczek</i>	
CAPÍTULO 20	213
CORROSÃO E BIOCORROSÃO EM AÇO CARBONO	
<i>Diana Magalhães Frazão</i> <i>Ivanilda Ramos de Melo</i> <i>Severino Leopoldino Urtiga Filho</i>	
SOBRE A ORGANIZADORA	218

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS MATRIZES METÁLICAS DO SISTEMA FE-CU-NB OBTIDAS POR PRENSAGEM A QUENTE

Hellen Cristine Prata de Oliveira

Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP,
Rede Temática em Engenharia de Materiais –
REDEMAT, Ouro Preto/MG, Brasil.

Marcello Filgueira

Universidade Estadual do Norte Fluminense –
UENF, Centro de Ciência e Tecnologia – CCT,
Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV,
Campos dos Goytacazes/RJ, Brasil.

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo estudar as ligas metálicas 56,66%Cu – 28,33%Fe – 15%Nb; 50%Cu – 25%Fe – 25%Nb; 43,34%Cu – 21,67%Fe – 35%Nb e 36,33%Cu – 18,33%Fe – 45%Nb, observando o comportamento da estrutura quando se adiciona nióbio nas ligas, devido a possibilidade de substituição de cobalto pelo nióbio em matriz metálica para atuar como ligante em ferramentas diamantadas. Os pós metálicos foram misturados e então prensados a quente a 800°C/35MPa/3 min, ocorrendo a sinterização. Realizaram-se nestes sinterizados difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e microanálise por espectroscopia dispersiva de energia a fim de avaliar a microestrutura resultante do processo de sinterização das matrizes metálicas e a efetividade da sinterização entre os elementos Fe, Cu e Nb. Foi determinado também a densidade relativa, a porosidade e a dureza HV5. Os resultados

mostraram que com o aumento do teor de nióbio nas ligas metálicas há um favorecimento na formação de soluções sólidas, o que implica na melhora das propriedades mecânicas e físicas.

PALAVRAS-CHAVE: sistema Fe-Cu-Nb, caracterização estrutural, MEV/EDS.

ABSTRACT: The present work aims to study the alloy Cu 56.66% - 28.33% Fe - 15% Nb; 50% Cu - 25% Fe - 25% Nb; Cu 43.34% - 21.67% Fe - 35% Nb and Cu 36.33% - 18.33% Fe - 45% Nb, observing the behavior of the structure when adding the niobium alloys, due to the possibility of substituting the cobalt by niobium in the metallic matrix to act as a binder for diamond tools. The metallic powders were mixed and then hot-pressed at 800 ° C / 35MPa / 3 min, sintering occurs. Were held in these sintered XRD, SEM and EDS to evaluate the microstructure resulting from the process of sintering metal matrix and the effectiveness of the sintering between Fe, Cu and Nb elements. Also it was determined the relative density, porosity and hardness HV5. The results showed that with the increase of the niobium content alloys there is a bias in the formation of solid solutions, which implies improved mechanical properties.

KEYWORDS: system Fe-Cu-Nb, structural characterization, SEM/EDS.

1 | INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó é uma técnica de conformação mecânica relativamente recente. Uma das suas principais utilizações está no uso de pós metálicos para produção de matrizes metálicas. Geralmente esse processo é usado quando a metalurgia convencional não é capaz de atender aos requisitos, como temperatura de processo e porosidade, requerida para o processo e produto final. Essa rota de processamento dos pós consiste basicamente das etapas de preparação dos pós, compactação dos mesmos e sinterização. A sinterização sob pressão (ou prensagem a quente) é uma técnica comumente utilizada para a produção de matrizes para ferramentas de corte diamantadas (UPHADHYAYA, 2009).

A escolha da matriz metálica adequada a cada aplicação depende de uma série de fatores, como a escolha dos ligantes, da técnica de sinterização e propriedades mecânicas e físicas adequadas. Devido às complexas condições de operação nas quais as ferramentas diamantadas são expostas, matrizes metálicas ligantes de diferentes composições são normalmente usadas. Ligantes à base de cobre, de bronze, de cobalto, de tungstênio, o composto carбето de tungstênio, bem como outras combinações, são largamente utilizados nas ferramentas usadas nas operações de desmonte e beneficiamento de rochas abrasivas (OLIVEIRA, 2010; DEL VILLAR *et al.*, 2001).

Por muitos anos o cobalto tem sido usado no processamento das ferramentas diamantadas, por isso, quase a totalidade das ferramentas diamantadas comerciais é feita utilizando como ligante o Co, e em grandes quantidades, pois combina 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. Apesar de promover elevada aderência para com o diamante, o cobalto é altamente tóxico e caro quando comparado com pós facilmente encontrados no mercado brasileiro (Fe e Cu) (SHIBUTA, 1983; DEL VILLAR *et al.*, 2001; OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Assim sendo, o desenvolvimento de novas ligas metálicas para a adesão de diamantes com base na introdução de nióbio (Nb), visando à substituição do Co em ligas do sistema Fe-Cu no uso direto em ferramentas de corte do setor de rochas ornamentais e construção civil, é de grande relevância na área científica. Além do mais, o Brasil detém cerca de 98% das reservas de Nb no mundo, sendo estratégico o uso deste metal em mais esta aplicação importante na indústria nacional (OLIVEIRA, 2010).

No presente trabalho, foram estudadas as matrizes metálicas ligantes para ferramentas diamantadas do sistema Fe-Cu-Nb variando os teores de 15 a 45%Nb em peso: 28,34%Fe – 56,66%Cu – 15%Nb; 25%Fe – 50%Cu – 25%Nb; 21,67%Fe – 43,33%Cu – 35%Nb; 18,34%Fe – 36,66%Cu – 45%Nb. Este trabalho avalia o comportamento estrutural da adição de Nb, em substituição ao Co no sistema Fe-Cu-

Co, visando o uso como matriz ligante em ferramentas diamantadas, variando o teor de Nb de 15 a 45% em peso.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, foram estudadas as matrizes metálicas ligantes do sistema Fe-Cu-Nb variando os teores de 15 a 45%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
- 18,34%Fe – 36,66%Cu – 45%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 50 μm 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 45 μm (325 mesh), foi cedido gentilmente pelo Departamento de Engenharia de Materiais – Escola de Engenharia de Lorena – DEMAR-EEL-USP.

