

# **Aquisição e Análise de Dados de Medidas de Condutividade Elétrica e de Microestrutura do Compósito Cu-Cr-Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> após Sinterização por Processamento de Metalurgia do Pó**

**Daniela Passarelo Moura da Fonseca**

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Rua Itambé, 45 – Prédio 06 – Higienópolis

01239-902 - São Paulo - Brasil

danipassarelo@hotmail.com

## **Resumo**

O cobre destaca-se como material condutor devido à alta condutividade térmica e elétrica, boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão, dentre outras. O objetivo foi a produção por metalurgia do pó de ligas de cobre-cromo-prata com alumina, formando um compósito, mantendo boas propriedades mecânicas (dureza) e boas propriedades elétricas (condutividade elétrica).

## **Abstract**

Copper stands out as conductive material due to high thermal and electrical conductivity, good mechanical properties, corrosion resistance, among others. The objective was the production by powder metallurgy of copper-chrome-silver with alumina, forming a composite while maintaining good mechanical properties (hardness) and good electrical properties (electrical conductivity).

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização dos materiais da Natureza a favor do ser humano está presente em seu cotidiano há muito tempo. Com a Ciência dos Materiais, estudo das “relações que existem entre as estruturas e as propriedades dos materiais” [1], foi possível grandes avanços tecnológicos, pois esta Ciência possibilita a compreensão e consequente aplicação, manipulação e criação de materiais.

O cobre e suas ligas têm sido os materiais condutores mais utilizados em função da alta condutividade térmica e elétrica, boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão, fácil conexão, disponibilidade rápida e também pelo alto valor de sucata. São extensivamente usados em muitas aplicações comerciais, tais como condutores eletrônicos de alto desempenho, lâminas de contato para relês, condutores de corrente, lâminas e elementos de termostatos. Também apresentam simultaneamente alta condutividade elétrica e alta resistência mecânica, indispensáveis em muitas aplicações, tais como os condutores elétricos, conectores, condutores de calor, e botões de contatos [2], [3], [4].

O objetivo do trabalho foi a caracterização mecânica, elétrica e microestrutural de ligas cobre-cromo-alumina submetidas ao processamento por metalurgia do pó seguido de tratamentos térmicos, via medidas de condutividade elétrica obtida em um miliohmímetro de alta sensibilidade, observações microestruturais por microscopia óptica e ensaios mecânicos (dureza). Com o intuito de melhorar o entendimento relativo à resistência mecânica e condutividade elétrica das ligas ternárias à base de cobre com adição de material cerâmico, um novo processamento, utilizando a metalurgia do pó (compactação, sinterização) e adequados tratamentos térmicos, foi feito para obtenção

de novas “ligas” Cu - X%Cr - Y%Ag- X%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% em peso). Dessas amostras foram obtidos dados de resistência e de microscopia óptica.

## 2 MATERIAIS METÁLICOS

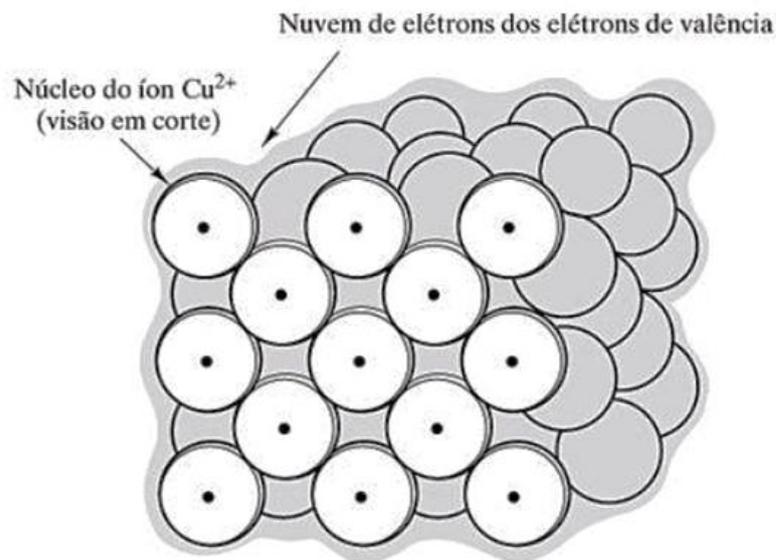
Os materiais sólidos, baseados na composição química e na estrutura atômica, são classificados em cinco categorias: metais, cerâmicas, polímeros, semicondutores e materiais compósitos. A combinação de metais, denominada liga, permite melhorar uma propriedade específica desejada ou obter melhor combinação de propriedades. Os elementos destacados no quadro 2 são a base das diversas ligas, “incluindo os ferros e aços (de Fe), as ligas de alumínio (Al), de magnésio (Mg), de titânio (Ti), de níquel (Ni), de zinco (Zn), as de cobre (Cu) e também as de bronze (Cu, Zn)” [6].

