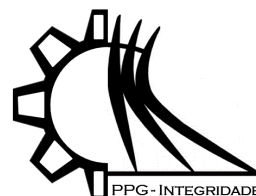




SSN 2447-6102



Article

Influência dos parâmetros de pressão de compactação e tempo de moagem na obtenção da liga Al_4Cu pelo processo de metalurgia do pó

Jesus, L. C. C.^{1*}, Grossi, L.¹, Brandão, S. M.¹, Mutterle, P.V.¹, Rodrigues, E.¹, Saraiva, J.I.S.¹, Luz, S. M.² e Silva, W. R.¹.

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, CEP: 70910-900, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

² Faculdade do Gama - Universidade de Brasília, CEP: 72444-240, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

* Correspondence: luizquimica@gmail.com

Received: 25/11/2019; Accepted: 29/12/2019; Published: 25/01/2020

Resumo. A metalurgia do pó é um processo de fabricação importante na obtenção de peças de geometria variadas, tornando-se viável na indústria em geral em grande escala de produção em alguns casos com o tratamento superficial posterior. O objetivo desse trabalho é demonstrar a influência dos parâmetros de pressão de compactação e tempo de moagem na obtenção da liga Al_4Cu pelo processo de metalurgia do pó. Para tanto foram avaliadas a densificação, a microestrutura e a microdureza obtida na liga. Foram preparadas duas amostras de pós metálicos que foram misturadas/moidos por duas horas e por quatro horas, em baixa rotação, 250 rpm, depois compactadas unilateralmente a frio com a pressão de compactação de $1,5 \text{ tf/cm}^2$ para $1,1 \text{ tf/cm}^2$ respectivamente e sinterizadas 610°C . Em cada etapa do processo foram medidas as densidades para avaliar o percentual de densificação de cada amostra. A microestrutura foi verificada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possibilitando visualização da quantidade e do tamanho dos poros, bem como a forma e o tamanho dos grãos, além da medição de dureza Vickers. Os resultados demonstraram que a densificação final obtida no sinterizado foi baixo nas duas amostras em comparação com a densidade teórica da liga, porém observou-se claramente que a pressão de compactação influenciou neste aspecto. Outro fato que ficou evidente é que o tempo de moagem afeta diretamente a qualidade dos sinterizados, como homogeneidade dos elementos na liga, porosidade e microdureza.

Palavras chaves: Metalurgia do pó, Alumínio, Cobre e Ligas.

Influence of the compaction pressure and grinding time parameters on the Al_4Cu alloy by the powder metallurgy process

Abstract: Powder metallurgy is an important manufacturing process in obtaining various pieces of geometry, making it feasible general industrial large-scale production in some cases with subsequent surface treatment. The objective of this work is demonstrate is to demonstrate the influence of compaction pressure parameters and grinding time in getting the league Al_4Cu by powder metallurgy process. Therefore, we evaluated the densification, and microstructure microhardness obtained in the alloy two metallic powders of samples were prepared which were mixed / milled for two hours and for four hours at low rpm , 250 rpm , after unilaterally compacted with cold compacting pressure of 1.5 tf / cm^2 to 1.1 tf / cm^2 respectively and sintered 610°C . In each step of the process densities were measured to evaluate the percentage of densification of each sample. The microstructure was observed by Scanning Electron Microscopy (SEM) allowing display of the quantity and pore size, and the shape and size of the grains, as well as Vickers hardness. The results showed that the final density achieved in the sintered samples was low in both compared to the theoretical density of the alloy, but is clearly noted that the compaction pressure influenced in this respect. Another fact that was evident is that the grinding time directly affects the quality of sinter, as homogeneity of the elements in the alloy, porosity and hardness.

Keywords: metallurgy, Aluminum, Copper and alloys.

1. Introdução

A metalurgia do pó é uma técnica muito utilizada na indústria automobilística, e também na fabricação de eletrodomésticos, considerada uma ótima solução para a produção de peças com baixo custo e boa precisão (Moro e Auras, 2007).

Entre suas principais vantagens está o fato da redução ao mínimo das perdas de matéria prima e o bom acabamento superficial das peças. Por outro lado tem a desvantagem da forma geométrica da peça ser limitada (Moro e Auras, 2007).

