

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO ALUMÍNIO (Al) COM ADIÇÃO DE 1% COBRE (Cu) OBTIDO PELA METALURGIA DO PÓ CONVENCIONAL

ALUMINIUM (Al) BEHAVIOR STUDY PLUS 1% COPPER (Cu) OBTAINED BY POWDER METALLURGY
CONVENTIONAL

Sandro Luís Arenhardt¹, Magnos Marinho da Silva², Guilherme Santos Garcia³, Vinícius Martins⁴,
Alexandre da Silva Rocha⁵

¹Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais do Departamento de Metalurgia do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: sarenhardt@yahoo.com.br

²E-mail: magnos.marinho@hotmail.com

³E-mail: guilhermegarcia@ufrgs.br

⁴Prof. MSc. Ensino Superior de Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-riograndense – Campus Sapucaia do Sul. Avenida Copacabana, 100, Bairro Piratini, Sapucaia do Sul, RS, Brasil. E-mail: vmartins@sapucaia.ifsul.edu.br

⁵Prof. Titular, Dr. em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS – Departamento de Metalurgia do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM). Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: alexandre.rocha@ufrgs.br

RESUMO

A Metalurgia do Pó é um processo de conformação mecânica com um grande crescimento de sua aplicação no cenário industrial brasileiro, por possuir um vasto campo de aplicação que inclui, por exemplo, a fabricação de componentes automotivos, eletrodomésticos, ferramentas de corte e ferramentas elétricas. A sinterização é a fase mais importante do processo, no qual o pó já compactado é submetido a uma temperatura abaixo do seu ponto de fusão, obtendo como resultado um material com excelente acabamento, precisão dimensional e propriedades mecânicas. O trabalho apresentado tem como objetivo avaliar o comportamento do Alumínio com a adição de 1% de Cobre e, como objetivos específicos, realizar levantamentos sobre a densidade, microdureza e metalografia apresentados em função das cargas aplicadas em cada uma das amostras que ficou entre 100 MPa à 1.000 MPa. A metalografia apresentou porosidade inerente ao processo, mas houve um acréscimo de microdureza de 40 para 50 HV.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó, composto Alumínio Cobre, microdureza, densidade e metalografia.

ABSTRACT

Powder metallurgy is a mechanical forming process with increasing applicability in the Brazilian industrial scenario. Application fields include, for example, manufacturing of automotive components, home appliances, cutting tools and electric tools. Sintering is the most important phase of the process, in which the already compacted powder is subjected to a temperature below its melting point, obtaining a material with excellent finish, dimensional accuracy and mechanical properties. The present work aims to assess the behavior of aluminum with the addition of 1% Copper, specifically evaluating density, hardness and metallography presented as a function of applied loads on each of the samples was between 100 MPa to 1,000 MPa. The metallography presented porosity inherent in the process, but there was a hardness increase from 40 to 50 HV.

Keywords: Powder metallurgy, Aluminum Copper composition, hardness, density and metallography.

1 – INTRODUÇÃO

Embora a metalurgia do pó seja uma técnica metalúrgica relativamente recente, sabe-se, devido à história que o homem já produzia suas armas há cerca de 6.000 anos a.C., como lanças e espadas, e até mesmo ferramentas a partir de aglomerados de ferro, mas somente no século XIX foram dados os primeiros passos para o desenvolvimento da técnica da metalurgia do pó. Em 1829, *Wollaston* deu um passo importante na história do processo, pois produziu peças de platina compacta a partir de pó esponjoso deste material,

obtido por transformação de um cloreto de amônio e platina. Para o desenvolvimento industrial da técnica ocorreram etapas mais importantes no início deste século quando foi estudada a possibilidade de fabricação, por sinterização, de molibdênio e tungstênio, metais refratários. Sua obtenção por processos metalúrgicos convencionais era impossibilitada devido ao ponto de fusão apresentado, extremamente elevado. Em 1909, a partir do pó de tungstênio, o processo de fabricação de fios de tungstênio dúcteis para utilização em lâmpadas incandescentes foi desenvolvido por *Coolidge*. Após esta importante contribuição, os próximos passos

foram rápidos. A produção de ligas duras sinterizadas a partir de carboneto de tungstênio aglomerados com metal do grupo do ferro e cobalto são utilizados na produção de misturas para materiais de contato elétrico e em diversas aplicações, pois praticamente todos os metais e ligas podem ser produzidos pela metalurgia do pó (CHIAVERINI, 2001).