Para compreender as propriedades e características observadas nos materiais sólidos, é necessário conhecer sua estrutura, o arranjo geométrico dos átomos, e o tipo de ligação entre eles. “Por exemplo, considere o carbono, que pode existir tanto na forma de grafita quanto de diamante. Enquanto a grafita é relativamente macia e parece ‘como uma graxa’ ao toque, o diamante é o material mais duro que se conhece” [1]. Ambos os materiais são compostos pelo mesmo elemento, o carbono, e essa grande diferença entre eles é atribuída à forma como seus átomos são arranjados entre si e ao tipo de interação interatômica.

A ligação entre átomos é um processo essencialmente eletrônico: “as ligações primárias são formadas quando os elétrons do orbital mais externo são transferidos ou compartilhados entre os átomos” [6]. Nos materiais sólidos são encontrados três tipos

diferentes de ligações primárias: covalente, iônica e metálica. Como o próprio nome sugere, os metais e suas ligas estão sujeitos à ligação metálica.

O que define o tipo de ligação de um material com o outro é a eletronegatividade, que é a capacidade que um átomo tem de atrair elétrons. Os metais têm baixa eletronegatividade, o que faz com que os elétrons tenham a mesma probabilidade de estarem associados a quaisquer elétrons dos átomos adjacentes. Os átomos ficam bem próximos, produzindo uma forte ligação metálica, e os elétrons de valência ficam distribuídos pelos diversos átomos sob a forma de uma nuvem de elétrons, como pode ser observado na figura 1.



**Figura 1.** Ligação metálica consistindo em uma nuvem de elétrons <sup>[6]</sup>

Devido à nuvem eletrônica, os elétrons conseguem se movimentar com facilidade entre os átomos, o que torna os metais bons condutores térmicos e elétricos. Além disso, têm alta elasticidade (capacidade de deformar pela ação de forças externas e de retornar à forma original), devido à força de ligação elevada; boa ductilidade (capacidade de

deformar sem romper), devido aos átomos metálicos poderem escorregar uns sobre os outros; ponto de fusão relativamente alto e bons refletores de radiação visível.

## 2.1 ESTRUTURA DE SÓLIDOS CRISTALINOS

Além do tipo de ligação, o arranjo dos átomos em um material também é muito importante para determinar suas propriedades. Ao estudar a estrutura cristalina, o átomo é tomado como esferas sólidas de diâmetros bem definidos. Além disso, considera-se apenas a unidade estrutural mais simples do cristal, que é conhecida como célula unitária, e sua principal característica é fornecer a descrição completa da estrutura do cristal como um todo, “pois a estrutura completa pode ser gerada pelo empilhamento repetitivo de células unitárias adjacente, face a face, por todo o espaço tridimensional”<sup>[6]</sup>. Todas as estruturas possíveis se reduzem a um pequeno número de geometrias básicas de célula unitária, existem sete formas elementares. “Essas redes são esqueletos sobre os quais as estruturas cristalinas são montadas, colocando átomos ou grupos de átomos nos pontos da rede ou perto deles”<sup>[6]</sup>. A maioria dos metais elementares, em temperatura ambiente, é encontrada na estrutura cúbica de corpo centrado (Cr, Fe  $\alpha$ , Mo, Ta, W), cúbica de face centrada (Al, Cu, Au, Pb, Ni, Ag) e hexagonal compacta (Cd, Co, Zn).

