

# FABRICAÇÃO DE LIGAS DURALUMÍNIO VIA METALURGIA DO PÓ\*

Bianca Nathália Andrade de Souza<sup>1</sup>  
Elizeth Oliveira Alves<sup>2</sup>  
Daniel Ricardo Araújo Amaro<sup>3</sup>

## Resumo

Em decorrência do desenvolvimento contínuo da ciência e tecnologia, os materiais usados nas grandes indústrias estão dispondo de características estruturais cada vez mais desafiadoras. As ligas metálicas trabalham com a harmonização de dois ou mais elementos, combinando suas propriedades e obtendo um produto mais eficaz. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo, produzir e estudar um compósito que atende bem às necessidades atuais das indústrias (principalmente as de transporte e aeroespacial), a liga de Alumínio-Cobre (Al-Cu) AA 2014, também conhecida como Duralumínio. Foram confeccionadas amostras com quantidades de cobre distintas, são elas: Al4%Cu, Al5%Cu e amostras do Al AA 1100, sem adição do cobre, para fins comparativos. A liga foi produzida através de técnicas da Metalurgia do Pó (MP). Os pós foram processados via Moagem de Alta Energia (MAE) em um moinho do tipo SPEX, depois foram compactadas uniaxialmente a frio e sinterizadas em forno do tipo mufla. As amostras foram avaliadas pelo ensaio de Microdureza Vickers, no qual se verificou que o aumento da dureza é diretamente proporcional a quantidade de Cobre presente nas amostras. Também foram submetidas ao teste de Microscopia Ótica para completar a caracterização das ligas, onde foram avaliadas suas respectivas microestruturas e morfologia dos grãos.

**Palavras-chave:** Duralumínio; Materiais compósitos; Metalurgia do pó; Microdureza Vickers.

## MANUFACTURE OF DURALUMIN ALLOYS THROUGH POWDER METALLURGY

### Abstract

In result of the continued development of science and technology, the materials used in large industries are available with features. As metal alloys they work with a harmonization of two or more elements, combining their properties and obtaining a more effective product. Therefore, this work aims to produce and study a program that meets the needs of industries, mainly, such as transportation and aerospace, an Aluminum-Copper (AA-Cu) AA 2014 alloy, also known as Duralumin. They were made with samples of copper, they are: Al4% Cu, Al5% Cu and samples of Al 1100, without addition of copper, for comparative purposes. The alloy was produced by Powder Metallurgy (MP) techniques. The powders were processed through the High Energy Grinding (MAE) in SPEM, after being compacted uniaxially in the cold and sintered in a muffle furnace. The samples were evaluated by the Vickers Microhardness test, not qualifying as the dose increase is directly proportional to the amount of copper present in the samples. Also, they were submitted to the Optical Microscopy test for the characterization of the alloys, where the microstructures and morphology of the grains were evaluated.

**Keywords:** Duralumin; Composite Materials; Powder Metallurgy; Vickers hardness.

<sup>1</sup> Engenheira Mecânica, Bacharel, UNINASSAU, Recife, Pernambuco, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira de Materiais, Doutora, Docente, UNINASSAU, Recife, Pernambuco, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre, Docente, UNINASSAU, Recife, Pernambuco, Brasil..

## 1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, o ramo industrial encontra-se extremamente competitivo entre si e por isso exigem materiais cada vez mais bem elaborados, que ofereçam ótima resistência, leveza e eficácia em sua aplicação. As ligas metálicas por exemplo, são muito difundidas na indústria por além de oferecerem características do material predominante, herdar benefícios de um material adicionado em menor quantidade. Um desses exemplos é a liga de Alumínio-Cobre (Al-Cu), também conhecida como Duralumínio, uma liga metálica não-ferrosa que possui alta resistência mecânica, média resistência à corrosão, baixa densidade e ótima ductilidade.

Em adição aos novos materiais, surgem novos métodos de fabricação que acabam se destacando por serem mais viáveis economicamente. Uma técnica de fabricação que está atendendo a essas necessidades é a Metalurgia do pó (MP), que tem como principal objetivo produzir peças através da compactação de pós metálicos seguida da sinterização. Essa técnica se destaca na indústria de transformação por fabricar peças em larga escala geralmente com sua geometria final, evitando na maioria das vezes, operações posteriores de acabamento, fazendo com que o processo seja mais econômico. Esta técnica é extremamente utilizada para fornecedores do setor automotivo, informático, têxtil, aeroespacial, etc.