A metalurgia do pó é potencialmente utilizada, ou uma alternativa muito atraente, na necessidade de produzir grandes lotes de peças, com complexidade de forma ou com material base de alto ponto de fusão. Este é um processo moderno, mas os avanços científicos e tecnológicos não param (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Alguns exemplos de produtos que são mais eficientes e economicamente fabricados pela metalurgia do pó são peças de grande precisão dimensional e de forma relativamente complexa, de ferro e aço, Cobre e suas ligas, Alumínio e suas ligas e outros metais e ligas. São muito utilizadas, em grande escala, nos mais variados setores de máquinas, veículos e equipamentos (CHIAVERINI, 2001).

Uma operação fundamental da técnica de metalurgia do pó é a sinterização, pois ela constitui a fase final do ciclo de consolidação dos pós-metálicos, ciclo esse iniciado com a compactação (CHIAVERINI, 2001).

O Alumínio é um elemento usado há milênios antes de Cristo, mas a fabricação comercial começou há cerca de 150 anos. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. Esses dados já mostram a importância do Alumínio para a nossa sociedade. Antes de ser descoberto como metal isolado, o Alumínio acompanhou a evolução das civilizações. Sua cronologia mostra que, mesmo nas civilizações mais antigas, o metal dava um tom de modernidade e sofisticação aos mais diferentes artefatos. (ABAL, 2007).

A metalurgia do pó tem a finalidade de transformar sem fusão efetiva, pós metálicos ou não metálicos usando pressão para compactação e calor, por meio de um tratamento térmico de sinterização, que se realiza a temperatura inferior ao ponto de fusão do material base do componente ou peça, permitindo obtê-los na sua forma final ou próximo dela (*near-net or net-shape*) (SANDEROW, 1998).

As etapas fundamentais que compõem o processo de metalurgia do pó estão descritas a seguir:

Obtenção dos pós: Há vários processos de fabricação de pó como, por exemplo, atomização à água e gás, moagem, *mechanical alloying*, eletrólise e métodos químicos, incluindo a redução de óxidos, entre outros. (TRUDEL, 1998, SURYANARAYANA; IVANOV; BOLDYREV, 2001).

Misturas dos pós: As misturas de variados pós para produzir a liga desejada e promover a homogeneização da matéria prima são realizadas em misturadores próprios para a metalurgia do pó ou ainda em moinho de esferas, também é adicionado um agente lubrificante que tem a função de diminuir o atrito das partículas de pó entre si e o atrito destas

com o ferramental de compactação, facilitando a desmoldagem das peças (SALGADO, 2002).

Compactação: É a conformação dos pós pela aplicação de uma pressão uniaxial ou biaxial em ferramentas apropriadas e com a geometria aproximada do produto final, geralmente, em temperatura ambiente. Em muitas aplicações onde as propriedades mecânicas são um diferencial, necessita-se um aumento da densidade destas peças por meio de uma maior pressão de compactação (SALGADO, 2002).

Sinterização: É um tratamento térmico que visa conferir o formato final desejado atingindo propriedades químicas e mecânicas por meio da ligação atômica entre as partículas vizinhas. Este processo ocorre a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão do metal base ou da liga metálica considerada, sob condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera (ARNDT, 2002).

Operações complementares: Pode ser agregada uma série de outras operações adicionais de fabricação e/ou acabamento que melhoram as propriedades e precisão dimensional do produto sinterizado ou ainda impõem características particulares para aplicações específicas. A recompressão, resinterização, forjamento, calibragem, infiltração metálica, tratamento térmico, usinagem, tamboreamento e a impregnação em óleo em mancais autolubrificantes são outras etapas que podem ser agregadas no processo produtivo (GOMES DE BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2003).

O processo de Metalurgia do Pó pode ser visto de maneira esquemática e simples na Figura 1.

Figura 1 – Processo básico de metalurgia do pó



Fonte: SLIDEPLAYER (2015)

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do Alumínio com a adição de 1% de Cobre em sua composição, tendo como objetivos específicos realizar estudos sobre o comportamento da densidade, microdureza e metalografia apresentados em função das cargas aplicadas em cada uma das amostras que ficou entre 100 MPa à 1.000 MPa e comparar com os dados encontrados no Alumínio puro sinterizado.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Devido a não se ter informações suficientes em relação ao efeito do percentual de adição do Cobre no Alumínio vislumbrou-se um estudo da caracterização deste composto a fim de obter dados concretos com a compactação e sinterização.