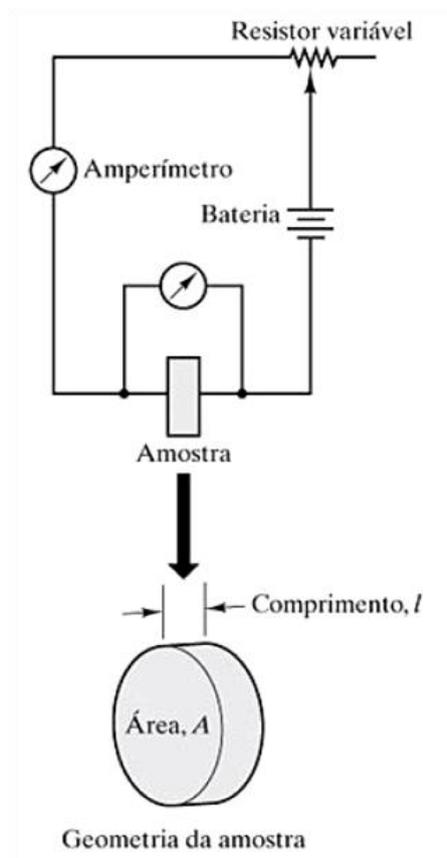
## 2.2 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A condução elétrica é o resultado do movimento de elétrons dentro do material, a facilidade (condutividade) ou dificuldade (resistividade) de condução em um material

pode ser entendida levando em consideração os níveis de energia. Nos materiais a condução de eletricidade ocorre pelo elétron, portador de carga negativa.

Para se determinar a condutividade elétrica de um material utiliza-se a lei de Ohm, que relaciona a diferença de potencial elétrico ( $V$ ) e a corrente elétrica ( $I$ ), à resistência elétrica ( $R$ ) do material, conforme equação (1) e figura 2.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$



**Figura 2.** Esquema de um circuito para medir condutividade elétrica <sup>[6]</sup>

A geometria da amostra do material influencia diretamente na medida de resistência elétrica ( $R$ ) aumenta com o comprimento ( $l$ ) e diminui com a área de seção

transversal ( $A$ ). Relacionando essas grandezas é possível determinar a resistividade ( $\rho$ ) de um material, que é a capacidade de resistência elétrica, conforme equação (2) <sup>[6]</sup>.

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (2)$$

Uma vez definida a resistividade elétrica, é fácil entender sua grandeza recíproca, a condutividade ( $\sigma$ ), conforme equação (3).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

### **3 LIGAS TERNÁRIAS À BASE DE COBRE**

O cobre com alta pureza tem excelentes propriedades mecânicas e elétricas além de apresentar diferentes aplicações na sociedade moderna com finalidades elétricas, condutividade térmica, resistência à corrosão, boa deformabilidade e resistência à fadiga. Apresenta expressiva condutividade elétrica,  $0,593 (\mu\Omega.cm)^{-1}$ , o que demonstra também sua aplicação em condutores elétricos <sup>[2], [4], [6], [7]</sup>.

Com exceção da prata, o cobre de alta pureza tem a condutividade mais elevada do que qualquer outro metal. A condutividade relativa a 20° C de outros metais, comparada com a do cobre (100% IACS) é: prata, 106; alumínio, 61; níquel, 25; ferro, 17; platina, 16; estanho, 15; chumbo, 8. A resistividade de um cobre de pureza padrão foi estabelecida em 1913 pela Comissão de Eletrotécnica Internacional com o valor de  $1/58 \Omega$  por metro de comprimento e seção transversal de um milímetro quadrado a 20°

C. Este valor é de  $0,017241 \Omega$  (100%IACS). A resistividade do cobre, como a de todos os metais puros, varia com a temperatura. A condutividade a  $100^\circ \text{C}$  é cerca de 80% da condutividade a  $20^\circ \text{C}$ .

O cobre ao cromo é uma das poucas ligas de cobre que pode ser tratada a quente e, como resultado disso, pode ser usado a temperaturas até  $400^\circ \text{C}$ . Assim, a resistência à tração e condutividade elétrica de material tratado a quente em solução são tipicamente 230 MPa e 45% IACS, enquanto com endurecimento de precipitação, os valores são de 450MPa e 80% IACS.

O compósito Cu-Cr-Ag-Alumina é um possível material utilizado para as aplicações acima referidas. Em geral, a liga metálica ternária aliada a material cerâmico pertence à família das ligas de cobre com endurecimento por solução sólida ou por precipitação, visando à melhoria da resistência mecânica final e são conhecidas por sua excelente combinação de resistência mecânica e condutividade elétrica. Esta boa resistência mecânica resultante nestes materiais, obtidos após processamento adequado é devido, em grande parte, ao acréscimo de fases intermetálicas de cobre e elementos de liga presentes advindas da solução sólida supersaturada, além da subestrutura de discordâncias e textura formadas após os referidos tratamentos.