Pensando na liga de Al-Cu (Duralumínio) e no processo de metalurgia do pó, que são altamente difundidos mundialmente, o presente trabalho tem como objetivo estudar essa liga, fabricada justamente através das técnicas convencionais de MP. Os pós utilizados neste trabalho foram processados via moagem de alta energia em um moinho do tipo SPEX, onde foram compactados uniaxialmente a frio para dar forma ao compactado verde e finalmente foram sinterizadas em um forno do tipo mufla sob uma atmosfera de nitrogênio (N<sub>2</sub>).

Posteriormente, será explanada uma revisão bibliográfica dos temas que estão sendo abordados neste trabalho, como as etapas do processo de metalurgia do pó: moagem de alta energia, compactação e sinterização. Logo após serão apresentados quais materiais foram utilizados para o processamento dos pós utilizados na moagem, compactação e sinterização, bem como os métodos usados para estudo das amostras. Estes métodos foram o de Microdureza Vickers que avaliará sua resistência mecânica e a Microscopia Ótica, que por sua vez irá estudar a sua microestrutura. Para concluir, será mostrado os resultados obtidos após avaliação e comparação dos métodos utilizados, mostrando através de parâmetros o comportamento entre as diferentes composições de Al-Cu presentes em cada amostra, sendo usada também uma amostra sinterizada do material elementar puro, o Al AA1100 para fins comparativos em relação às ligas de AA2014 com teores distintos de Cobre.

### 1.1 O ALUMÍNIO

Segundo a tabela periódica, o alumínio possui símbolo Al, número atômico igual a 13, massa atômica de 27u, baixa densidade (aproximadamente um terço do aço ou do cobre), baixo ponto de fusão, ótima condutividade térmica e elétrica e alta resistência à corrosão. Sua estrutura cristalina é a Cúbica de Face Centrada (CFC), possui cor cinza com aspecto prateado e fosco que tem um revestimento fino de um óxido (esse óxido é não reativo e muito aderente, protegendo o alumínio da corrosão), é um metal leve e macio, porém resistente. Técnicas como tratamento térmico e formação de ligas podem ajudar a aumentar a resistência mecânica deste

elemento. As várias aplicações do alumínio estão relacionadas justamente com suas características físicas e químicas citadas anteriormente, que se destacam em comparação com outros metais de grande consumo ([1]; [2]).

## 1.2 LIGAS DE ALUMÍNIO

Uma das características que faz com que o alumínio se torne mais atraente para as indústrias de consumo é a sua capacidade de formar várias ligas com os mais distintos tipos de elementos usados na engenharia. Quando ele é resfriado e se solidifica, os elementos que foram inseridos para formar a liga acabam ficando retidos nesta estrutura sólida, o que acaba implicando na influência das características dos elementos inseridos na estrutura atômica do material matriz, modificando também, o tamanho de suas moléculas. O objetivo principal das ligas é justamente aumentar a resistência mecânica do material sem prejudicar outras propriedades [3].

O alumínio considerado como puro possui resistência à tração de aproximadamente 90 MPa, extremamente baixa, tornando sua aplicação um tanto limitada. Já quando se é adicionado outros metais em pequenas quantidades, sua resistência à tração pode chegar até os 700 MPa (ABAL, 2018). As ligas de alumínio são divididas em dois grupos: as deformadas plasticamente à frio (conformadas) e as tratadas termicamente (fundidas). As ligas de Al-Cu participam da família 2XXX segundo classificação da Aluminium Association (AA) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

## 1.3 O DURALUMÍNIO

Esta liga foi criada em 1906 pelo alemão Alfred Wilm na cidade de Düren, Alemanha. Por isso surgiu-se o nome “duralumínio”, junção da cidade onde a liga foi criada com seu elemento principal, o alumínio. Continha inicialmente 4% de cobre que é inicialmente maleável, mas quando adicionado ao alumínio, endurece por precipitação através de tratamento térmico. O endurecimento por precipitação, que também é conhecido como envelhecimento, é um procedimento que usa o calor em um metal maleável com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, os valores mais elevados de dureza nas ligas de duralumínio são obtidos quando possuem teores de cobre de 4 a 6% [4].