Segundo Lourenço (2006), a tecnologia da Metalurgia do Pó baseia-se na prensagem de pós em moldes metálicos e consolidação da peça por aquecimento controlado. O resultado é um produto com a forma desejada, bom acabamento de superfície, composição química e propriedades mecânicas controladas. A metalurgia do pó torna-se um processo importante na obtenção de peças de geometria complexa tornando-se cada vez mais utilizada e viável. O processo da metalurgia envolve quatro etapas fundamentais: a obtenção, a mistura (moagem de alta energia), compactação e a sinterização dos pós, como o do alumínio e cobre.

O alumínio é obtido a partir da bauxita, que pode ser $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ($Al(OH)_3$) e $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ($Al(OH)_3$). O alumínio é extraído geralmente pelo processo de *Hall-Héroult*. O Al_2O_3 é fundido misturado com criolita, $Na_3[AlF_6]$, e é eletrolisado num tanque de aço revestido de grafita. A cela funciona continuamente, e a certos intervalos o alumínio fundido (PF de 660 °C) é removido do fundo da célula. (Shriver e Atkins, 2008). Já o pó de alumínio é produzido via atomização a gás. Este processo usa como elemento desintegrador do metal líquido uma substância gasosa, como ar, argônio, hélio e etc (Chiaverini, 2001).

O cobre é produzido a partir do minério calcopirita, $CuFeS_2$. Ela apresenta um brilho característico e tem aparência semelhante à da pirita, FeS_2 (o "ouro dos tolos"), mas com uma coloração próxima da do cobre. Outros minérios são o sulfeto de cobre, carbonato básico de cobre, óxido cuproso e a bornita (Lee, 1996). O pó de cobre também é gerado por atomização a gás (Chiaverini, 2001).

Logo após a escolha e pesagem dos pós e o lubrificante (estearato de zinco), é feito a Moagem de Alta Energia (MAE). Esta é uma técnica de processamento de pós que permite a produção de materiais homogêneos partindo da mistura de pós elementares. O moinho tem o princípio de funcionamento consiste em um recipiente, contendo bolas de moagem e o material a ser moído, vibrando simultaneamente em torno dos três eixos, gerando uma elevadíssima frequência de choques entre as bolas e as paredes do recipiente (Suryanarayana, 2001). No início do processo de moagem, as partículas frágeis são fragmentadas e as partículas dúcteis tornam-se achatadas por um processo de micro forjamento. As partículas achatadas sofrem soldagem, enquanto as partículas frágeis são distribuídas na superfície do material mais mole (Nowosielski, 2005). Com isso, há um aumento do tamanho de partícula. As partículas também sofrem fraturas, as quais tendem a refiná-las. Em um segundo estágio do processo, a fratura torna-se mais comum que a soldagem das partículas. Com o decorrer da moagem, ambos os fenômenos, soldagem e fratura, entram em equilíbrio e o tamanho de partícula segue praticamente constante. O material frágil depositado na superfície do material dúctil é incorporado em sua matriz. Em estágios extremos, ocorre a amortização do material (Suryanarayana, 2001); conforme se aumenta o tempo de moagem, diferentes mecanismos atuam sobre o pó (mudança do formato de partícula, soldagem e fratura), modificando o tamanho de partícula e consequentemente a porosidade dos componentes produzidos a partir deste material. O entendimento de como a moagem de alta energia influencia características dos produtos e processos da metalurgia do pó é um caminho para diminuir o tempo de formulação de projetos, bem como reduzir a quantidade de refugo devido a componentes com propriedades insuficientes.