As misturas dos pós foram realizadas durante 30 minutos em um misturador industrial para metais e diamantes, fabricado pela *Pyramid*. A sinterização dos pós metálicos foi feita por prensagem a quente (Metalurgia do Pó), usando os parâmetros de sinterização: 35MPa / 800°C / 3 min.

A análise difratométrica (DRX) das amostras pesquisadas foram efetuadas em um difratômetro do tipo comercial, marca *Shimadzu*, modelo XRD 7000, disponível no LAMAV/CCT/UENF. A varredura foi feita variando 2θ de 30 a 100°, com passo ($\Delta\theta$) de 0,03 s e tempo de 0,5 s, usando a radiação de Cu- K_{α} .

A determinação dos picos dos difratogramas e a identificação das fases presentes nas matrizes metálicas foram realizadas com o auxílio do banco de dados cristalográficos do JCPDS (*Joint Committee of Powder Diffraction Standards*) e CIF (*Crystallograph Standart*), além de comparar os dados das distâncias interplanares referente aos planos cristalográficos encontrados na literatura.

A análise da microestrutura das matrizes metálicas foi realizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Shimadzu, modelo SSX-550, disponível no LAMAV/CCT/UENF, sendo as imagens geradas a partir de elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE). Foi avaliada a efetividade da sinterização através dos componentes estruturais, porosidade e segregação.

Com o auxílio de um espectrômetro por dispersão de energia (EDS), acoplado ao microscópio eletrônico de varredura SSX-550, foi realizada a microanálise pontual

e em linha, obtendo informações sobre a presença de fases e soluções sólidas, e a distribuição dos elementos químicos presentes através do mapeamento por raios X característicos dos constituintes metálicos.

As medidas da Dureza Vickers (HV5) das matrizes metálicas foram realizadas utilizando uma carga de 5kgf durante 15 segundos para cada endentação, utilizando o duromêtro da marca *Otto Wolpert Werk* modelo dia testor 2 Rc pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos/DEMET/UFOP.

A densidade relativa (ρ_r) foi obtida pela razão entre a densidade aparente e a densidade teórica do material.

A porosidade é uma estimativa da quantidade de poros existentes nos materiais, que se obtém a partir da diferença entre 100 e a densidade relativa do material ($100 - \rho_r$). A análise da porosidade revela o quanto poroso está o material, sendo que está também pode ser observada pela microestrutura e pela diminuição das propriedades mecânicas (OLIVEIRA, 2010).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 mostra os difratogramas obtidos das ligas Fe-Cu-Nb, onde o teor de Nb varia: 15, 25, 35 e 45% em peso, sendo identificadas as fases Cu, Nb e solução sólida Fe (Fe(α)).

Verifica-se a sobreposição dos picos à medida que a concentração de Nb é aumentada, sendo observado junto ao *background* o possível início da formação das fases secundárias: FeNb; Fe₂Nb; Fe₇Nb₆; Fe_aNb_b; CuFe.

Com o aumento de elemento Nb na liga, faz com que a rede CCC da fase Nb fique saturada e se transforme para a rede HCC, formando a fase Laves ϵ (Fe₂Nb) e, conseqüentemente, até mesmo para a rede CFC de fase metaestável, dependendo da quantidade de elemento adicionado, formando soluções sólidas como Fe₇Nb₆ (fase μ) e Fe_aNb_b.

As alterações na estrutura das fases são sensíveis, sendo reveladas a partir da concentração de 25%Nb, devido à instabilidade das fases, mostrando que o processo de transformação CCC → HCC → CFC ocorre à medida que a concentração de Nb é aumentada (LIN *et al.*, 1999).

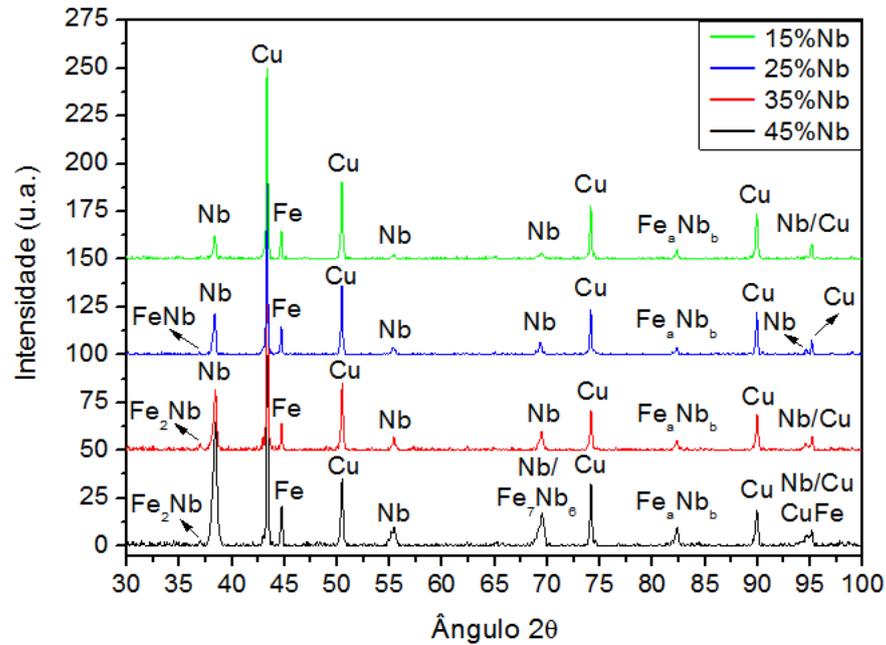


Figura 1 – Difratomogramas obtidos das ligas de Fe-Cu-Nb, onde o teor de Nb varia: 15, 25, 35 e 45% em peso.