## 1.4 METALURGIA DO PÓ

A metalurgia do pó é um processo metalúrgico no qual se faz o uso de pós metálicos e não-metálicos para manufaturar peças de diversos setores, onde os pós são processados, compactados e sinterizados para obter sua forma final [5].

O processo de metalurgia do pó tem como principais características:

- Processo mais limpo, pois não gera rebarbas ou outro tipo de excrecências, fazendo com que seja também mais econômico, pois terá menos desperdício de materiais;
- Alta produtividade de peças geralmente na sua forma final, o que gera uma ótima competitividade;
- Maior controle da microestrutura e porosidade;
- Produção de peças com formatos complexos, pois proporciona um bom controle dimensional [5].

Por ser a principal matéria prima deste processo, é necessário um controle rigoroso quanto a sua uniformidade, ou seja, todas as suas características devem ser conhecidas, determinadas e controladas. O tamanho e a forma das partículas são os fatores mais importantes dos pós e o que vai determiná-lo é justamente o processo de obtenção.

## 1.5 APLICAÇÃO DA LIGA DURALUMÍNIO PRODUZIDA VIA METALURGIA DO PÓ

Ao contrário do que se pensa, a técnica de MP é utilizada desde 6000 a.C, quando aglomerados de ferro eram fabricados para confeccionar ferramentas de trabalho. Mas somente a partir do século XX a técnica começou a ser mais estudada e difundida, a princípio na Alemanha. No Brasil, a metalurgia do pó passou a ser utilizada nos anos 40, inicialmente com a fabricação de ferramentas de corte, materiais de ferro e aço e buchas de bronze auto lubrificantes [5].

O alumínio por sua vez, ganhou bastante credibilidade sendo produzido por esta técnica, devido a sua alta resistência para o peso que possui, sua alta resistência à corrosão e superioridade no acabamento. O uso do alumínio obteve êxito principalmente em peças do sistema de suspensão pela alta capacidade de absorver choques. A adição de elementos como o cobre nas ligas de alumínio contribui para aumentar o seu endurecimento [6].

A liga AA2014 além de possuir uma alta resistência mecânica, pode ser utilizada em altas temperaturas, pois o precipitado  $CuAl_2$  melhora sua propriedade, não excedendo os  $150^{\circ}C$ , para não ocorrer o crescimento desses precipitados e gerar a perda de suas propriedades mecânicas [7].

O uso das ligas da família 2XXX fabricadas via MP proporcionou propriedades mecânicas de dureza e resistência à tração mais elevadas que as usinadas e forjadas por exemplo. Uma liga AA2014 com 4,4%Cu fundida obteve 71,50 HV sem tratamento térmico, a mesma liga foi produzida via MP e obteve resultados de dureza similares para a liga sem tratamento térmico. Estudos indicam que ao acrescentar 1% de Cu em uma liga de alumínio via MP pode aumentar em aproximadamente 30% a dureza do material ([8]; [9]; [10]).

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 MATERIAIS

Foram utilizados no experimento os pós elementares de Al AA 1100 da marca Alcoa Inc. e o Cobre da marca Dinâmica Química contemporânea Ltda, com 99,99% de pureza. As amostras de AA2014 foram confeccionadas com teores distintos de Cu, de 4 e 5% em peso. Também foram produzidas amostras do material matriz AA1100 para fins comparativos. Todas elas tiveram peso igual a 5g cada, somando o material matriz com o reforço de Cobre. Foi utilizado também o ácido esteárico ( $C_{18}H_{36}O_2$ ) que agiu como o agente controlador de processo, também conhecido como PCA – Process Control Agent, onde sua principal função foi atuar como lubrificante na Moagem de Alta Energia, reduzindo a energia superficial do material e evitando a soldagem excessiva das partículas. O mesmo foi utilizado na proporção de 2% em peso do total de material processado. Adotou-se o peso inicial de 5,00g por amostra para a pesagem dos pós de partida e a quantidade de 0,10g de PCA.

A Tabela 1 informa as composições químicas das amostras fabricadas em porcentagem e massa utilizadas neste trabalho.