Para determinação do tamanho de partícula do aglomerado das amostras foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do centro de microscopia da UFRGS, de marca JEOL, modelo 5800 com EDS acoplado.

Os pós foram pesados a fim de obter os resultados de suas massas para os cálculos de percentual de cada elemento na mistura. Para a compactação das amostras foi utilizada uma matriz cilíndrica de aço temperado com diâmetro interno (\emptyset) de 13 mm e 63 mm de altura (h) da cavidade, com o punção superior de 15 mm de altura e o punção inferior de 65 mm de altura.

Com o objetivo de diminuir o atrito entre os componentes do ferramental de compactação, utilizou-se 1,5% de estereato de zinco da massa total da mistura em suas devidas porcentagens.

Para realizar a prensagem do pó junto à matriz, foi utilizada uma prensa hidráulica da marca Bovenau, modelo P30st. As pressões de compactação utilizadas foram de 100 MPa até 1.000 MPa.

A fim de obter a resistência mecânica dos corpos de prova (peças verdes), as mesmas foram encaminhadas para o processo denominado sinterização. Durante esta fase do processo as amostras foram expostas a uma atmosfera controlada por meio de gás argônio. O aquecimento das amostras iniciou em temperatura ambiente (18 °C) e teve um aumento gradativo com a taxa de 10 °C/min até alcançar o patamar térmico de sinterização com a temperatura de 500 °C, onde permaneceu durante uma hora, realizando assim a sinterização completa e união das partículas metálicas. Após uma hora de exposição das amostras à temperatura de 500 °C, ainda mantendo as peças no interior do forno deu-se início o resfriamento destas amostras. O resfriamento atuou com uma taxa média decrescente de 9,53 °C/min até atingir 200 °C, onde a temperatura passou a diminuir a uma taxa média de 5,83 °C/min até a temperatura ambiente, quando foram retiradas do forno.

Para a realização da micrografia por meio da microscopia óptica, as amostras foram submetidas ao procedimento de lixamento, realizado em uma politriz metalográfica onde foram utilizadas lixas de papel com abrasivo tipo SiC com granulometrias de número 120, 280, 320, 400, 600 e 1.200, sempre trabalhando as amostras em 90 ° de uma lixa para outra até desaparecerem os traços da lixa anterior.

As amostras foram submetidas ao polimento com pano de feltro e com abrasivo de Óxido de Alumínio para deixar a superfície das amostras espelhadas. Na sequência foi realizada limpeza com água corrente e também com álcool.

Para realização do ataque químico utilizou-se reagente, HNO₃50% H₂O, durante 10 segundos e após feita a análise das microestruturas com auxílio de um microscópio óptico. Foi realizado o teste de Microdureza em todas as amostras obtidas por Metalurgia do Pó convencional utilizando o durômetro ISH-TDV1000. Por meio da análise da Microdureza Vickers, com carga 50 g, foi possível observar quais amostras apresentam as melhores condições mecânicas, levando em consideração a pressão utilizada durante o processo de compressibilidade. O ensaio foi realizado utilizando cinco medições para aumentar a precisão dos resultados como está contida na Norma ASTM E 384.

Para a medição de densidade, as amostras foram medidas antes da sinterização a fim de se obter o volume e, com os valores de massa, calculadas as densidades. Após a sinterização, o volume das amostras foi medido por meio do Método de Arquimedes, o qual consiste em submergir a peça em um recipiente com água sobre uma balança de precisão e, por meio deste método, é possível relacionar o volume de água deslocado com o volume total da peça. Por fim, a densidade dos sinterizados é calculada em função do volume obtido e a massa das peças.

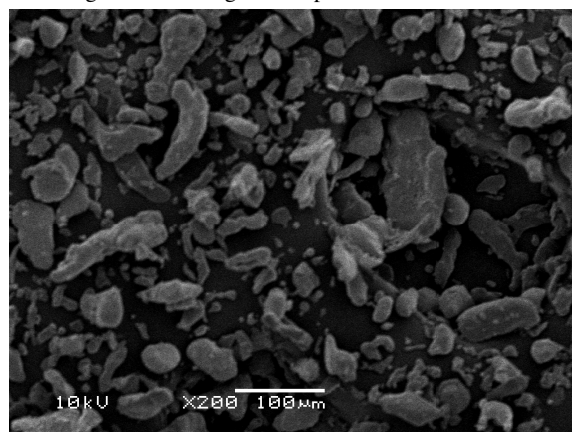
3 – RESULTADOS

Com o objetivo de melhor apresentar os resultados obtidos, os mesmos foram expostos na forma de gráficos onde se tem informações como a densidade aparente, microestrutura, microdureza e análise metalográfica das amostras analisadas nos ensaios realizados.