Nesta linha de desenvolvimento de ligas metálicas à base de cobre, três séries já foram estudadas CuNiBe, CuNiSn, CuNiPt; observou-se a manutenção das propriedades mecânicas e elétricas das mesmas com a obtenção das referidas ligas que apresentaram boa combinação de propriedades, tais como resistência mecânica e elasticidade juntamente com boa conformabilidade, verificou-se por meio de estudos de resistividade elétrica que se mantêm as propriedades elétricas quando comparadas com ligas comerciais tradicionalmente utilizadas para finalidades eletroeletrônicas <sup>[8]</sup>.

#### 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho obtiveram-se amostras de  $\text{Cu-X\%Cr-Y\%Al}_2\text{O}_3$ , figura 3, obtidos em escala de laboratório, onde Y e X assumiram valores condizentes para a manutenção das propriedades elétricas e mecânicas por metalurgia do pó até obter-se materiais utilizados para a produção de conectores elétricos de alto desempenho.



**Figura 3.** Exemplo de amostra de composto à base de cobre

Foram produzidos compostos de matriz metálica e reforço de cerâmica (MMC) (amostras cilíndricas com diâmetro  $\phi = 25\text{mm}$  e altura  $3,5\text{mm} \geq h \geq 5,0\text{mm}$ , massa  $m = 6,5\text{g}$ ), com as composições químicas especificadas na tabela 1.

**TABELA 1**

Relação de amostras à base de cobre

Amostra	Composição (% peso)
A	85% Cu – 15% $\text{Al}_2\text{O}_3$
B	90% Cu – 5% Cr – 2% Ag – 3% $\text{Al}_2\text{O}_3$
C	90% Cu – 5% Cr – 5% $\text{Al}_2\text{O}_3$
D	90% Cu – 7% Cr – 3% $\text{Al}_2\text{O}_3$
E	85% Cu – 5% Cr – 5% Ag – 5% $\text{Al}_2\text{O}_3$
F	90% Cu – 5% Cr – 3% Ag – 2% $\text{Al}_2\text{O}_3$
G	90% Cu – 3% Cr – 7% $\text{Al}_2\text{O}_3$

Resultados preliminares com relação às propriedades mecânicas destas ligas, sugerem que elas estão condizentes para utilização como materiais para contato elétrico. Este produto final poderá ter fases intermetálicas ou nanocompósitos em uma solução sólida supersaturada de ligas binárias ou ternárias a base de cobre. As técnicas utilizadas para as identificações necessárias envolvem preliminarmente microscopia óptica, ensaios de microdureza e de condutividade elétrica.

#### 4.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Quando se trata de medidas elétricas, a condutividade é a grandeza mais adequada a ser trabalhada, pois a classificação dos materiais metálicos como condutores, isolantes ou semicondutores de eletricidade, é baseada nos valores de condutividade de cada material. As amostras foram lixadas, a fim de eliminar a oxidação, e colocadas no miliohmímetro Agilent-4338B, figura 11, para obtenção de dados de resistência elétrica (em  $m\Omega$ ) e, a fim de conseguir melhores resultados de medidas de resistência elétrica, no contato dos conectores com cada amostra, utilizou-se o método das quatro pontas, que também pode ser visto na figura 3.



**Figura 3:** Miliohmímetro Agilent-4338B.

Estas medidas de resistência elétrica e os valores de altura de cada amostra foram trabalhados, conforme expressões 7, 8 e 9, de forma a extrair informações a respeito da condutividade das amostras <sup>[9]</sup>.

$$\rho = Rh \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{1,72}{\rho} \quad (8)$$

$$\sigma_{IACS} = \frac{\sigma}{5,78} 10^{-5} \quad (9)$$

Os resultados obtidos indicaram valores condizentes às ligas de cobre após sinterização. A tabela 6 apresenta os resultados experimentais obtidos, medidas de resistividade ( $\rho$ ), condutividade ( $\sigma$ ) e condutividade na norma IACS ( $\sigma_{IACS}$ ).