Tabela 1. Composições químicas das amostras fabricadas em porcentagem e massa (AUTOR, 2019).

Amostras	Al (%)	Cu (%)	Al (g)	Cu (g)
Al AA100	100,00	-	5,00	-
Al4%Cu	96,00	4,00	4,84	0,16
Al5%Cu	95,00	5,00	4,75	0,25

## 2.2 MÉTODOS

Todos os equipamentos utilizados nesse experimento pertencem ao Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural (COMPOLAB) que faz parte do departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

### 2.2.1 Processamento dos pós via Moagem de Alta Energia

A moagem de alta energia (MAE) é uma técnica utilizada para o processamento dos pós em temperatura ambiente e estado sólido, onde ocorre etapas de fraturas e soldagem dos grãos em um moinho de alta energia. A MAE processa os pós em moinhos de esferas e nestes equipamentos ocorre a transferência de energia cinética das esferas para as partículas de pós através do impacto ou cisalhamento. Esta técnica permite conseguir uma ligação, a nível atômico, dos elementos químicos que constituem os pós de partida, formando uma liga por um processamento realizado totalmente no estado sólido. Além de misturas de pós elementares, pós pré-ligados e cerâmicos, como óxidos e nitretos, também podem ser usados na produção de compósitos [5].

Os pós de Al e Cu foram processados via Moagem de Alta Energia em um moinho do tipo SPEX vibratório, onde ele descrevia em sua movimentação um formato de 8 ou infinito. Para a realização da moagem, a jarra foi preenchida com álcool isopropílico de alta pureza para evitar qualquer risco de oxidação e proporcionar uma mistura eficaz, durante o tempo de moagem, que foi de 60 minutos para cada processamento. A quantidade de pó foi de 10g por moagem, ou seja, duas amostras para cada tipo de liga. Para o processo de moagem foram utilizados 100g de esferas de aço inoxidável para manter a relação 1:10 entre pó/esferas. Eles foram armazenados em um recipiente cilíndrico também de aço inoxidável que é denominada por jarra ou vial, a qual continha tampa rosqueada e recartilhada externamente, continha também anel de vedação do tipo O'ring para evitar vazamentos e contaminações.

Na figura 1(a) podemos visualizar a jarra ou vial, e o moinho vibratório do tipo SPEX na 1(b) utilizados no processo de fabricação das amostras.

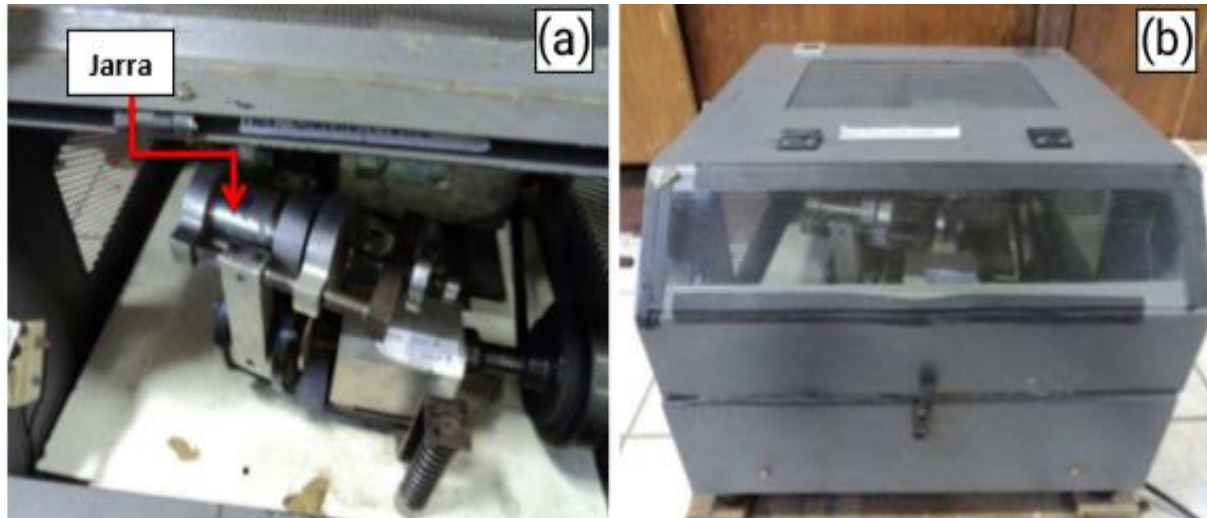


Figura 1. Jarra ou vial (a) Moinho do tipo SPEX (b). Fonte: (BEZERRA JÚNIOR, 2013).