Para maiores teores de Nb na liga, 45% em peso, o difratograma revelou uma sobreposição de fases, em torno do ângulo de 95°, coexistindo as soluções Nb/Cu/CuFe. Sabe-se que a formação da solução secundária de Cu em Fe promove o aumento de algumas propriedades mecânicas do material (TANDON e JOHNSON, 1998) e em regiões ricas em Cu a presença de cristais de ferrita na liga Fe-Cu (REN *et al.*, 2007).

A ausência de solução sólida entre Cu e Nb para as ligas com Nb se deve a insolubilidade de Nb em Cu, uma vez que a solubilidade do Cu em Nb é de aproximadamente 1,3%, para a temperatura de trabalho 800°C (LI *et al.*, 1998).

Portanto, o baixo limite de solubilidade entre os elementos Fe, Cu e Nb, faz com que a interação entre estes elementos para a formação de novas fases seja pequena. Para todas as ligas a base de Nb, houve a formação da solução sólida rica em Fe(α), de estrutura cristalina CCC; da fase dúctil rica em Cu de estrutura cristalina CFC e da fase rica em Nb com rede cristalina CCC.

De acordo com os estudos termodinâmicos e cinéticos para este intervalo de temperatura e, também, pelo aspecto dos difratogramas, nota-se que o efeito termodinâmico não foi suficientemente intenso para promover em quantidades consideráveis fases metaestáveis oriundas da difusão entre os elementos das ligas.

As micrografias da Figura 2 obtidas por MEV representam a morfologia das ligas à base de Nb estudadas. Foi realizada microanálise pontual por EDS para identificar as fases presentes nas matrizes metálicas.

Para todas as ligas metálicas à base de Nb a estrutura é sempre a mesma: fases sólidas de Fe(α) e Nb em forma de partículas dispersos na matriz dúctil de Cu, sem nenhuma presença visual de soluções sólidas, a não ser pelas pequenas manchas escuras na matriz de Cu (REN *et al.*, 2007) e nas interfaces das partículas de Fe/Nb.

À medida que se adiciona Nb na liga, ocorre uma mistura heterogênea maior para os elementos Fe e Nb, formando partículas dispersas pela matriz de Cu, de forma arredondada, revelando ainda a interação, possivelmente, entre estes através, e somente, da interface destas partículas.

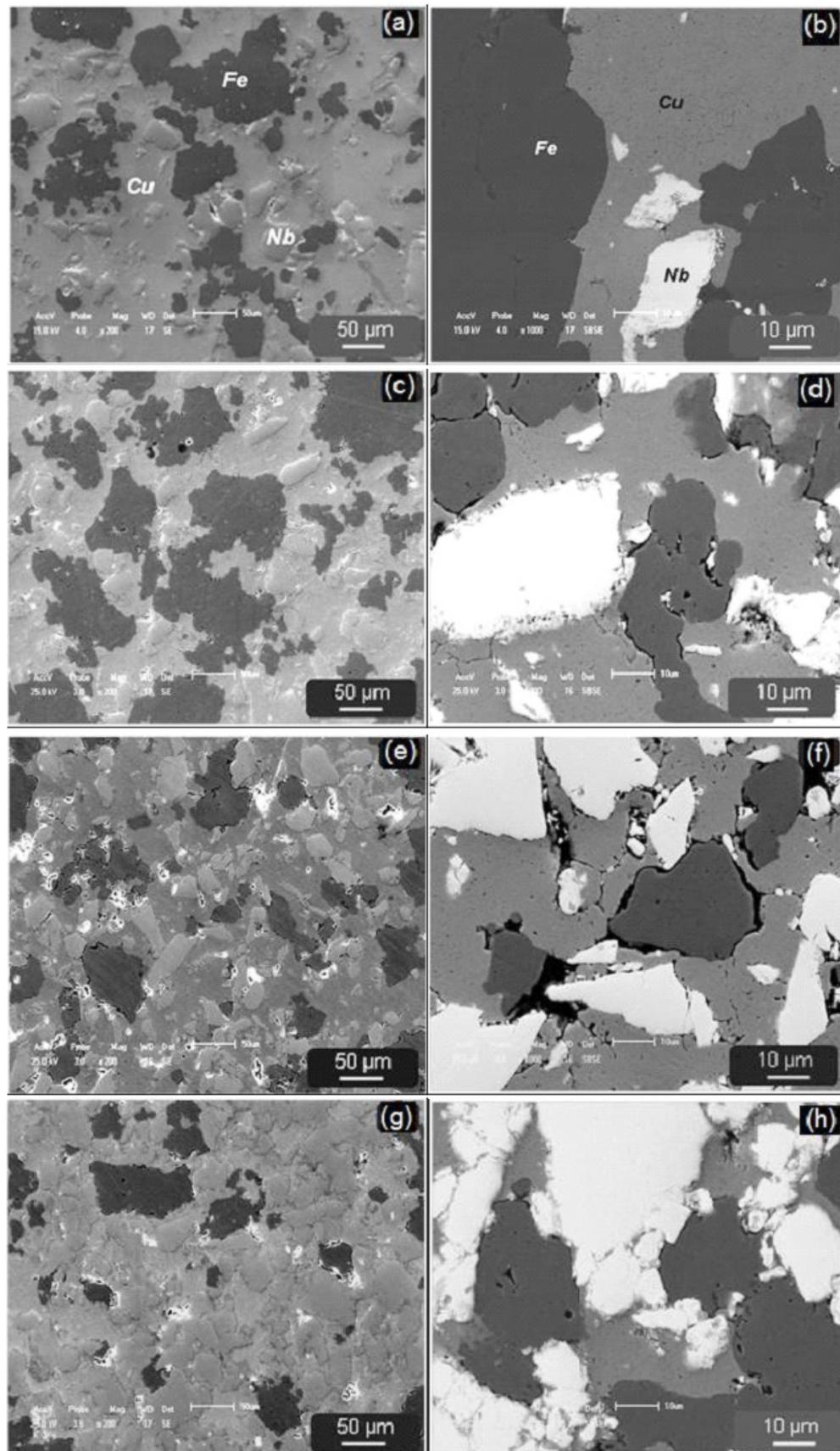


Figura 2 – Microestrutura das ligas de Fe-Cu-Nb obtidas por MEV, onde o teor de Nb varia: (a,b) 15, (c,d) 25, (e,f) 35 e (g,h) 45% em peso. Ampliação: (a, c, e, f) 200x; (b, d, f, h) 1000x.