Depois da moagem é feito a compactação que consiste na aplicação de pressão nos pós no interior das matrizes à temperatura ambiente. Essas matrizes normalmente possuem as cavidades de acordo com a forma e dimensões da

peça final (Chiaverini, 2001). A pressão de compressão pode ser mecânica ou hidráulica. Assim, a compactação ocorre por deslocamentos simultâneos dos punções superior e inferior. Nos primeiros movimentos do punção, a compactação causa apenas o adensamento do pó, sem deformação das partículas e sem produzir adesão entre elas. Se o processo for interrompido, o pó não manterá uma forma com contornos definidos. Após a etapa de compactação, a peça é chamada de "compacto verde". A densidade e a resistência passam a ser duas características de grande importância nesta etapa, pois podem influenciar nas propriedades mecânicas da peça final (Chiaverini, 2001). Mesmo quando se utilizam pós pré-ligados, há necessidade de se adicionarem lubrificantes sólidos (estearato de zinco, por exemplo) para diminuir o atrito entre os componentes do ferramental de compactação. Outro detalhe importante é chamada "zona neutra", que é a região onde as partículas de pó menos sofrem influência do processo mecânico da compactação. Em muitos casos, a localização da zona neutra inviabiliza a produção de peça em sinterizados. Em outros, como numa peça com geometria complexa, não se consegue, em torno dessa zona, grande compactação compatível com as outras regiões da peça, tornando-a inexequível (Esswein Junior, 2009).

E por fim é feito a sinterização. Durante essa, a porosidade da estrutura é fechada e ocorre a difusão dos materiais metálicos. Para isto, material deve ser deslocado para preencher os espaços vazios. É justamente o modo como este material é deslocado que indica o tipo de sinterização. (Figueiredo, 2013).

E por fim temos a liga dos metais envolvidos no processo. O cobre é o principal elemento de liga do Alumínio. É usado em percentagens até 4%, em ligas de conformação plástica e até 8%, em ligas de fundição; nestas percentagens a melhoria das propriedades mecânicas deve-se à precipitação da fase θ (Cu Al_2) da solução sólida. O Cobre reduz a contração e permite o endurecimento por envelhecimento da liga; a resistência à corrosão destas ligas é muito fraca (Ferreira, 2012).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de parâmetros como o tempo de moagem e a pressão de compactação na obtenção da liga Al_4Cu via metalurgia do pó.

2. Materiais e Métodos

2.1. Caracterização dos pós metálicos

A caracterização da morfologia e composição química dos pós elementares de alumínio e cobre foram realizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)/ Espectroscopia por Energia de Raios-X (EDS) da marca JEOL. Pela análise de EDS determinou-se a composição química exata de cada pó, e assim, seu grau de pureza.

2.2. Moagem

Inicialmente pesou-se os pós de alumínio e cobre respeitando a porcentagem em peso de cada elemento na liga sendo respectivamente, 96% e 4%. Como lubrificante foi utilizado o estearato de zinco, na proporção de 1% em peso. A moagem foi realizada no moinho de bolas planetário da marca *Retsch*. A razão bola-pó utilizada foi de 10:1. Com o intuito de comparação realizou-se dois testes, denominados (A) e (B). O teste (A) foi realizado com um tempo de moagem de 2 horas e (B) de 4 horas. Em ambos os casos utilizou-se a rotação de 250 rpm, parando a cada 15 minutos durante 4 minutos, evitando assim, o superaquecimento da mistura. Após a moagem a mistura dos pós foi analisada no MEV com o intuito de observar se houve ligação mecânica entre os pós, e a morfologia das partículas. Também foi realizada a análise EDS do material para avaliar a porcentagem de cada componente. Com a mistura dos pós a densidade aparente foi calculada. Este cálculo é importante, pois a densidade aparente influencia de forma direta no preenchimento requerido da matriz com o pó, atingindo a densidade ideal do compactado. O valor da densidade aparente segundo Chiaverini (2001) é determinado calculando o peso de uma unidade de volume do pó solto ou a relação do peso para o volume, em g/cm^3 . Desta forma, calcularam-se as massas das misturas dos pós e seus respectivos volumes para os testes (A) e (B), obtendo as densidades aparentes.

2.3. Compactação

Para a compactação das peças utilizou-se uma matriz cilíndrica com as seguintes dimensões: altura de 30 mm, diâmetro externo: 25 mm, diâmetro interno: 13 mm. A matriz foi preenchida com a mistura moída e levada para a prensa, onde foi feita a prensagem uniaxial a frio em ciclos. Para verificar a influência da pressão de compactação nas características finais da liga foram utilizadas diferentes pressões sendo 1,5 tf/cm² para (A) e 1,1 tf/cm² para (B).