## 2.2.2 Compactação Uniaxial dos Pós

O processo de compactação aplica forças uniaxiais ou biaxiais (que dependerá da complexidade do projeto) com o objetivo de chegar no formato desejado da peça em questão. Esta peça ainda não estará em sua fase final, pois necessita da sinterização. Ainda nesse estado, ela é conhecida como “compactado verde” e é caracterizada por ser quebradiça [11].

Neste sistema de compactação, usam-se prensas hidráulicas, que são projetadas especialmente para as técnicas de metalurgia do pó, pois necessitam de um maior controle em relação ao comprimento de curso e velocidade do processo. Necessitam também da existência de dispositivos ajustáveis para alimentação das matrizes e do pó e da existência de sistema para retirada do compactado [12].

O processo de compactação dos pós foi feito em uma prensa hidráulica que possui capacidade nominal de 100 toneladas. A pressão de compactação utilizada foi de 30 toneladas, mantida por tempo de 10 minutos. O tipo de compactação adotado foi uniaxial a frio.

## 2.2.3 Sinterização das Amostras

Após as peças serem submetidas ao processo de compactação para se obter o compactado verde, elas são colocadas em fornos contínuos onde primeiramente há o pré-aquecimento das peças. Após isso há uma manutenção da temperatura sempre abaixo do ponto de fusão do material matriz, para enfim concluir o processo de Sinterização. No resfriamento da peça, observa-se uma redução na sua porosidade em relação ao compactado verde, obtendo boa resistência mecânica, dureza e densidade desejada [12].

Os fatores mais importantes para uma sinterização eficaz são: temperatura, tempo, taxa de aquecimento, características das partículas e atmosfera do forno de tratamento térmico. As temperaturas utilizadas variam entre 2/3 a 3/4 do ponto de fusão da liga considerada, nesta etapa há retração e densificação do material, exceto para refratários porosos [5].

O processo de sinterização deve ser realizado em ambiente adequado para evitar possíveis fenômenos indesejados. Para isso, as chamadas atmosferas protetoras são empregadas, cujo objetivo é:

- Evitar a oxidação do material, precavendo possíveis reações químicas entre o compactado verde, que se caracterizam justamente pela presença de porosidade;
- Remover impurezas presentes, como é o exemplo de películas de óxido presentes tanto na superfície como na parte interna do compactado;
- Fornecer um ou mais elementos químicos para se ligarem com o material do compactado [5].

As amostras foram sinterizadas em um forno do tipo Mufla da marca JUNG, sob atmosfera de nitrogênio (N<sub>2</sub>) durante 5h e a uma temperatura de patamar de 500°C. A taxa de aquecimento do forno estava em 20°C/min e o resfriamento foi feito no próprio forno até este chegar à temperatura ambiente.

Na Figura 2, podemos visualizar o forno utilizado na etapa de sinterização.



Figura 2. Forno do tipo Mufla com atmosfera protetora de Nitrogênio. Fonte: (AUTOR, 2019).

## 2.2.4 Ensaio de Microscopia Ótica

Para que as amostras fossem analisadas via Microscopia Ótica, elas tiveram que ser submetidas a etapas preliminares de preparação, foram elas:

- Foi realizado um corte em cada amostra através de uma máquina tipo “cut-off” ISOMET marca BUEHLER com o objetivo de obter uma seção superficial e outra transversal das amostras.
- As amostras foram embutidas à quente em uma máquina de embutir da marca AROTEC modelo PRE 40Mi, a resina utilizada foi a denominada por baquelite que ao sofrer um aquecimento é polimerizada, e depois que resfria se transforma em um produto sólido que não retorna ao seu estado inicial, mesmo sendo aplicado a altas temperaturas novamente.
- Depois de embutidas, as amostras foram lixadas em lixa d’água de 400, 600 e 1200 respectivamente e polidas com pasta de diamante de 3 microns e pano de polimento. Para esses processos foi utilizada a politriz marca AROTEC modelo Aropol 2V.
- Para finalizar as etapas antes da MO, as amostras foram atacadas quimicamente usando Ácido Fluorídrico (0,5%) por um tempo de 15 segundos.

