

CINZAS DE CARVÃO MINERAL APLICADAS COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE COBRE PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ*

Diego Pacheco Wermuth¹
Vinicius Martins²
Magnos Marinho da Silva³
André Carvalho Tavares⁴
Paula Rodrigues Caumo⁵
Lirio Schaeffer⁶

Resumo

O presente trabalho apresenta os resultados do estudo e aproveitamento de cinzas leves da queima de carvão mineral em termelétrica, como reforço para o Compósito de Matriz Metálica de cobre. Foram estudados diferentes percentuais de cinzas leves como reforço para o cobre, sendo misturados estes pós através de misturador “duplo v”, compactando os pós em diferentes pressões e sinterizando os corpos de prova obtidos pela compactação. A amostra sinterizada que apresentou a maior dureza entre todos os corpos de prova sinterizados, atingindo 89 HV, foi utilizada como base para a formulação e obtenção de novos corpos de prova, que foram estudados sob condições de moagem dos pós por moinho de bolas e moagem de alta energia. A fabricação do compósito seguiu os padrões industriais do processo de Metalurgia do Pó, como a mistura e moagem dos pós, compactação dos pós e sinterização em atmosfera controlada. Foi realizado o estudo das propriedades mecânicas do compósito formado por cobre e cinzas leves, que comprovou o aumento da dureza para 122 HV. Este trabalho proporciona uma nova aplicação para as cinzas leves, utilizando estes resíduos de usinas termoeletricas como matéria prima para reforço mecânico na composição de peças à base de cobre na indústria metalúrgica.

Palavras-chave: Cobre; Cinzas leves; Compósito-Metal-Matriz; Metalurgia do pó.

FLY ASH REINFORCEMENT APPLIED IN COPPER METAL MATRIX COMPOSITE PRODUCED BY POWDER METALLURGY

Abstract

This paper presents the results of the study and utilization of fly ash from coal-fired thermal power plant, as reinforcement for copper Metal Matrix Composite. Different percentages of fly ash were studied as reinforcement for copper, these powders are mixed by "double v" mixer, compacting powders into different pressures and sintering the specimens obtained by compression. The sintered sample with the highest hardness of all the sintered specimens reaching 89 HV, was used as a basis for the formulation and obtain new specimens, which were studied under milling conditions of the powders by ball milling and mechanical alloying. The manufacture of the composite was realized like the industrial standards of Powder Metallurgy process such as milling and mixing of powders, compression of powders and sintering in a controlled atmosphere. It conducted the study of mechanical properties of the composite formed by copper and fly ash, which has proven to increase the hardness 122 HV. This study provides a new application for fly ash using these waste as raw material for mechanical reinforcement in the composition of copper-based parts in the metallurgical industry.

Keywords: Copper; Fly ash; Metal-Matrix-Composite; Powder metallurgy.

¹ *Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. diego.wermuth@ufrgs.br*

² *Professor do Instituto Federal Sul rio-grandense IFSul – Campus Sapucaia do Sul, RS, Brasil. viniushiper@yahoo.com.br*

³ *Mestrando, PPGE3M, LdTM, Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. magnos.marinho@hotmail.com*

⁴ *Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). andre.tavares@ufrgs.br*

⁵ *Graduanda de Eng. Metalúrgica, LdTM, Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. paula-caumo@hotmail.com*

⁶ *Doutor em Conformação Mecânica. Coordenador LdTM, Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. schaeffer@ufrgs.br.*

1 INTRODUÇÃO

As cinzas geradas pela queima do carvão mineral em termelétrica são constituídas de vários óxidos, mas principalmente de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). Devido a existência destes óxidos e sabendo que existem estudos de compósitos de cobre com reforço de alumina para melhorar as propriedades mecânicas, decidiu-se formular e estudar as propriedades físicas de um compósito Cobre-Cinzas leve.

Vários estudos são realizados visando melhorar as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas do cobre. Mesmo tendo resistência mecânica relativamente baixa, se comparado a outros metais, suas ligas são amplamente utilizadas em aplicações tecnológicas que vão desde componentes elétricos em reles convencionais, em absorvedores de elétrons e fótons, em aceleradores síncrotrons e em aplicações estruturais como tubulação para ar condicionado.