Verifica-se também a presença de poros esféricos e irregulares em maior quantidade para as ligas com 15 e 35%Nb, uma vez que a distribuição heterogênea da porosidade em torno da partícula de Fe(α) pode estar relacionada à distribuição insatisfatória de Fe no Cu. Para teores de Nb com 25 e 45%, é observada uma pequena presença de poros esféricos indicando o estágio final e efetividade da sinterização do estado sólido.

Portanto, para as ligas com 15%Nb a 45%Nb, verificou a distribuição de forma heterogênea dos elementos Fe, Cu e Nb, formando partículas bem distintas entre si e, não foi observável difusão alguma entre os elementos para posterior formação de solução sólida. Isso mais uma vez confirma a difícil interação entre estes elementos para a formação de novas fases sólidas.

A Figura 3 mostra a análise por EDS ao longo de uma linha, sendo apresentada a variação de intensidade de emissão característica de raios X para a liga metálica, sendo observada grande diferença na contagem dos elementos, comprovando a aglomeração e a insolubilidade dos elementos Fe, Cu e Nb na liga com 15%Nb.

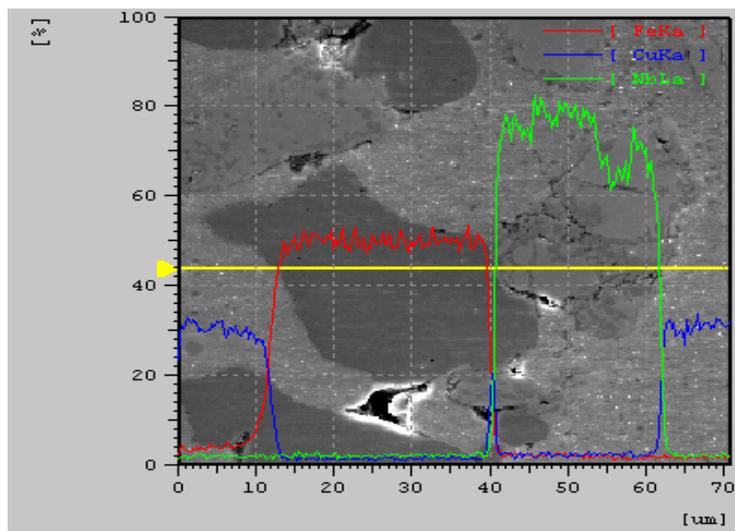


Figura 3 – Região analisada com aumento de 1000x (SE) obtida por MEV com a sobreposição das intensidades de emissão característica de raios X ao longo da linha para a liga 28,34%Fe – 56,66%Cu – 15%Nb.

A Figura 4 mostra a microestrutura referente à liga metálica 28,34%Fe – 56,66%Cu – 15%Nb da obtida por MEV em elétrons SE com o aumento de 200x e o mapeamento por emissão característica de raios X dos elementos Fe, Cu e Nb desta liga, as quais comprovam a presença dos elementos Cu (em maior quantidade) Fe e Nb, observando a dispersão dos elementos, comprovando a distribuição heterogênea dos elementos na liga.

Pela sobreposição dos elementos mapeados, as regiões em azul correspondem à fase dúctil Cu, enquanto que as colorações em vermelho e verde são Fe e Nb respectivamente. Não foi possível identificar regiões onde estariam presentes as

soluções sólidas, uma vez que para esta liga é quase ausente a formação das mesmas, conforme análises de difração de raios X.

Portanto, para a liga com 15%Nb, verificou a distribuição de forma heterogênea dos elementos Fe, Cu e Nb, formando partículas bem distintas entre si e, não foi observável difusão alguma entre os elementos para posterior formação de solução sólida.

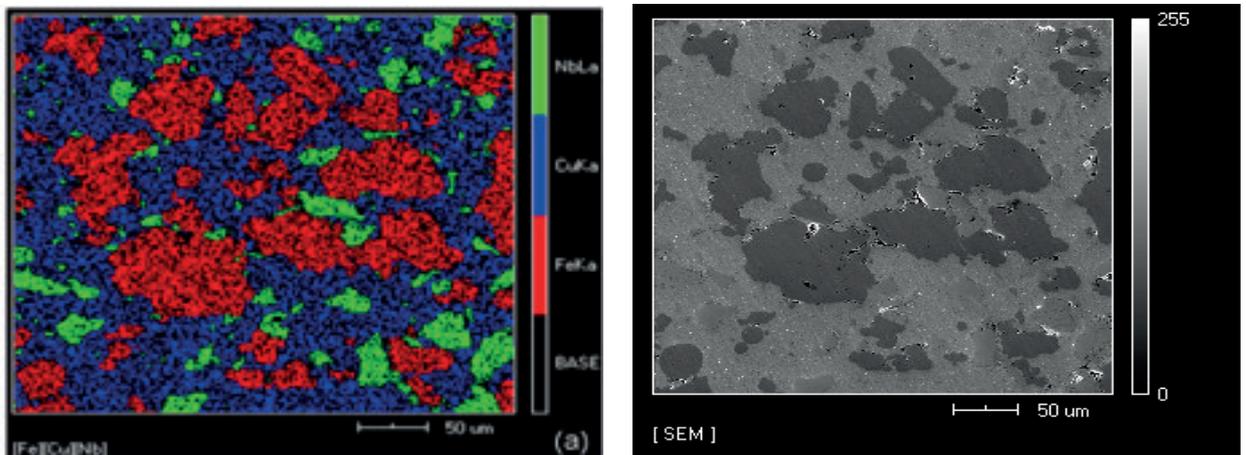


Figura 4 – Região analisada e o mapeamento por emissão característica de raios X da liga dos elementos Fe, Cu e Nb da liga 28,34%Fe – 56,66%Cu – 15%Nb.