Com as peças compactadas foi possível calcular as densidades a verde dos compactados. Assim, as amostras foram pesadas e calculou-se o volume medindo-se as dimensões (diâmetro e altura) com um paquímetro digital. Os valores obtidos foram inseridos na equação do volume do cilindro, e posteriormente, calculou-se a razão massa sobre volume. Desta forma, foi possível obter os valores das densidades a verde dos compactados.

2.4. Sinterização

As amostras compactadas foram sinterizadas em forno tubular da marca Carbolite com atmosfera controlada de nitrogênio. Para determinar a temperatura de fusão da liga, e conseqüentemente, da sinterização, utilizou-se o diagrama de fases da liga Al4Cu (Faria, 2015). Como é necessário a retirada do estearato de zinco utilizado como lubrificante realizou-se a sinterização em duas etapas de acordo com o gráfico apresentado na Figura 1.

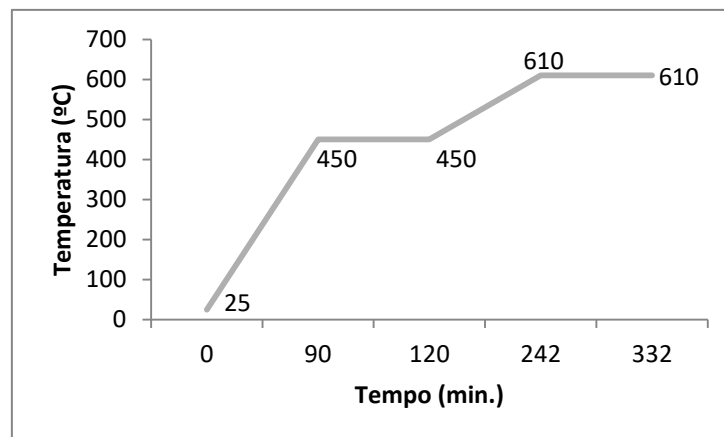


Figura 1: Representação gráfica das etapas da sinterização (curva de sinterização).

As amostras foram resfriadas no forno. O cálculo da densidade do sinterizado foi realizado através do método de Arquimedes. Neste utiliza-se a massa seca e a massa úmida da peça sinterizada, de acordo com a Eq. (1). Utilizou-se água como líquido de imersão para o cálculo da massa úmida (DiaS, 2013).

$$\rho_{sin} = \left(\frac{m_s}{m_s - m_u} \right) \rho_{liq} \quad (1)$$

Em que,

ρ_{sin} : densidade do sinterizado;

m_s : massa seca;

m_u : massa úmida;

ρ_{liq} : densidade do líquido no qual a peça foi imersa.

A temperatura da água era de 23°C, assim nesta temperatura a massa específica utilizada para o líquido foi de $\rho_{liq}=0,9947 \text{ g/cm}^3$.

2.5. Metalografia

Após o processo de sinterização foi realizada a preparação metalográfica. Inicialmente, as amostras foram cortadas no sentido transversal e longitudinal e embutidas a frio. A segunda etapa consistiu no lixamento com sequência granulométrica de 220 a 2400. Posteriormente, foi realizado polimento com pasta de diamante de 3 μm e alumina de 0,03 μm . Por fim, foram analisadas no microscópio confocal da marca Olympus.

2.6. Microdureza

O equipamento utilizado para o ensaio de microdureza foi o microdurômetro modelo FM-700 da marca Future-tech com carga de 200 g. Todos os ensaios foram realizados em quintuplicadas e foi feita a média aritmética e os desvios padrões dos valores encontrados em Vickers (HV).

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização dos pós metálicos

As morfologias dos pós foram obtidas via MEV. A Figura 2 apresenta as imagens dos pós elementares de Al (a) e (b); e Cu (c) e (d).