**TABELA 2**

Resultados experimentais das amostras, condutividade elétrica

Compósitos (% peso)	Resistividade $\rho$ ( $10^{-8} \Omega m$ )	Condutividade $\sigma$ ( $10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$ )	Condutividade $\sigma_{IACS}$ (% IACS)
85% Cu – 15% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,56	3,09	53,5
90% Cu – 5% Cr – 2% Ag – 3% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,65	3,04	52,6
90% Cu – 5% Cr – 5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,23	2,76	47,8
90% Cu – 7% Cr – 3% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,77	2,54	44,0
85% Cu – 5% Cr – 5% Ag – 5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,90	2,49	43,1
90% Cu – 5% Cr – 3% Ag – 2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,04	2,44	42,2
90% Cu – 3% Cr – 7% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,38	1,83	31,7

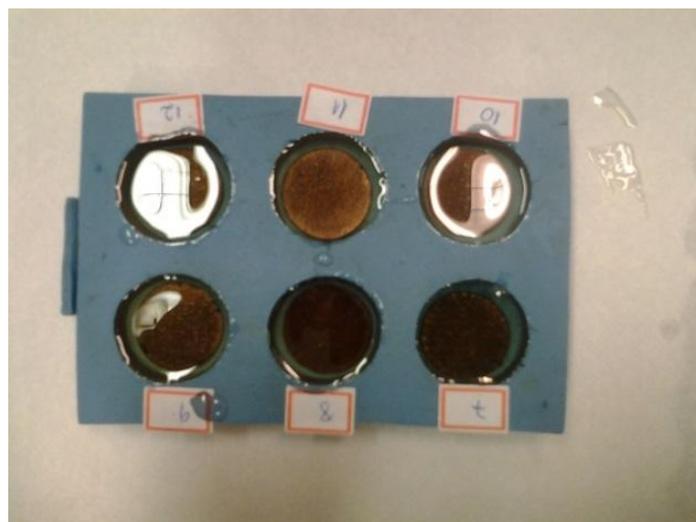
Pode-se notar que o aumento percentual dos elementos de liga causa uma diminuição da condutividade elétrica e que as medidas das amostras do compósito

85%Cu-15%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> registrou maior condutividade elétrica em relação às demais composições químicas estudadas.

#### 4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

Para análise da microestrutura é necessária a preparação das amostras, através de processos de metalografia (lixamento, polimento, ataque químico).

Para a análise microscópica deste trabalho, foi realizado, primeiramente, o embutimento a frio das amostras, que otimizou os processos de lixamento e polimento. Para isso, as amostras foram colocadas em molde de silicone, preenchido de resina de cura lenta com endurecedor específico, conforme mostrado na figura 4. Com o auxílio da Lixadeira Manual Metalográfica, figura 5, as amostras foram lixadas alternando seu sentido a cada troca de lixa de forma a eliminar todos os riscos, conforme mostrado na figura 6. Na figura 7 pode-se observar todas as amostras após o lixamento metalográfico.



**Figura 4.** Embutimento a frio das amostras



**Figura 5.** Lixadeira Manual Metalográfica utilizada no processo de lixamento



**Figura 6.** Amostra de um dos compósitos a base de cobre sendo lixada



**Figura 7.** Amostras de compósitos a base de cobre após o processo de lixamento metalográfico

Além deste processo, efetuou-se o polimento das amostras, utilizando-se a Politriz Automática DP-10 (STRUERS - PANAMBRA), figura 8, e pasta para polimento à base de alumina e água como lubrificante, figura 9. As amostras embutidas eram pressionadas contra a politriz e transladadas no sentido contrário ao de rotação do disco.