## 2.2.5 Ensaio de Microdureza Vickers

A Microdureza Vickers das seções superficiais de cada amostra foi analisada através de um Microdurômetro da marca Insize modelo ISH-TDV1000. A carga utilizada para as amostras foi de 300g (0,3kgf) com tempo de aplicação de 10 segundos. Para cada amostra foram feitas 5 impressões. Foram analisadas uma amostra da liga de Al AA1100, uma amostra da liga AA2014 Al4%Cu e uma amostra da liga AA2014 Al5%Cu.

## 2.3 RESULTADOS

### 2.3.1 Ensaio de Microscopia Ótica

No ensaio de microscopia ótica, foram utilizadas uma amostra da liga de Al AA1100, uma amostra da liga AA2014 Al4%Cu e uma amostra da liga AA2014 Al5%Cu. Para todas as ligas de Al-Cu, ficou nítido o aumento das fraturas em relação a liga AA1100, devido a incorporação do cobre, que tornou mais frágil a matriz de alumínio. Verificou-se morfologia de grãos aproximadamente equiaxial; os contornos de grãos não ficaram muito bem evidenciados e definidos como no caso da liga AA1100 devido ao processo de moagem de alta energia que introduziu deformação e distorções no material.

A Figura 3 (a, b, c, d) apresenta o resultado da microscopia ótica na amostra da liga de alumínio AA1100, da seção superficial da amostra. Foi possível observar que os contornos de grão são bem definidos e evidenciados.

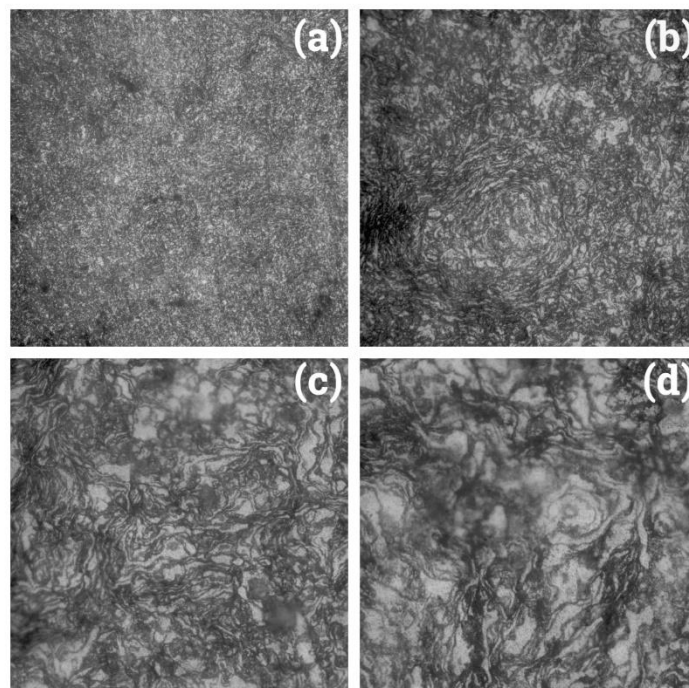


Figura 3. Seção superficial da liga AA1100 (a) aumentada 50x (b) 200x (c) 500x (d) 1000x. Fonte: (AUTOR, 2019).

A Figura 4 (a, b, c, d) apresenta o resultado da microscopia ótica na amostra da liga de alumínio AA2014 Al4%Cu das seções superficiais e transversais. Para esta MO, foi possível verificar, tendo como base as literaturas consultadas para a formação



deste trabalho, que as áreas mais claras possuem maiores quantidades do elemento introduzido na matriz, o cobre, quando comparado às áreas mais escuras ([4];[8]).