A Figura 5 mostra a análise por EDS ao longo de uma linha, sendo apresentada a variação de intensidade de emissão característica de raios X para a liga metálica, sendo observada grande diferença na contagem dos elementos, comprovando a presença das partículas de forma heterogênea e a insolubilidade dos elementos nesta liga com 25%Nb.

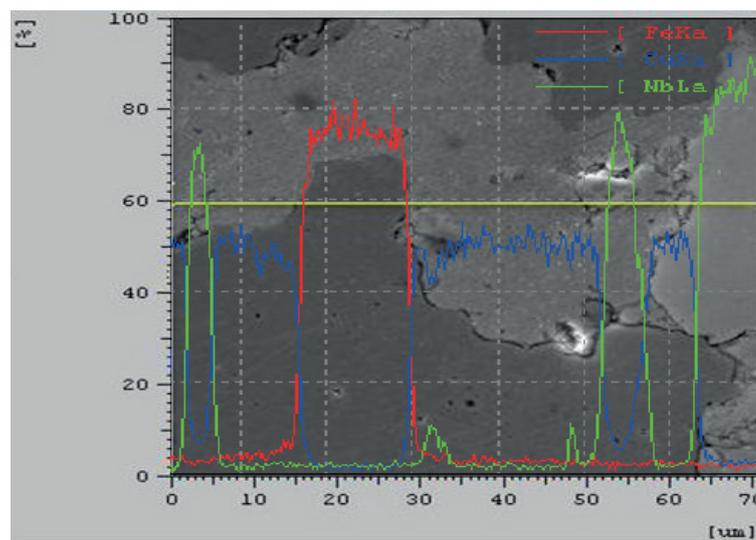


Figura 5 – Região analisada com aumento de 1000x (SE) obtida por MEV com a sobreposição das intensidades de emissão característica de raios X ao longo da linha para a liga 25%Fe – 50%Cu – 25%Nb.

Não foi possível visualizar interações entre Fe e Cu neste tipo de análise, mas para Nb e Cu, nos intervalos dos picos relativos ao Nb de 31 a 35 μm e 48 a 49 μm , foi observada, possivelmente devido a presença de partículas de Cu

Conclui-se que para cada região de partículas de Fe, Cu e Nb não foram observados nenhuma grande diferença na contagem dos elementos, comprovando a distribuição homogênea do elemento em sua respectiva partícula

A Figura 6 mostra a microestrutura referente à liga metálica 25%Fe – 50%Cu –25%Nb da obtida por MEV em elétrons BSE com o aumento de 200x e o mapeamento por emissão característica de raios X dos elementos Fe, Cu e Nb desta liga, as quais comprovam a presença dos elementos Cu (em maior quantidade) Fe e Nb, observando a dispersão dos elementos, comprovando a distribuição heterogênea dos elementos na liga.

Pela sobreposição dos elementos mapeados, não foi possível identificar regiões onde estariam presentes as soluções sólidas, uma vez que para esta liga é quase ausente a formação das mesmas, conforme análises de difração de raios X.

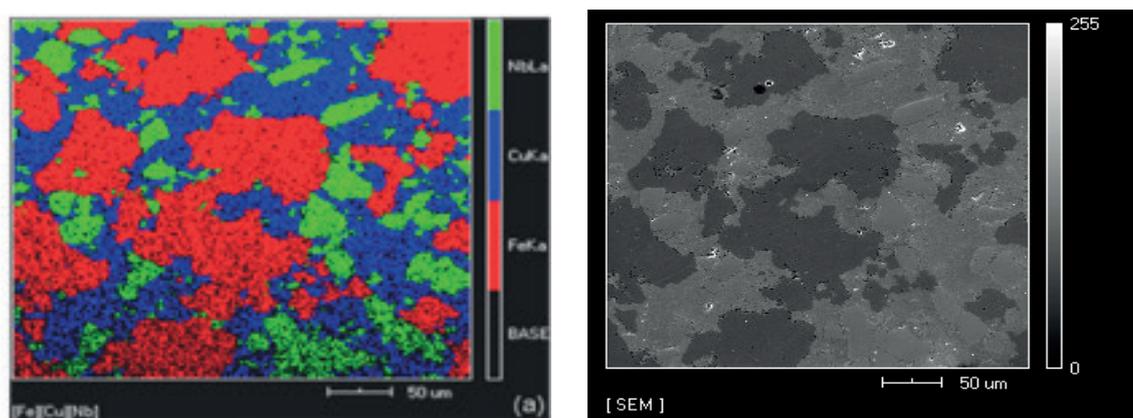


Figura 6 – Região analisada e o mapeamento por emissão característica de raios X da liga dos elementos Fe, Cu e Nb da liga 25%Fe – 50%Cu –25%Nb.

Portanto, para a liga com 25%Nb foi verificado a distribuição de forma heterogênea dos elementos Fe, Cu e Nb, formando partículas distintas entre si.

A análise por EDS ao longo de uma linha, Figura 7, apresenta a variação de intensidade de emissão característica de raios X para a liga metálica, sendo observada grande diferença na contagem dos elementos, comprovando a presença das partículas de forma heterogênea e a insolubilidade dos elementos nesta liga com 35%Nb.

A distribuição heterogênea dos elementos pode ser notada na liga com 35%Nb, a qual mostra a interação entre os elementos, revelando os locais ao longo da linha em que houve a formação de regiões ricas em Fe, Cu e Nb. Somente na faixa de 62 a 63 μm para o Cu que houve uma leve sobreposição de picos, coincidindo esta área com a de Fe, pois corresponde possivelmente à matriz de Cu com a presença de ferrita (REN *et al.*, 2007).