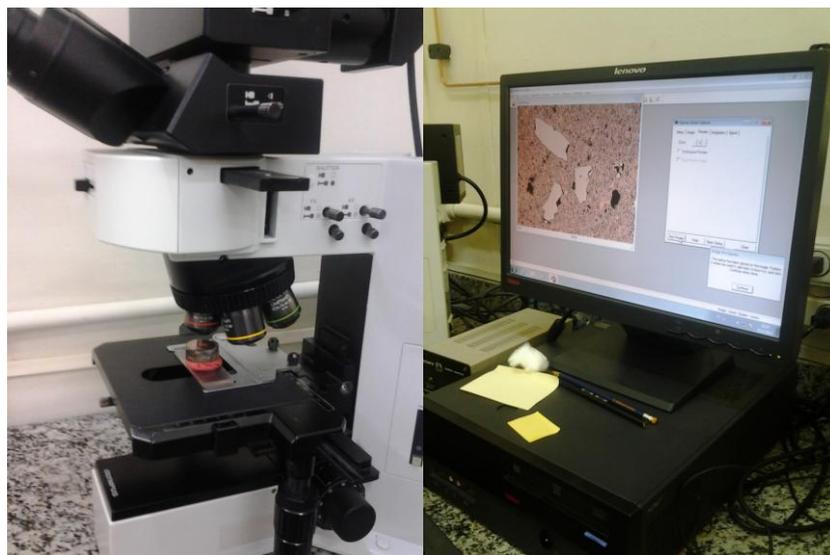


**Figura 8.** Politriz Automática utilizada para o polimento final das amostras



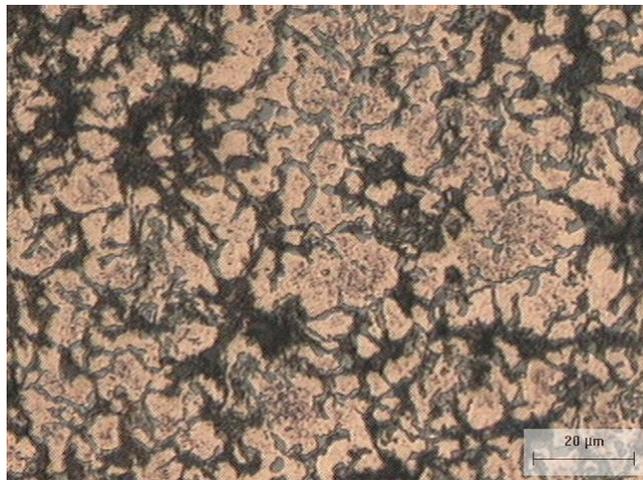
**Figura 9.** Pasta para polimento metalográfico à base de alumina e água como lubrificante

Após estes dois processos metalográficos, as amostras foram levadas ao microscópio óptico, figura 10, onde foram obtidas as micrografias ópticas (microestrutura).

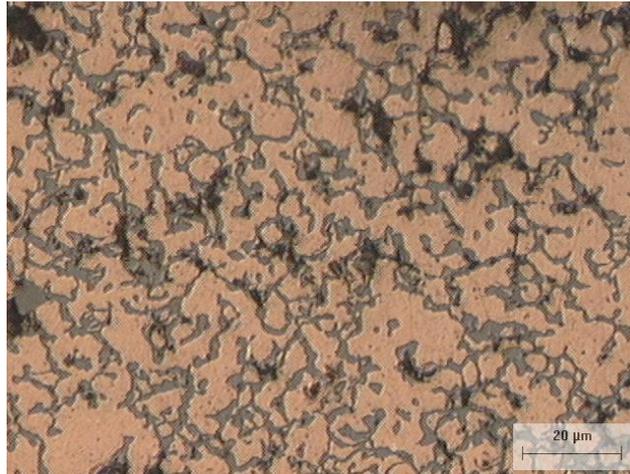


**Figura 10.** Microscópio óptico com sistema digitalizador de registro de imagens, utilizado para observação microestrutural

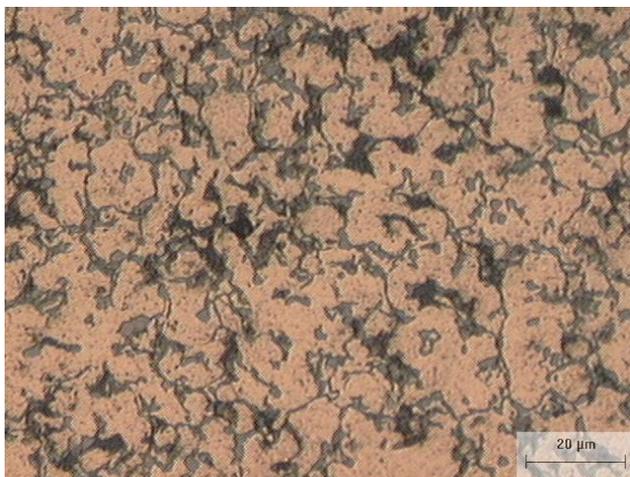
As características estruturais presentes em um material, por exemplo, tamanho de grãos, inclusões, impurezas, segunda fases, porosidade, segregação ou efeitos superficiais, são funções da composição e forma do material de partida, e de tratamentos térmicos. A análise microestrutural é usada para obter informações de como o material foi produzido e a qualidade do material resultante. A seguir são apresentadas micrografias ópticas das principais amostras analisadas; figura 1, figura 2, figura 3, figura 4, figura 5, figura 6 e figura 7.