Uma das soluções para a utilização do cobre nas aplicações tecnológicas é o seu endurecimento por elementos de liga, porém este processo pode causar uma significativa perda de condutividade elétrica. Outra possibilidade é o endurecimento do cobre pela incorporação de partículas finas, resultando numa diminuição relativamente pequena da condutividade elétrica [1]. Estas partículas finas incorporadas ao cobre podem ser um metal, um composto intermetálico, precipitados de uma solução sólida por um tratamento de envelhecimento, ou ainda por partículas não metálicas, adicionadas ou formadas com a matriz de cobre [2], como por exemplo, alumina (Al_2O_3). Através destas informações decidiu-se utilizar cinzas de carvão na tentativa de alcançar melhorias nas propriedades mecânicas do cobre.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Compósitos de Matriz Metálica

Compósitos avançados com base em matriz metálica tem uma história relativamente recente, mas as oportunidades parecem muito promissoras. Os primeiros (*Metal Matrix Composites*) Compósitos de Matriz Metálica - MMCs foram desenvolvidos na década de 1970 para aplicações de alto desempenho [3].

Os MMCs associam as propriedades de metais (ductilidade e tenacidade) com propriedades de cerâmicas (alta resistência e módulo de elasticidade) propiciando maior capacidade de resistência em compressão e de cisalhamento em elevadas temperaturas de trabalho. O uso extensivo de MMCs na indústria aeroespacial, indústria automotiva e em aplicações estruturais tem aumentado nos últimos 20 anos, devido à disponibilidade de reforços baratos e rentáveis, assim como rotas de processamento que dão origem a propriedades reprodutíveis [4].

O recente reconhecimento que a adição de reforços de cerâmica permitem a manipulação de propriedades físicas e mecânicas dos MMCs levou à utilização cada vez mais generalizada destes materiais em aplicações de materiais para eletrônica com excelente controle térmico. As recentes previsões de mercado sugerem uma aceleração do crescimento do uso de MMC devido ao custo mais baixo, o que sugere um futuro brilhante para esta classe de materiais.

O cobre tem sido extensivamente utilizado como matriz, devido suas propriedades térmicas e condutividade elétrica. No entanto, o cobre puro não têm propriedades mecânicas aceitáveis [5]. A resistência mecânica de cobre pode ser melhorada pelo endurecimento através de envelhecimento ou por dispersão de partículas de reforço.

A incorporação de Al_2O_3 aumenta a temperatura de recristalização e resistência à elevadas temperaturas [6].

Outras propriedades de MMCs que devem ser destacadas são a alta resistência em relação ao peso e alta rigidez por unidade de densidade, tendo maiores resultados de desempenho com redução no peso e na densidade, aumento da resistência à fluência, maior resistência ao desgaste e redução do coeficiente de expansão térmica do compósito em relação ao metal base puro [7, 8, 9].

2.2 Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó é um processo que está com seu mercado em crescimento constante. Dados de 2010 mostram que este processo alcançou 2 bilhões de dólares com a venda de produtos obtidos por metalurgia do pó [10]. A indústria vem abrindo cada vez mais espaço para peças sinterizadas, utilizadas em automóveis, eletrodomésticos, telefones celulares, instrumentos cirúrgicos, armamentos, artigos esportivos, ferramentas entre outros.

A metalurgia do pó consiste, basicamente, na compactação de pós metálicos/cerâmicos em matrizes com a forma do produto desejado. As peças obtidas são encaminhadas para a etapa de sinterização, em fornos, onde as partículas destes pós se unem devido a ação da temperatura. Nesta etapa ocorre uma contração do volume das peças, atingindo as formas e dimensões finais projetadas [11].

Além disto, o processo tem como característica o baixo custo para produção de peças em larga escala e um baixo impacto ambiental quando comparada com as tecnologias concorrentes, pois exige um menor consumo de energia de transformação e possibilita um alto aproveitamento da matéria prima.

A Figura 1, apresenta de maneira simplificada, a rota do processo da metalurgia do pó.