3.1 – Microscopia eletrônica de varredura dos pós de Alumínio e Cobre

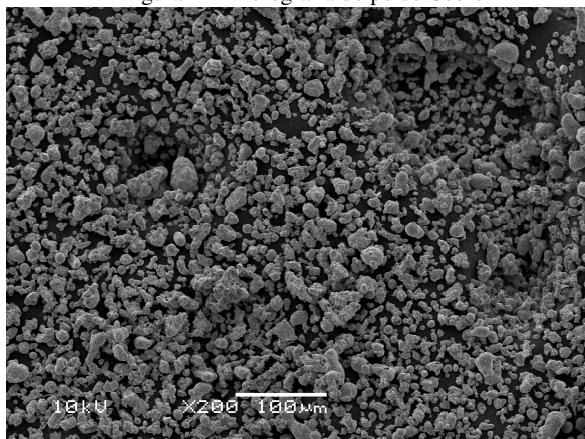
Na Figura 1 pode ser visto o pó de Alumínio que possui partículas menores do que 100 μ m e estão dispersas e com formatos irregulares.

Figura 1 – Micrografia do pó de Alumínio da Alcoa



Observa que o pó de Alumínio apresenta diversos tamanhos, desde 10 μm a partículas menores que 100 μm com formato arredondado. Na Figura 2 pode ser visto o pó de Cobre que possui partículas próximas de 10 μm até 20 μm .

Figura 2 – Micrografia do pó de Cobre



3.2 – Densidade aparente do composto Alumínio Cobre

Logo após a mistura, o primeiro resultado obtido foi a densidade aparente. Este resultado está descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Densidade aparente do composto

Material	Densidade Aparente (g/cm^3)
Alumínio 1% Cobre	0,907

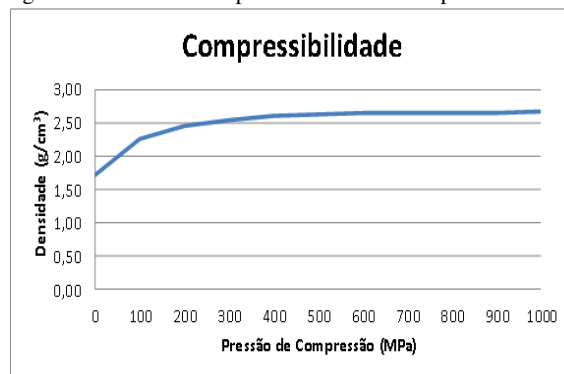
O valor da densidade aparente é o primeiro ponto da curva de compressibilidade da liga. Após estes resultados, as amostras foram compactadas conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições de obtenção da curva de compressibilidade do composto com 1% de Cobre

CURVA DE COMPRESSIBILIDADE											
Pressão de Compressão	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
m (g)	12,08	4,63	4,64	4,63	4,62	4,64	4,61	4,6	4,61	4,6	4,54
h (mm)	52,35	15,6	14,4	13,77	13,48	13,36	13,2	13,2	13,15	13,14	12,93
d (mm)	13,1	13	13	12,97	12,97	12,97	13	13	12,97	12,96	12,97
v (cm^3)	7,05	2,05	1,89	1,82	1,78	1,76	1,74	1,74	1,74	1,73	1,71
d (g/cm^3)	1,71	2,26	2,45	2,55	2,6	2,63	2,64	2,65	2,65	2,66	2,66

Na Figura 3 observa-se a curva de compressibilidade da amostra a verde do composto Al 1% Cu utilizando-se o princípio de Arquimedes, conforme Norma MPIF-42.