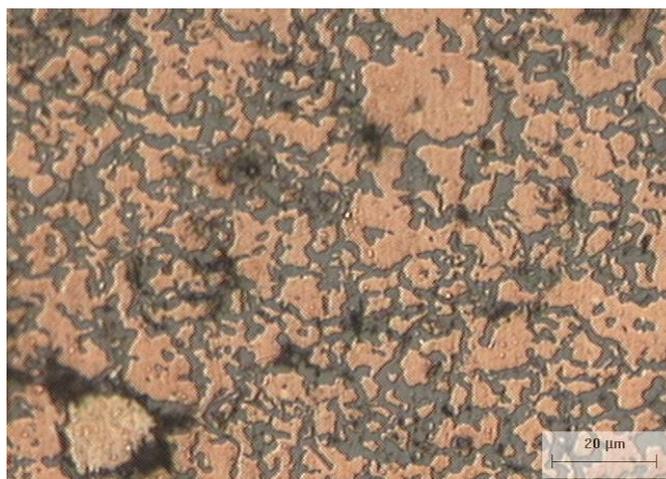
**Figura 11.** Micrografia óptica de amostra do compósito 85% Cu – 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> compactada a frio e sinterizada (923K por 21.600s). Observa-se coalescimento das partículas de cobre bem como presença de porosidade além de certa aglomeração de partículas mais finas de alumina



**Figura 12.** Micrografia óptica de amostra do composto 90% Cu – 5% Cr – 2% Ag – 3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  compactada a frio e sinterizada (923K por 21.600s). Observa-se coalescimento das partículas de cobre, menor presença de porosidade e aglomeração das partículas mais finas de alumina



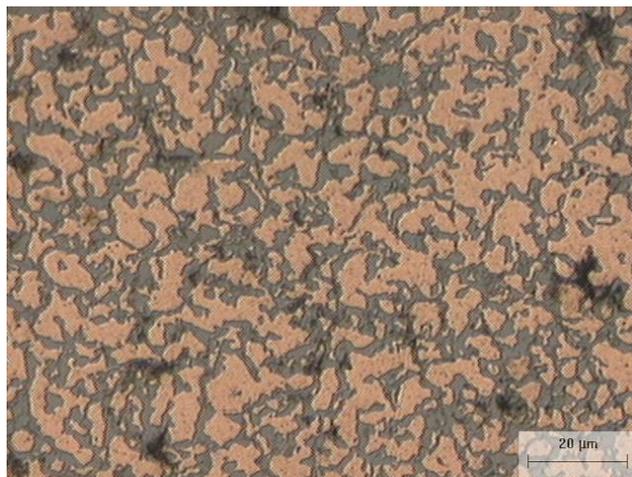
**Figura 13.** Micrografia óptica de amostra do composto 90% Cu – 5% Cr – 5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  compactada a frio e sinterizada (923K por 21.600s). Observa-se coalescimento mais intenso das partículas de cobre, porosidade relativa, pequena aglomeração de partículas mais finas de alumina bem como formação de terceira fase a ser identificada por microanálise



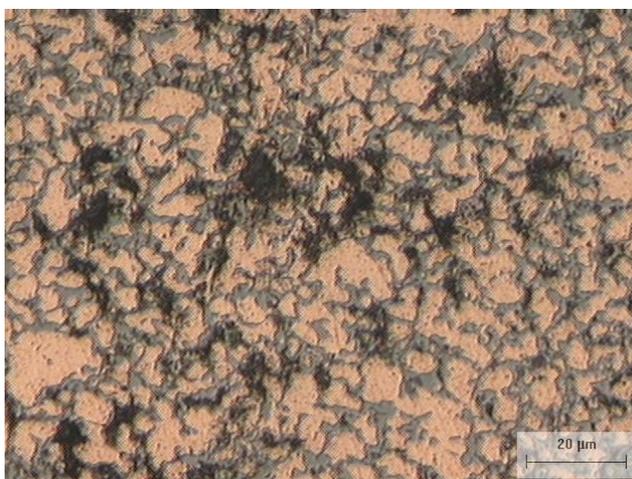
**Figura 14.** Micrografia óptica de amostra do composto 90% Cu – 7% Cr – 3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> compactada a frio e sinterizada (923K por 21600s). Observa-se coalescimento das partículas de cobre, alguma porosidade e de aglomeração de partículas mais finas de alumina bem como formação significativa de terceira fase a ser identificada por microanálise