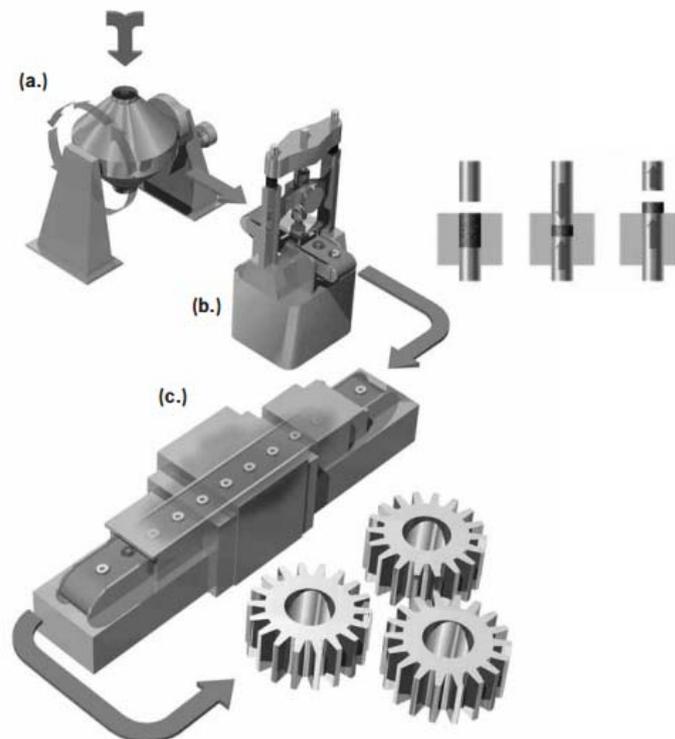


Figura 1. Rota Simplificada da M/P : (a) mistura; (b) compactação; (c) sinterização [12]

A metalurgia do pó utiliza como matéria prima pós-metálicos e não metálicos, tendo suas características influenciadas pelo comportamento dos pós durante o processamento e assim influenciando diretamente nas qualidades finais das peças sinterizadas [13].

2.3 Cinzas de Carvão produzidas em Termoelétricas

Usinas termelétricas convencionais utilizam combustíveis fósseis para geração de energia elétrica, como o carvão, gás natural e óleo diesel e as usinas que estão entre as maiores geradoras de resíduos sólidos no mundo utilizam carvão como combustível.

A Cinza leve, também chamada de cinza volante ou cinza seca é constituída por partículas extremamente finas, com dimensão inferior a 0,15mm. Este material é transportado pelo fluxo dos gases da combustão do carvão mineral em termoelétrica e coletada nos ciclones mecânicos ou precipitadores eletrostáticos ou, ainda, lançada na atmosfera. As cinzas volantes são compostas entre 60 e 90% de material vítreo, sendo geralmente 30 a 60% de SiO₂, 10 a 20% de Al₂O₃, 5 a 10% de Fe₂O₃, 5 a 10% de MgO e 2 a 4% de CaO, entre outros compostos [14].

As cinzas volantes são compostas predominantemente de partículas pequenas, vítreas e ocas, com granulometria de 0,01 a 100 µm [15]. O tamanho das partículas das cinzas é dependente do tipo de sistemas de filtros utilizados na usina termoelétrica [16].

2.4 Cobre

O cobre é um dos metais mais utilizados na atualidade, sendo puro ou através de suas ligas, em diversas aplicações que exijam elevada condutividade térmica e elétrica, combinada com sua resistência a corrosão apreciável. Mesmo tendo resistência mecânica baixa, comparado a outros metais, as ligas de cobre são amplamente utilizadas em aplicações tecnológicas que vão desde componentes elétricos em reles convencionais até absorvedores de elétrons e fótons em aceleradores síncrotrons [17,18].

A maior utilização do cobre na atualidade é para transmissão elétrica e para a indústria de telefonia. Para o aproveitamento máximo de suas propriedades elétricas recomenda-se usá-lo em estado puro. Com necessidade de melhorar as propriedades mecânicas são utilizado ligas formadas com zinco, estanho, chumbo, níquel, etc. [19].

Para a utilização do cobre em aplicações estruturais é necessário que o material possua elevada resistência mecânica, propriedade que é atingida com a união de outros elementos em suas ligas. Porém no caso do cobre, quando este é submetido a processos de união a outros materiais em altas temperaturas, esta propriedade fica ainda mais comprometida devido a recristalização e crescimento de grãos do cobre que ocorrem em temperaturas relativamente baixas, isto é, abaixo da temperatura de fusão das ligas de adição [1].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta pesquisa caracterizou-se na produção de compósitos pela metalurgia do pó convencional, onde utilizou-se diferentes etapas de mistura dos pós, o que gerou

resultados diferentes nas propriedades mecânicas das peças finais nos compósitos MMCs formulados.