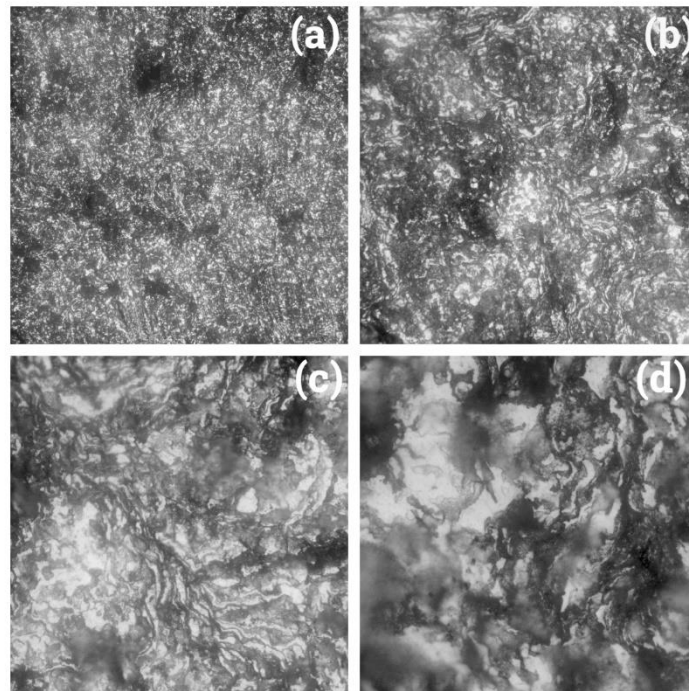


Figura 4. Seção superficial da liga 2014 Al4%Cu (a) aumentada 50x (b) 200x (c) 500x (d) 1000x.  
Fonte: (AUTOR, 2019).

A Figura 5 (a, b, c, d) apresenta o resultado da microscopia ótica na amostra da liga de alumínio AA2014 Al5%Cu da seção superficial.

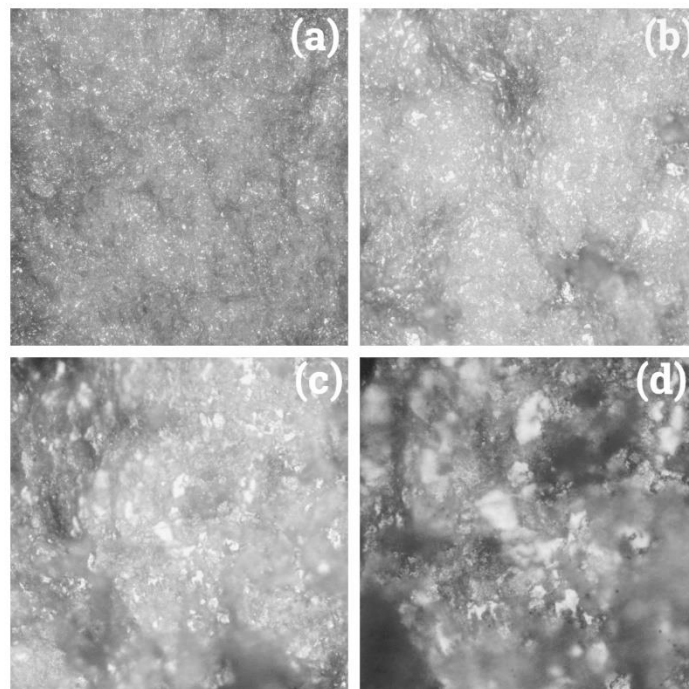


Figura 5. Seção superficial da liga 2014 Al5%Cu (a) aumentada 50x (b) 200x (c) 500x (d) 1000x.  
Fonte: (AUTOR, 2019).

Notou-se também uma distribuição bem equilibrada, mostrando que a Moagem de Alta Energia é um processo eficiente para a diminuição do tamanho das partículas presentes na liga e para a incorporação das mesmas. Isso garante um material com menor porosidade e propriedades mecânicas superiores, coerente com a teoria dos compósitos produzidos via metalurgia do pó (MP).

### 2.3.2 Ensaio de Microdureza Vickers

No ensaio de Microdureza, foram utilizadas uma amostra da liga de Al AA1100, uma amostra da liga AA2014 Al4%Cu e uma amostra da liga AA2014 Al5%Cu. Podemos visualizar na Tabela 2, o crescente incremento na microdureza da amostra quando se é adicionado o Cu como elemento de liga.