**Figura 15.** Micrografia óptica de amostra do composto 85% Cu – 5% Cr – 5% Ag – 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> compactada a frio e sinterizada (923K por 21.600s). Observa-se coalescimento mais intenso das partículas de cobre, porosidade relativa, pequena aglomeração de partículas mais finas de alumina bem como formação de terceira fase a ser identificada por microanálise



**Figura 16.** Micrografia óptica de amostra do compósito 90% Cu – 5% Cr – 3% Ag – 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  compactada a frio e sinterizada (923K por 21600s). Observa-se coalescimento das partículas de cobre, alguma porosidade e de aglomeração de partículas mais finas de alumina bem como formação significativa de terceira fase a ser identificada por microanálise



**Figura 17.** Micrografia óptica de amostra do compósito 90% Cu – 3% Cr – 7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  compactada a frio e sinterizada (923K por 21600s). Observa-se coalescimento das partículas de cobre, maior porosidade presente e de aglomeração de partículas mais finas de alumina bem como formação significativa de terceira fase a ser identificada por microanálise

## 5 CONCLUSÃO

As medidas de condutividade elétrica e análise das microestruturas realizadas por microscopia óptica sugerem que estes compósitos estão condizentes para a aplicação como material para contato elétrico utilizado em dispositivos eletroeletrônicos como, por exemplo, micro-onda de elevada potência. As observações microestruturais indicam presença de porosidade no interior da estrutura e homogeneidade parcial, devido a não dissolução adequada dos elementos participantes da liga metálica, com a necessidade de realizar posteriores tratamentos térmicos especiais, a fim de obter melhores propriedades elétricas. O refinamento indica um leve efeito na microestrutura das amostras obtidas por metalurgia do pó, possivelmente devido a processamento térmico e mecânico ainda não completamente adequado.

Embora estivesse previsto o ensaio de microdureza, de forma fornecer dados sobre as propriedades mecânicas dos compósitos e complementar as informações sobre a análise e caracterização das amostras, ele não pode ser realizado devido ao equipamento de microdureza Vickers estar em manutenção durante a realização do trabalho. No entanto, as etapas realizadas no processamento por metalurgia do pó nos compósitos indicam valores adequados de resistência mecânica (450 MPa) e, como foi observado, de condutividade elétrica no intervalo  $0,216 \leq \sigma \leq 0,309 (\mu\Omega\text{cm})^{-1}$  (35 a 45% IACS).

O melhor incentivo com relação a esta aplicação tecnológica é a possibilidade de pesquisar e produzir estruturas finas e homogêneas, habilidade para obter produtos com formatos de dimensões complicadas e especiais, com estreita tolerância dimensional, e a capacidade de produzir peças de acabamento superior.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CALLISTER, William D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2011.
2. CRANE, J.; WINTER, J. *Copper. Properties and alloying, Encyclopedia of Materials Science and Engineering*. Volume 2, Ed. MB Bewer, Pergamon Press and the MIT Press 1986, p. 848-855.
3. TAUBENBLAT, PW. *Copper Selection of high conductivity alloys*. Encyclopedia
4. ASM SPECIALTY HANDBOOK, *Copper and Copper Alloys, Metal*. Chapter 1, section 1, ASM International, 2001.
5. SHACKELFORD, James F. *Ciência dos materiais*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
6. BUTTS, A. *Copper, the Science and Technology of the Metal, its Alloys and Compounds*. Ed. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1954, 3th printing 1960.
7. GOMES, M. R.; BRESCIANI FILHO, E. *Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos*. São Paulo, 1987, capítulo 3.
8. MONTEIRO, W. A.; CARRIÓ, J. A. G.; DA SILVEIRA, C. R.; VITOR, E.; BUSO, S. J. Structural and electrical properties of copper-nickel-aluminum alloys obtained by conventional *powder metallurgy method*. In: MATERIALS SCIENCE FORUM, 2010.
9. OKAZAKI, Anderson Kenji. *Síntese e caracterização microestrutural de cermetos a base de cobre, níquel, prata e nanopartículas de ítria estudo das propriedades elétricas e mecânicas*. 2012. Trabalho de Graduação Interdisciplinar (Graduação em Física) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2012.