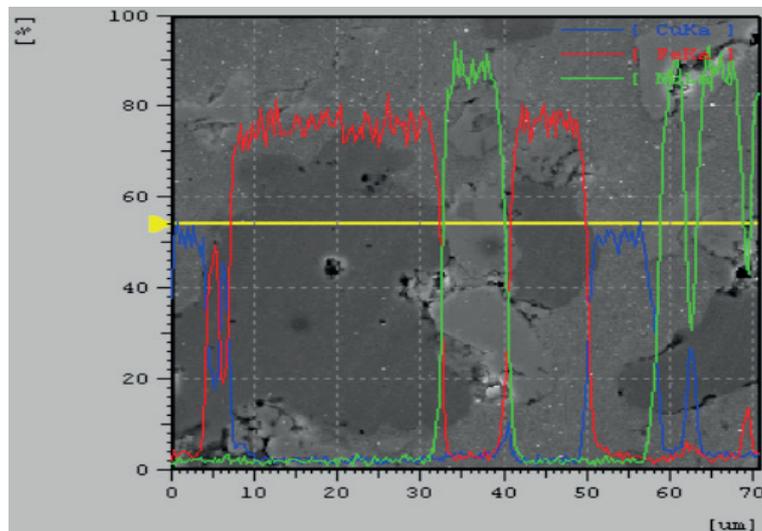


Figura 7 – Região analisada com aumento de 1000x (SE) obtida por MEV com a sobreposição das intensidades de emissão característica de raios X ao longo da linha para a liga 21,67%Fe – 43,33%Cu – 35%Nb.

Em nenhum momento observou-se a sobreposição de intensidades dos elementos Fe, Cu e Nb o que sugere a baixa solubilidade entre os mesmos para a formação de soluções sólidas. Conclui-se que para cada partícula de Fe, Cu e Nb não foram observados nenhuma grande diferença na contagem dos elementos, comprovando a distribuição homogênea do elemento em sua região respectiva.

A Figura 8 mostra a microestrutura referente à liga metálica 21,67%Fe – 43,33%Cu – 35%Nb da obtida por MEV em elétrons SE com o aumento de 200x e o mapeamento por emissão característica de raios X dos elementos Fe, Cu e Nb desta liga, as quais comprovam a presença dos elementos Cu, Fe e Nb, observando a dispersão dos elementos, comprovando a distribuição heterogênea dos elementos na liga.

Pela sobreposição dos elementos mapeados, não foi possível identificar regiões onde estariam presentes as soluções sólidas, uma vez que para esta liga é quase ausente a formação das mesmas, conforme análises de difração de raios X.

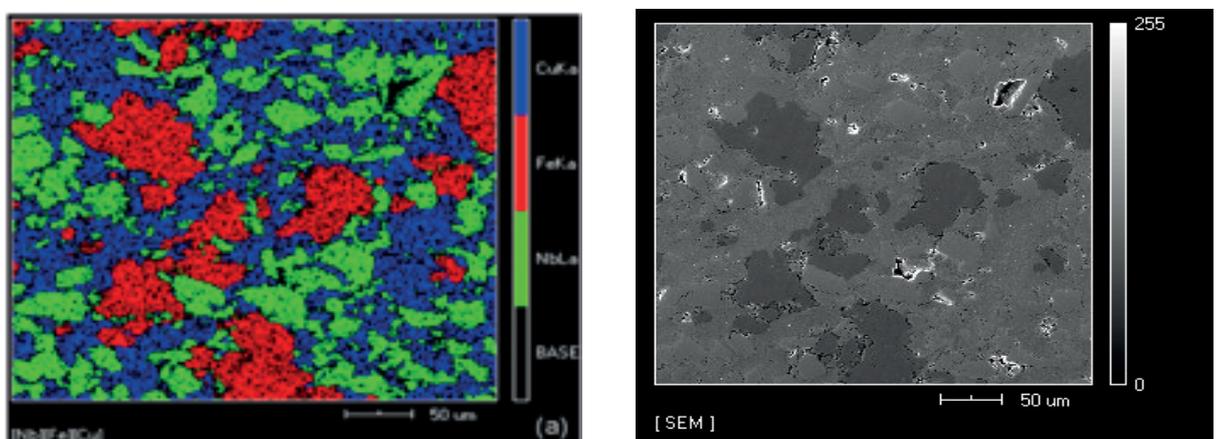


Figura 8 – Região analisada e o mapeamento por emissão característica de raios X da liga dos elementos Fe, Cu e Nb da liga 21,67%Fe – 43,33%Cu – 35%Nb.

Verificou-se para a liga com 35%Nb a distribuição de forma heterogênea dos elementos Fe, Cu e Nb, formando partículas bem distintas entre si e, não foi observável difusão alguma entre os elementos para posterior formação de solução sólida.

Pela Figura 9, a análise por EDS ao longo de uma linha apresenta a variação de intensidade de emissão característica de raios X para a liga metálica com 45%Nb, sendo observada grande diferença na contagem dos elementos, comprovando a presença das partículas de forma heterogênea e a insolubilidade dos elementos nesta liga.

A distribuição heterogênea dos elementos pode ser notada na liga com 45%Nb, a qual mostra a interação entre os elementos, revelando os locais ao longo da linha em que houve a formação de regiões ricas em Fe, Cu e Nb.

Observa-se que para a faixa de Nb de 17 a 18 μm , o pico é de menor intensidade e há uma queda da intensidade referente ao Fe e ausência de Cu. O local corresponde a uma pequena partícula de Nb que ficou preso na partícula de Fe durante a preparação metalográfica, impedindo a união das partículas de Fe para a formação de uma única partícula, gerando uma fenda ao longo desta como se fosse uma interface bem pronunciada.