3.1 Mistura simples de pós

Inicialmente utilizou-se a mistura simples dos pós de cobre e cinzas leves, em misturados duplo “V”, com diferentes percentuais de cinzas, sendo 20%, 15%, 10% e 5% de cinzas leves na matriz de cobre.

Após a mistura dos pós, compactou-se os pós em corpos de prova que posteriormente foram sinterizados e encaminhados para análise de microdureza Vickers, segundo a norma ASTM E 384 – *Standard Test Method for Microhardness of Materials*.

Através da análise da Microdureza Vickers, com carga 25g, pôde ser observado qual amostra apresentou as melhores condições mecânicas, sabendo qual percentual de Cinza leve e em qual pressão de compressibilidade seria a melhor condição para a dureza deste compósito.

Os corpos de prova obtidos após a mistura simples dos pós apresentaram microdureza descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Dureza Vickers das amostras sinterizadas obtidas por mistura simples de pós

Compósito	Amostra									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Cu5%Cinzas	64	53	75	58	74	89	77	73	77	78
Cu10%Cinzas	70	67	71	75	70	85	81	-	-	-
Cu15%Cinzas	38	50	59	79	66	66	64	59	70	61
Cu20%Cinzas	63	49	67	47	32	40	37	-	-	-

Ao analisar-se as medições de dureza das amostras obtidas com pós submetidos a mistura simples em misturador duplo “V” verifica-se que nenhuma amostra superou a dureza máxima estimada para o cobre eletrolítico puro (55 HRB [21], que é equivalente à 95 HV [22]). O melhor resultado para a propriedade mecânica de dureza ocorreu na amostra VI da composição Cobre com 5% de Cinzas leves, com uma pressão de 600MPa para a compactação da amostra.

Utilizando como referência as condições de percentual da mistura, compactação e sinterização da amostra VI (que apresentou a maior dureza), deu-se início a próxima etapa do estudo.

3.2 Mistura e moagem simples de pós

Nesta etapa o pó de cobre com 5% de cinzas foi submetido à moagem simples por moinho de bolas, com o intuito de criar uma pré-liga entre os pós para formação de um compósito. Foram retiradas amostras de pó após 3 tempos diferentes de moagem, sendo eles: 100 horas, 200 horas e 356 horas de moagem, para verificar a influência do tempo de moagem nas propriedades mecânicas das peças produzidas. Após a moagem do pó pelo moinho de bolas, foram confeccionados corpos de prova nas melhores condições de dureza apresentadas pelas peças obtidas por mistura simples, com o intuito de comparar os resultados.

O procedimento de Microdureza realizado foi o mesmo utilizado para as amostras obtidas por mistura simples de pós e o resultado está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Microdureza das amostras sinterizadas obtidas após moagem por moinho de bolas

Condição de sinterização	Pré-aquecimento à 300°C, sinterizada em atm. de Argônio			Sem pré-aquecimento, sinterizada em atm. de Argônio			Pré-aquecimento à 300°C, sinterizada em atm. de Gás Marrom		
	100	200	356	100	200	356	100	200	356
Horas de moagem	100	200	356	100	200	356	100	200	356
Dureza (HV)	121	105	102	111	81	70	122	89	76

Ao analisar-se as medições das amostras obtidas após a moagem simples em moinho de bolas, verifica-se que o maior resultado para a propriedade mecânica de dureza ocorreu na amostra confeccionada com o pó moído por 100 horas, superando a dureza máxima estimada para o cobre puro, atingindo 122 HV de dureza.

3.3 Moagem de Alta Energia dos pós

Nesta etapa do estudo foi realizada a moagem de alta energia dos pós por moinho atritor para verificar a possibilidade de melhora dos resultados obtidos pelo processo de moagem por moinho de bolas.

Os pós de cobre e cinzas foram submetidos a moagem de alta energia durante 24 horas, pois o aumento de dureza após esse período de tempo torna-se insignificante [20].

Após a moagem de alta energia dos pós, foram confeccionados corpos de prova nas melhores condições de dureza apresentadas pelas peças obtidas por mistura simples e por moagem simples dos pós, com o intuito de comparar os resultados. A dureza apresentada pelos corpos de prova obtidos após moagem de alta energia esta apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Microdureza das amostras sinterizadas obtidas após moagem de alta energia

Amostra	I	II
Dureza (HV)	121	120

Ao analisar a dureza dos corpos de prova obtidos após moagem de alta energia dos pós verifica-se que não superam a dureza obtida nas peças produzidas após a moagem por moinho de bolas, mas pode-se afirmar que se equivalem a dureza obtida após 100 horas de moagem, pois a variação é de apenas 01 HV.