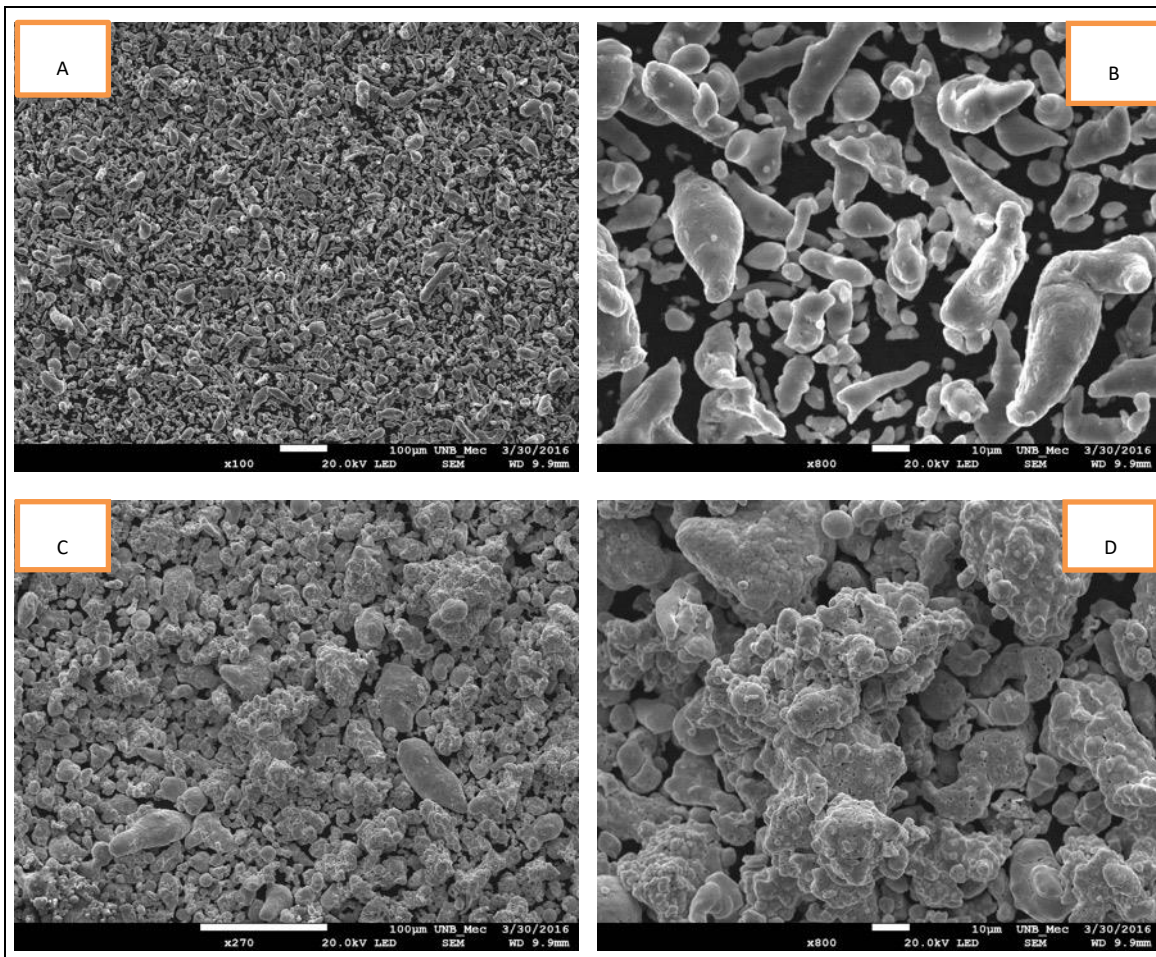


Figura 2: Pó de Alumínio com aumento de (a) 100x e (b) 800x e Pó de cobre com aumento (c) 270x e (d) 800x.

Com as imagens obtidas dos pós de Al e Cu, observa-se que o Al foi fabricado via atomização a água por possuir formato granular e o Cu via decomposição química uma vez que, possuem formato irregular e poroso (Lawley 1983).

Segundo Klar (1985) e Salgado *et al.*, (1991) os parâmetros de atomização influenciam a geometria e o tamanho da partícula. As partículas atomizadas a água apresentam uma forma bastante irregular, conforme pode ser verificada

na Figura 1. A geometria irregular provoca redução da densidade aparente, mas, em compensação, possibilita elevada resistência a verde.