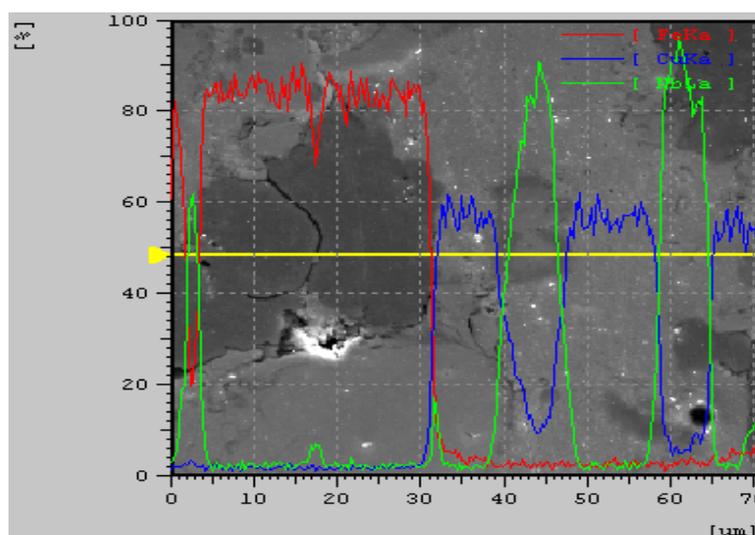


Figura 9 – Região analisada com aumento de 1000x (SE) obtida por MEV com a sobreposição das intensidades de emissão característica de raios X ao longo da linha para a liga 18,34%Fe – 36,66%Cu – 45%Nb.

No intervalo do pico relativo ao Nb de 32 a 33 μm , a contagem do elemento é mais baixa em relação aos demais picos e coincide com a área determinada para o pico de contagem mais intenso de Cu (32 e 44 μm). Provavelmente nesta região deve ter ocorrido uma leve difusão pela interface das partículas de Cu para a partícula de Nb, uma vez que o Nb é imiscível no Cu. O mesmo pode ser observado para a partícula de Nb na faixa de 38 a 48 μm , em que sua interface é de contraste bem distinta, e os picos relativos ao Cu não são muito bem definidos para aquele espaço relativo ao contorno.

Acima de 67 μm , para o Fe, percebe-se um leve aumento no pico da intensidade acompanhada pelo aumento da contagem de Nb e posteriormente de Cu. Pode ser que há uma interação entre os elementos Fe, Cu e Nb formando uma possível solução sólida.

Conclui-se que para cada região de partículas de Fe, Cu e Nb não foram observados nenhuma grande diferença na contagem dos elementos, comprovando a distribuição homogênea do elemento em sua respectiva partícula. Também se pode dizer que há uma pequena interação entre os elementos Fe, Cu e Nb.

A Figura 10 mostra a microestrutura referente à liga metálica 18,34%Fe – 36,66%Cu – 45%Nb da obtida por MEV em elétrons SE com o aumento de 200x e o mapeamento por emissão característica de raios X dos elementos Fe, Cu e Nb desta liga, as quais comprovam a presença dos elementos Nb (em maior quantidade) Cu e Fe, havendo a dispersão dos elementos e comprovando a distribuição heterogênea dos elementos na liga.

Pela sobreposição dos elementos mapeados, não foi possível identificar regiões onde estariam presentes soluções sólidas, detectadas pelas análises de raios X, uma vez que as quantidades formadas são muito pequenas para serem observadas por este método.

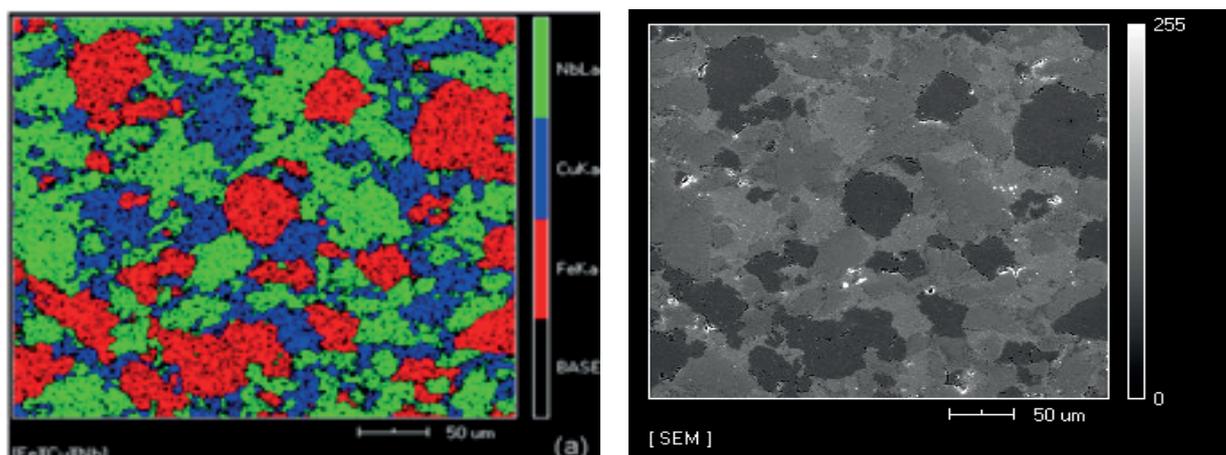


Figura 10 – Região analisada e o mapeamento por emissão característica de raios X da liga dos elementos Fe, Cu e Nb da liga 18,34%Fe – 36,66%Cu – 45%Nb.

Para a liga com 45%Nb foi verificado a distribuição de forma heterogênea dos elementos Fe, Cu e Nb, formando partículas bem distintas entre si e, foi observável uma pequena interação entre os elementos Cu e Nb durante a microanálise em linha.

Como mostram os resultados da análise pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), a distribuição dos elementos Fe, Cu e Nb nas ligas Fe-Cu-Nb é uniforme, com a presença de partículas ricas em elementos, comprovando a distribuição heterogênea dos elementos na liga. Isso mais uma vez confirma a difícil interação entre estes elementos para a formação de novas fases sólidas.

A Tabela 1 mostra resumidamente a densidade relativa (ρ_r), porosidade (P) e

dureza Vickers (HV5) para cada matriz metálica.