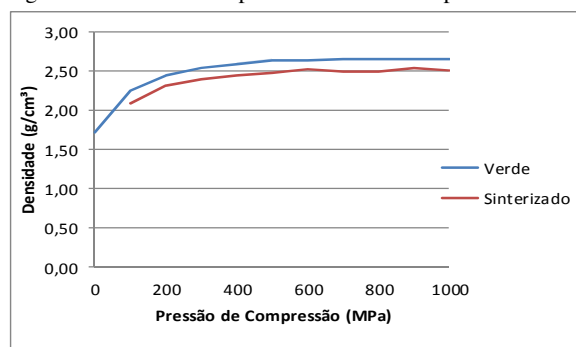
Figura 3 – Curva de compressibilidade do composto Al 1% Cu



Ao analisar a Figura 3 percebe-se que pressões entre 500 MPa e 600 MPa apresentam um melhor resultado, sendo assim, ideais para compactação. Utilizando-se pressões de 100 MPa à 500 MPa percebe-se aumento de densidade dos corpos de prova. Acima de 500 MPa a densidade começa a se estabilizar, devido ao aumento da pressão de compactação, a partir de uma pressão de 500 MPa não se tem melhores resultados de densidade, ou seja, esforço desnecessário empregado no equipamento, já que não há mudança específica no resultado da compressibilidade. Após a coleta de dados dimensionais e elaboração das curvas de compressibilidade, as amostras verdes foram encaminhadas para o processo de sinterização.

Na Figura 4 observa-se a comparação entre a curva de compressibilidade das amostras verde e sinterizadas do composto Al 1% Cu.

Figura 4 – Curva de compressibilidade do composto Al 1% Cu

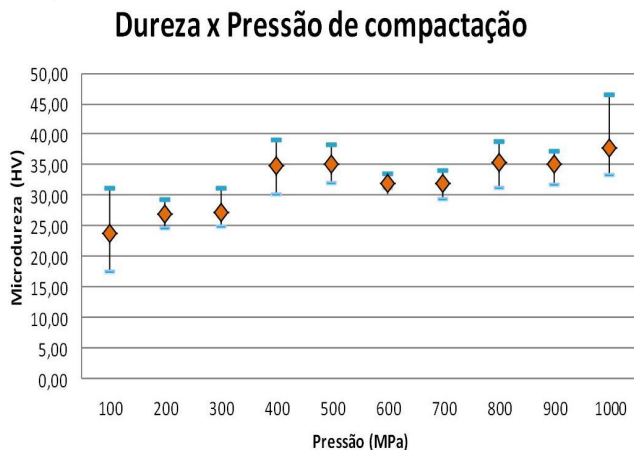


Depois de analisar a Figura 4 observa-se que a densificação das amostras sinterizadas não foi maior que as amostras a verde. Esta dificuldade se apresenta devido à dificuldade quando se trabalha com o Alumínio utilizando o processo de metalurgia do pó. Aparentemente o problema se dá devido a presença de uma camada de óxido, que envolve completamente a superfície das partículas de pó com um grande prejuízo tanto na compressibilidade quanto na sinterabilidade das amostras, Pieczonka *et al.* (2005).

3.3 – Microdureza

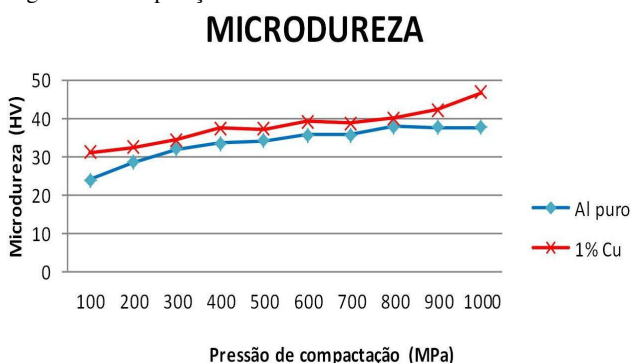
Na Figura 5 são apresentadas as durezas do Alumínio com adição de 1% de Cobre em função da pressão de compactação, posterior a sinterização. Observa-se que o melhor resultado encontrado foi com a pressão de 1.000 MPa, obtendo-se um valor de dureza de 46,58 HV havendo um incremento significativo em relação as pressões mais baixas.

Figura 5 – Medições de microdureza das amostras sinterizadas



Na Figura 6 é apresentada a evolução das durezas do Alumínio puro e com adição de 1% de Cobre em função da pressão de compactação, posterior a sinterização. Deve levar em consideração o desvio padrão, pois a diferença de dureza entre as amostras compactadas de 500 a 1.000 MPa foi pouco significativa quando avaliado o mínimo e máximo das medições. Na Figura 6 é mostrada uma comparação entre as durezas entre o Alumínio puro e o composto.