3.2. Análise dos pós após a moagem

Após a moagem a densidade ρ aparente da mistura de pós metálicos de (A) e (B) foram calculadas. O valor encontrado para (A) foi de $\rho_{ap} = 1,2635 \text{ g/cm}^3$ e (b) de $\rho_{ap} = 1,0682 \text{ g/cm}^3$. Além disso, a mistura dos pós foi analisada no MEV para observar a formação de ligação mecânica através da moagem de alta energia. A Figura 3 apresenta as imagens obtidas da mistura após moagem de 2 horas (A) aumento de 100x (a) e 800x (b) e 4 horas (B), com aumento de 100 x (c) e 800 x (d).

Observa-se que na moagem realizada durante 4 horas ocorreu maior segregação das partículas em relação à moagem de 2 horas. Este fato é consequência da maior ocorrência de deformação plástica entre as partículas dos pós metálicos e consequentemente, a ligação mecânica foi mais eficaz, contribuindo posteriormente para uma melhor sinterização. Durante a moagem das misturas dos pós uma importante quantidade de deformação plástica das partículas metálicas é produzida, seguida por fratura, levando a um refinamento contínuo da microestrutura conforme a Figura 2 (Brito *et al.*, 2007). A utilização de pós ultrafinos e homogêneos podem melhorar efetivamente a sinterabilidade deste tipo de material (Martínez *et al.*, 2007 e Song *et al.*, 2008).