Em relação às amostras, a liga com 15 e 25%Nb apresentaram resultados bons para a densidade relativa, atingindo um valor de 96,68 e 90,65%, respectivamente. Todas as amostras apresentaram uma densidade relativa satisfatória, sendo a menor para a liga com 35 e 45%Nb devido a maior presença de poros em sua estrutura. O que pode ser confirmado pelos valores de porosidade.

Matrizes Metálicas	ρ_r (%)	P (%)	HV5 (kgf/mm²)
28,34%Fe - 56,66%Cu - 15%Nb	96,68	3,32	98,46
25%Fe - 50%Cu - 25%Nb	90,65	9,35	99,38
21,67%Fe - 43,33%Cu - 35%Nb	86,83	13,17	92,20
18,34%Fe - 36,66%Cu - 45%Nb	86,72	13,28	98,95

Tabela 1 – Propriedades físicas e dureza HV5 das matrizes metálicas pesquisadas.

O valor inferior das ligas com 45 e 35%Nb, referente à densidade relativa, indica a ocorrência da porosidade durante a sinterização, como pode ser visto em maiores detalhes no MEV. Esta relação entre poros e densificação pode ser explicada pelo fato de que o principal mecanismo de transporte de massa para a densificação são basicamente limitados pela fase rica em Cu. As quantidades presentes de partículas sólidas induzem uma alta deformação que agem aumentando a força motriz para a densificação (DEL VILLAR *et al.*, 2001). Caso que não foi bem-sucedido para estas duas ligas.

Em relação à dureza HV5, pode-se verificar que a liga com 35%Nb apresentou o pior resultado (92,20 kgf/mm²) quando comparada às demais. Isto se deve a grande presença de poros em sua estrutura.

Uma possível explicação para a variação dos valores de dureza das matrizes metálicas é devido à formação de soluções sólidas de Fe-Nb. A liga com 15%Nb apresenta em sua estrutura uma pequena participação de solução sólida Fe_aNb_b, devido à baixa porcentagem de Nb na composição da matriz metálica e imiscibilidade do mesmo no Fe. Ao aumentar para 25%Nb, a quantidade de solução sólida aumenta, uma vez que com o acréscimo de Nb a rede cristalina fica saturada com átomos de Fe, sofrendo transformações de fases gerando mais soluções sólidas.

A partir de 35%Nb, ocorre um decréscimo no valor da dureza, o que pode estar relacionado à baixa densidade devido à presença de porosidade, e no caso de 45%Nb, a quantidade de poros diminui e aumenta as soluções sólidas de Fe-Nb e CuFe.

4 | CONCLUSÕES

5. As matrizes metálicas Fe–Cu–Nb apresentaram estruturas similares, com partículas da fase rica em ferro, Fe(α), partículas da fase Nb embebidos na fase dúctil Cu.
6. À medida que aumenta a quantidade de Nb na matriz metálica, a quantidade de Fe e Cu diminuem, favorecendo a formação das fases secundárias, como FeNb, Fe₂Nb, Fe_aNb_b e Fe₇Nb₆.
7. A distribuição dos elementos metálicos Fe, Cu e Nb nas matrizes são heterogêneos, indicando difícil interação entre estes elementos para a formação de novas fases sólidas.
8. Foi observada a presença de poros esféricos indicando o estágio final e efetividade da sinterização das matrizes metálicas.
9. Os valores de densidade relativa são proporcionais à porosidade e estas influenciam diretamente na dureza do material, fazendo com que a matriz com 15 e 25%Nb apresentassem os melhores resultados.

AGRADECIMENTOS

UFOP/REDEMAT, CAPES e CNPq.

REFERÊNCIAS

- DEL VILLAR, M.; MURO, P.; SÁNCHEZ, J.M.; ITURRIZA, I.; CASTRO, F. Consolidation of diamond tools using Cu-Co-Fe based alloys as metallic binders. **Powder Metallurgy**. v.44, n 1, p. 82-90, 2001.
- LIN, D.; ROBINSON, M.B.; RATHZ, T.J.; WILLIAMS, G. Liquidus Temperatures and Solidification Behavior in the Copper-Niobium System. **Acta Materialia**, v.46, n.11, p. 3849-3855. 1998.
- LI, C.; LIU, J.B.; YANG, G.W.; LIU, B.X. Formation of a face-centered-cubic metastable phase in the Fe–Nb system by solid-state reaction. **Journal of Alloys and Compounds**, 283, p. 225–230. 1999.
- OLIVEIRA, H.C.P. **Influência de Adições de Nióbio no Sistema Ferro-Cobre para Atuar como Matriz Ligante em Ferramentas Diamantadas**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense. UENF, 2010. 232 p. CDD: 671.37.
- OLIVEIRA, L.J.; BOBROVNITCHII, G.S.; FILGUEIRA, M. Processing and Characterization of Impregnated Diamond Cutting Tools Using a Ferrous Metal Matrix. **International Journal Refractory Metals and Hard Materials**. v.25, p. 328-335, 2007.
- 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. v. 14, n. 1, p. 64-68. 2007.
- SHIBUTA, D.; *et al.* Mitsubishi Metal Corporation. **Recovery of Diamond from Diamond Tool Scrap**. Japanese Patent. 1983.
- TANDON, R.; JOHNSON, J. **Powder Metal Technologies and Applications**. 7. ed. 1998, 565 p.

UPHADHYAYA, G. S. **Sintering fundamentals**. 2. ed. Laubisrutirst, Suíça. Trans Tech Publications, 2009, 145 p.

SOBRE A ORGANIZADORA:

Marcia Regina Werner Schneider Abdala: Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Graduada em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui experiência na área de Educação a mais de 06 anos, atuando na área de gestão acadêmica como coordenadora de curso de Engenharia e Tecnologia. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se a atuação como professora de ensino superior atuando em várias áreas de graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Atuou como inspetora de Aviação Civil, nas áreas de infraestrutura aeroportuária e segurança operacional em uma instituição federal.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-63-5