A dureza apresentada nas amostras obtidas após o processo de moagem de alta energia também superam a dureza máxima estimada para o cobre eletrolítico puro, que é 95 HV [21].

A dureza para o compósito de cobre com 5% cinzas leves, obtido após moagem de alta energia de pós está dentro do intervalo encontrado na bibliografia para compósitos de cobre com até 4,1% de alumina, que apresentam durezas entre 117 HV e 137 HV [23].

3.4 Microscopia ótica das amostras sinterizadas

Foi realizado a microscopia ótica de amostras obtidas após os diferentes métodos de mistura e moagem dos pós, sendo demonstrado pela Figura 2, onde é visto a diferença da porosidade e tamanho das partículas de cinzas entre as peças obtidas após o processo de mistura simples de pós, moagem em moinho de bolas e por moagem de alta energia.

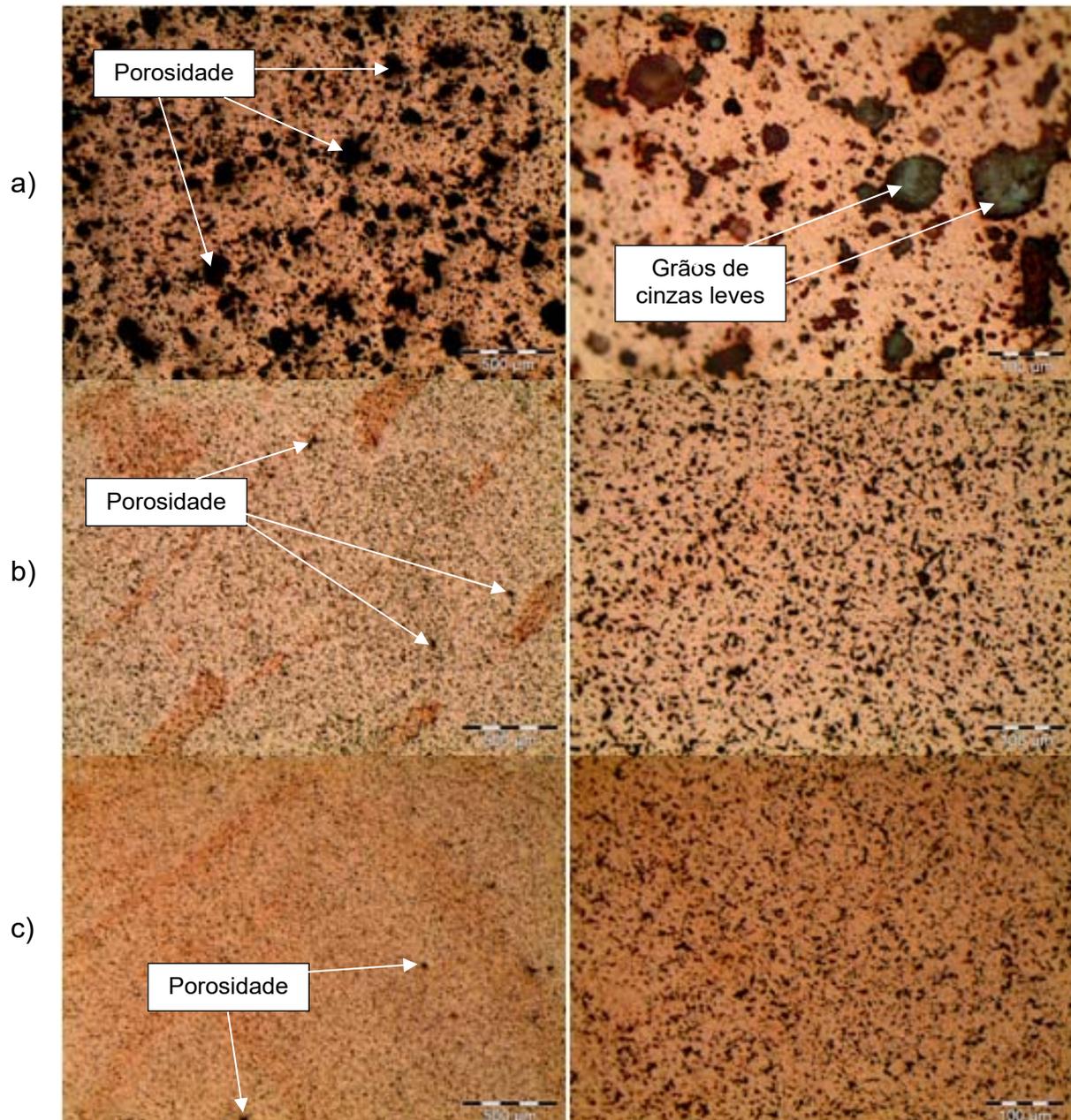


Figura 2. Peças obtidas pelos diferentes processos. (a) moagem simples de pós; (b) moagem em moinho de bolas; (c) moagem de alta energia.

Através da Figura 2, observa-se nitidamente que a porosidade e o tamanho das partículas de cinzas diminuíram consideravelmente após os processos de moagem em moinho de bolas (b) e moagem de alta energia (c) em relação ao processo de mistura simples de pós (a). Também é possível perceber que o processo de moagem de alta energia (c) é o que apresenta porosidades menores. Nos processos (b) e (c) não é possível identificar os grãos de cinzas, pois houve a interação dos óxidos na matriz de cobre, já no processo (a), claramente nota-se os grãos de cinzas sem interação com o cobre (imagem superior direita).

4 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos e discutidos pode-se concluir que a obtenção dos compósitos de Cobre-Cinzas leve a partir da mistura simples de pós apresentam valores inferiores à 89HV de dureza, sendo o valor inferior ao do cobre puro (95 HV para composição de 99,9%Cu [21]), independente dos percentuais de cinzas leves acrescidos ao cobre.

Através do ensaio de dureza, pode-se afirmar que os maiores resultados para esta propriedade mecânica apresenta-se na composição de cobre com 5% de cinzas leves, compactada a 600MPa e sinterizado a temperatura de 900°C, atingindo a dureza de 89 HV-25.