Figura 6 – Comparação das microdureza das amostras sinterizadas



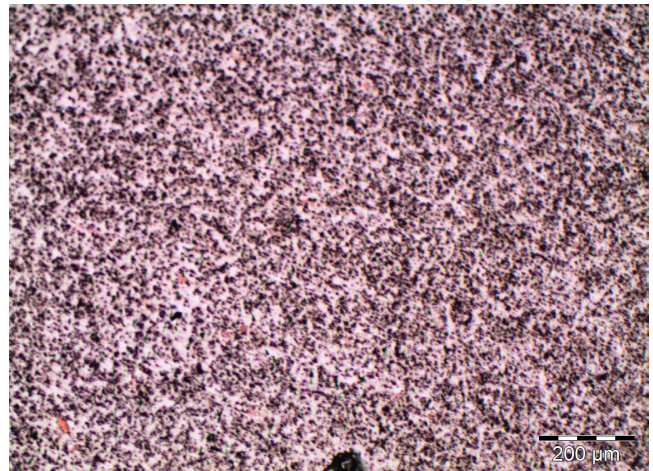
Ao analisar o gráfico da Figura 6 verifica-se que os resultados das microdurezas do sinterizado Al 1% Cu obtiveram uma média de dureza de 37,82 HV-50 g. O melhor resultado encontrado foi com a pressão de 1.000 MPa e dureza de 46,58 HV, sendo que nesta faixa de pressão a microdureza ficou mais elevada comparada com os outros

corpos de prova. Se comparado com a dureza encontrada no Alumínio puro que ficou com média de 33,56 HV, obteve-se um aumento de 12,7% na dureza do composto Al 1% Cu.

3.4 – Análise da microestrutura

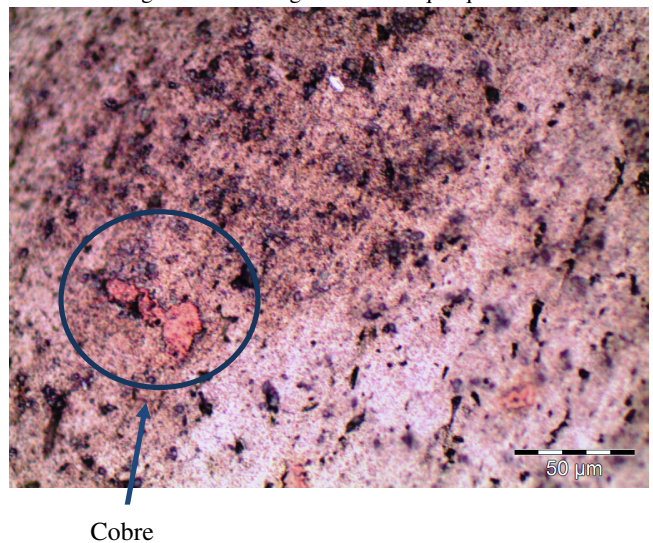
Identificou-se, a partir da análise metalográfica, que houve interação entre o Alumínio e o Cobre, mas não houve total interdifusão entre os elementos constituintes. Na Figura 7 é apresentada a metalografia da amostra compactada com 800 MPa sem ataque químico.

Figura 7 – Metalografia sem ataque químico



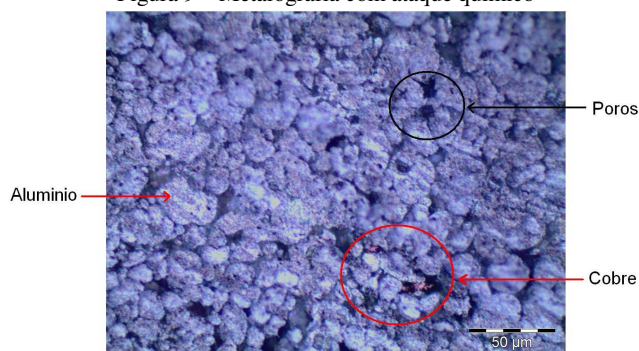
Observa-se a homogeneidade da distribuição da porosidade sobre a amostra com poros entre 20 a 50 µm e partículas de Cobre sobre a matriz de Alumínio. Para melhor visualização da relação entre o Alumínio e o Cobre é apresentada, na Figura 8, a amostra de 600 MPa sem ataque químico e aumento de 500 vezes.