Tabela 2. Microdurezas e incremento das seções superficiais das amostras. Fonte: (AUTOR, 2019)

AMOSTRAS	SEÇÃO SUPERFICIAL	
	MÉDIA DA MICRODUREZA (HV)	INCREMENTO NA MICRODUREZA (%)
AA1100	16,038	0%
Al4%Cu	66,954	317,48%
Al5%Cu	68,126	324,78%

### 3. CONCLUSÃO

As amostras tanto da liga Al AA1100 como da AA2014 com teores distintos de cobre foram fabricadas com êxito, seguindo todas as etapas da metalurgia do pó: Moagem de alta energia, compactação uniaxial à frio e sinterização em atmosfera de nitrogênio. O ensaio de Microdureza Vickers das amostras de Al4%Cu e Al5%Cu evidenciou que o aumento da dureza é diretamente proporcional a adição de cobre à matriz de alumínio. A média das Microdurezas superficiais da liga Al AA1100 foi de 16,038 HV, enquanto a amostra com adição de 4% de Cobre obteve um incremento na dureza de 317,475% com uma média de 66,954 HV. A amostra com 5% de cobre mostrou uma média de 68,126 HV, tendo um incremento de 324,781% em relação a liga Al AA1100. Para as imagens da Microscopia Ótica, foi possível observar que a liga Al AA1100 possui contornos de grão bem definidos, enquanto as ligas de Al-Cu com teores distintos de Cu não possuem contornos muito bem evidenciados devido ao processo de moagem de alta energia que introduziu deformações e soldagem das partículas. Notou-se também que a distribuição entre a matriz e o material adicional é bem equilibrada, confirmando que a Moagem de Alta Energia é um processo bastante eficiente para a diminuição do tamanho das partículas presentes na liga e para a incorporação e homogeneidade das mesmas. Isso garante um material com menor porosidade e propriedades mecânicas superiores, coerente com a teoria dos compósitos produzidos via Metalurgia do Pó.

## REFERÊNCIAS

- 1 ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Fundamentos e aplicações do alumínio . São Paulo - SP: Associação Brasileira do Alumínio, 2007.
- 2 COUTINHO, Telmo de Azevedo. Metalografia de não-ferrosos: análise e prática. São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher, 1980.
- 3 BEZERRA JÚNIOR, Carlos Augusto.. Fabricação de Compósitos da Liga de Alumínio AA2124 com Reforço de Nitreto de Silício Através de Técnicas de Metalurgia do Pó . 2013. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Mecânica , Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2013.
- 4 BARBOSA, Cássio. Metais não-ferrosos e suas ligas – microestrutura, propriedades e aplicações . Barra da Tijuca - RJ: E-papers, 2014.
- 5 CHIAVERINI, Vicente. Metalurgia do pó. São Paulo - SP: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, 1992.
- 6 DELARBRE, P; KREHL M. Applications of p/m aluminum parts – materials and processing schemes. Proc. 2nd International Conference on Powder Metallurgy. 2000.
- 7 KAZMIERCZAK, Kamila. Análise das propriedades do compósito de aa2014 reforçado com nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, produzido via metalurgia do pó. 2014. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville - SC, 2014.
- 8 DURMUS, Hulya; Meriç, Cevdet. Age-hardening behavior of powder metallurgy AA2014 alloy. Manisa - Turquia: Materials and desi
- 9 SADELER, R; TOTIK, Y; GAVGALI, M; KAYMAZ, I. Improvements of fatigue behavior in 2014 alloy by solution heat treating and age-hardening. Elsevier Science. 2003. ISSN 0261-3069.
- 10 ARENHARDT, Sandro Luís; SILVA, Magno; GARCIA, Guilherme; MARTINS, Vinícius; ROCHA, Alexandre.. Estudo do comportamento do alumínio (al) com adição de 1% cobre (cu) obtido pela metalurgia do pó convencional. Ciências & Engenharia (Science & Engineering Journal). 2015. ISSN 1983-4071.
- 11 FOGAGNOLO, J.B; RUIZ-NAVAS, E.M; ROBERT, M.H; TORRALBA, J.M. The effects of mechanical alloying on the compressibility of aluminum matrix composite powder. Materials science and engineering a355. 2003.
- 12 SILVA, Tarsila Tenório Luna . Manufatura e caracterização de ligas de alumínio cobre (duralumínio) fabricadas via técnica de metalurgia do pó . 2017. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife- PE, 2017