As peças sinterizadas obtidas após a moagem simples do pó de cobre com o pó de cinzas leves apresentam dureza superior à peças de cobre puro. Para diferentes tempos de moagem, nota-se que a dureza das peças com o tempo de 100 horas de moagem apresenta o maior valor de dureza (122 HV). As peças que utilizaram pós submetidos a tempos superiores a 100 horas de moagem em moinho de bolas apresentaram dureza inferior a 122HV.

Ao iniciar o processo de M/P pelo método de moagem de alta energia dos pós, durante 24 horas em moinho planetário, peças com a composição de Cobre5%Cinzas leve atingem a dureza de 121 HV. Este resultado se equivale aos obtidos em peças cujos pós foram moídos por moinho de bolas, tendo uma diferença de apenas 01 HV e reduzindo o tempo de moagem em 76 horas. Ambos os processos de moagem com 5% de cinzas leves garantem maior dureza ao cobre puro, sem que haja a necessidade da formulação de uma liga. Esta dureza é equivalente a peças formadas pela liga Cobre-Cromo com percentuais de 0,85 à 1,20% de Cromo, para peças fundidas [24], porém foi alcançada utilizando resíduos de termoelétrica.

Para garantir uma dureza superior a 120 HV no compósito Cobre-Cinzas leves, deve-se iniciar o processo de M/P pelo método de moagem de alta energia em moinho planetário durante 24 horas, ou iniciar o processo com 100 horas de moagem de pós em moinho de bolas. Ambos processos de moagem conferem dureza superior à 120 HV.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, principalmente ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) pela disponibilização dos recursos materiais e tecnológicos utilizados na elaboração deste trabalho. Aos órgãos CAPES e CNPq pelo apoio a projetos e investimento na área da pesquisa..

REFERÊNCIAS

- 1 BAGNATO, O. R. Projeto sobre compósito Cu/Al₂O₃. Documentação Interna, LNLS, 2006.
- 2 YAMAZAKI, M. GRANT, N. J. Alumina Dispersion – Strengthened Copper Nickel Alloys, Trans. Of the Metall. Society of AIME, vol. 233, p. 1573 –1580, 1965.
- 3 PANDEY, A. B. Metallic Matrices. ASM International Handbook, vol. 21, p. 380-382, 2001.
- 4 TJONG, S. C. MA, Z.Y. Microstructural and mechanical characteristics of in-situ metal matrix composites. Materials Science and Engineering, Vol. 29, p. 49-113, 2000.