Figura 8 – Metalografia sem ataque químico



É possível notar a partícula de Cobre indicada pela seta com dimensões de aproximadamente 40 μm . Depois da realização do ataque químico pode-se observar a porosidade das amostras, conforme Figura 9. A porosidade resultante pode ser explicada em função da curva de compressibilidade, a qual evidencia uma queda na densidade das amostras com a sinterização. Ainda, de acordo com Pieczonka *et al.* (2005), a presença de uma camada de óxido nas partículas de Alumínio atua como um fator negativo a sinterização e conseqüente densificação do compactado.

Figura 9 – Metalografia com ataque químico



Para identificação qualitativa dos resultados apresentados nas metalografias foi utilizado o método de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) que permitiu a definição dos metais visualizados pelo microscópio ótico. Optou-se por não apresentar os picos do ensaio e caracterizar os materiais por meio da metalografia.

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o comportamento do composto de Alumínio com 1% de Cobre. Pode-se constatar que não houve interdifusão total entre o Cobre e o Alumínio, não caracterizando, assim, uma liga metálica (e sim um composto metálico de Alumínio com adição de Cobre). A densidade a verde foi de 2,65 g/cm^3 em média que diminuiu a densidade do sinterizado para 2,5 g/cm^3 . Por meio do ensaio de dureza pode-se afirmar que o melhor resultado em relação à propriedade mecânica apresentada na composição de Al 1% Cu foi o compactado a 1.000 MPa e sinterizado a temperatura de 500 $^{\circ}\text{C}$, atingindo a dureza de 46,58 HV-50. Considerando os resultados encontrados na sinterização do Al puro, que ficou com uma média de 33,56 HV-50, obteve-se um aumento de 12,7% na dureza do composto Al 1% Cu.

Observa-se que a densificação das amostras sinterizadas não foi maior que as amostras a verde, que apresenta devido à dificuldade quando se trabalha com o Alumínio utilizando o processo de metalurgia do pó, o problema se dá devido à presença de uma camada de óxido, que envolve completamente a superfície das partículas de pó acarretando

um grande prejuízo tanto na compressibilidade quanto na sinterabilidade das amostras.

A porosidade resultante e a fraca interação entre as partículas de Cobre e as de Alumínio podem ser aprimoradas, eventualmente, trabalhando-se com temperaturas e tempos de sinterização maiores. Mais experimentos seriam necessários para avaliar o efeito dessas variáveis nas características finais do compactado.

REFERÊNCIAS

- ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo, 2007.
- ARNDT, M. C. **Obtenção de material magnético macio de Fe-Si pelo processo de injeção de pós metálicos**. Dissertação (mestrado) em Ciência e Engenharia de Materiais. Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica. Porto Alegre, RS, Brasil, 2002.
- CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: técnica e produtos**, 4. ed., São Paulo, 2001.
- GOMES DE BRITO, F. I.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO J. M. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó**. Holos, v. 3, ano 2003.
- GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A Metalurgia do Pó: Alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Ed. Metallum, 1. ed., 2009.
- PIECZONKA, T.; SCHUBERT, T.; BAUNACK, S.; KIEBACK, B. **Sintering Behaviour of Aluminium in Different Atmospheres**. Fraunhofer Institute, 2005. PMCid:PMC546008.
- SALGADO, L. **Processamento da liga Ferro-Níquel-Cobre-Molibdênio por moagem de alta energia**. Tese (Doutorado) em Ciência na área de Tecnologia Nuclear – Aplicações. Pós-graduação no Instituto de Pesquisa Energética associado à USP. São Paulo, SP, Brasil, 2002.
- SANDEROW, H. **Management & Engineering Technologies**. Powder Metallurgy Methods and Design. ASM Metals Handbook, v. 7, Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9 ed., 1998, p. 23-24.
- SURYANARAYANA, C.; IVANOV, E.; BOLDYREV, V. **The science and technology of mechanical alloying**. Materials Science and Engineering, Elsevier Science B, v. 2001. PMCid:PMC114021.
- SLIDEPLAYER. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br>>. Acesso em: 30 out. 2015.
- TRUDEL, Y. **Introduction to Metal Powder**. Production and Characterization ASM Metals Handbook, v. 7, Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9. ed., 1998, p. 83-88.