- 5 MOUSTAFA, S. F. HAMID, Z. A. ELHAY, A. M. Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique. *Materials Letters*, vol. 53, p. 224–229, 2002.
- 6 DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. Vol. 3, ed. McGraw- Hill, London, United Kingdom, 1988.
- 7 DONNELL, G. O. LOONEY, L. Production of aluminium matrix composite components using conventional PM technology. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 303, p. 292-301, 2001.
- 8 SIVASANKARAN, S. SIVAPRASAD, K. NARAYANASAMY, R. LYER, V.K. An investigation on flowability and compressibility of AA 6061 100– x-x wt.% TiO₂ micro and nanocomposite powder prepared by blending and mechanical alloying. *Powder Technology* vol. 201, p. 70-82, 2010.
- 9 EFE, G. C. ALTINSOY, I. YENER, T. IPEK, M. ZEYTIN, S. BINDAL, C. Characterization of cemented Cu matrix composites reinforced with SiC. *VACUUM*, vol. 85, p. 643-647, 2010.
- 10 DUNKLEY, J. MIM - A global perspective. *Powder Metallurgy*, v.43, n.4, p.296-298, 2000.
- 11 TRUDEL, Y. Introduction to Metal Powder. Production and Characterization. *ASM Metals Handbook*. Vol. 7 - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9ª Edition, p. 83-88, 1998.
- 12 HÖGANÄS. Höganäs Handbook for Sintered Components 5 – Machining Guidelines. Höganäs AB, p. 18, 2004.
- 13 CHIAVERINI, V. *Metalurgia do pó*. São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 4ª Ed, p. 183, 2001.
- 14 CARVALHO, T. E. M. Adsorção de corantes aniônicos de solução aquosa em cinza leve de carvão e zeólita de cinza leve de carvão. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais. IPEN, São Paulo, 2010.
- 15 FERRET, L. S. Zeólitas de Cinzas de Carvão: Síntese e uso. Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2004.
- 16 POLIC, P. S. ILIC, M. R. POPOVIC, A. R. Environmental impact assessment of lignite fly ash and its utilization products as recycled hazardous wastes on surface and ground water quality. Springer-Verlag. *The handbook of environmental chemistry*, Berlin, n. 5, vol. 2, p. 64, 2005.
- 17 BAGNATO, O. R. FRANCISCO, F. R. GABOS, C. B. PARDINE, C. Brasagem Metal/Metal e Metal/Cerâmica para Fabricação dos Guias de Onda e Monitores de Potência do LINAC do Anel no Lns. *Anais do XXVII Congresso de Aplicações de Vácuo na Ciência e na Indústria*, Itatiba, SP, 2006.
- 18 BAGNATO, O. R. VALENTE, J. E. FRANCISCO, F. R. Efeito da Temperatura de Brasagem na Difusão de Ag em Cu. *Anais do XV CBECIMAT*, Natal, RN, 2002.
- 19 ANDRADE, M. L. A. VIEIRA, J. R. M. CUNHA, L. M. S. KELLER, M. C. FULDA, R. S. *Indústria de Cobre – Área de operações industriais*. BNDS, 1997.
- 20 RAJKOVIC, V. BOZIC, D. JOVANOVIC, M. T. Effects of copper and Al₂O₃ particles on characteristics of Cu–Al₂O₃ composites. *Materials and Design* 31, Ed. Elsevier, p. 1962–1970, 2010.
- 21 SOLGIM. Ligas de Cobre. Disponível em: <http://www.solgim.com.br/cobre_eletrolitico.php> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
- 22 KANSERT. Metrologia, Metalografia y Ensayos. Disponível em: <http://www.kansert.es/index.php?option=com_wrapper&Itemid=30> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
- 23 HWANG, S. J. LEE, J. Mechanochemical synthesis of Cu–Al₂O₃ nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, n. 405, Ed. Elsevier, p. 140–146, 2005.
- 24 METAIS, ISOTUBOS. Trefilação, Fundição e Extrusão de Cobre. Disponível em: <<http://www.isotubos.com.br>> Acesso em 20 de Novembro de 2014..