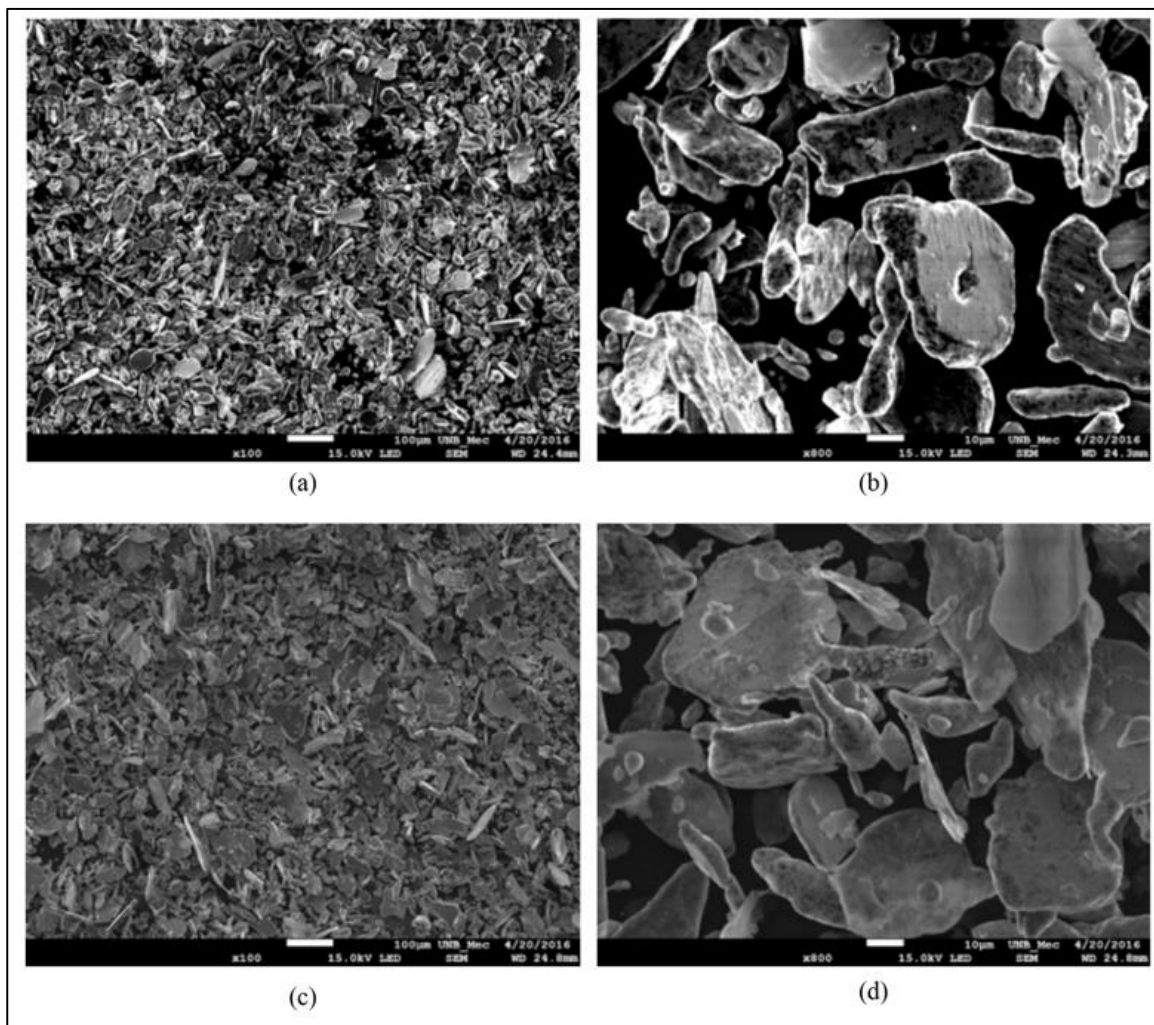


Figura 3: Mistura dos pós metálicos após moagem de 4 h (e) 100x e (d) 800x.

Knewitz, *et al.*, (2009), analisou o tempo de moagem de alta energia na produção de compósito Mo-Cu30% e pode verificar que a medida que o tempo de moagem aumenta o tamanho de partícula torna-se menor. Isso indica que o mecanismo de moagem sobrepõe o efeito de soldagem observado em moagem de alta energia.

Além das imagens realizada no MEV foram obtidas a análise de EDS para verificar e confirmar a composição aproximada dos pós após a moagem. Os gráficos da EDS podem ser observados na Figura 4 (a) corresponde à moagem de 2 horas (b) moagem de 4 horas. Estes apresentam a porcentagem em massa dos elementos presentes na amostra em uma determinada região. Os valores de cada amostra estão conforme o esperado.

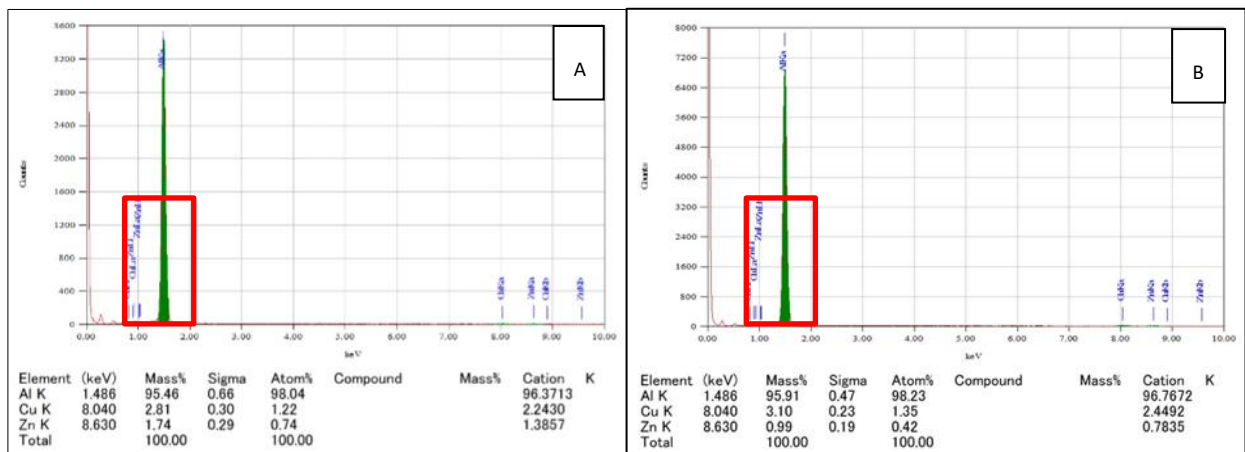


Figura 4: gráficos da EDS podem ser observados na Figura 4 (a) corresponde à moagem de 2 horas (b) moagem de 4 horas

3.3. Compactação

Após a moagem foram realizadas a compactação a frio e calculadas as densidades a verde de cada amostra. O compactado (A) apresentou densidade de $\rho_{verde} = 2,243 \text{ g/cm}^3$ e o (B) de $\rho_{verde} = 2,213 \text{ g/cm}^3$. Apesar do tempo inferior de moagem para mistura (A) as medidas de compressibilidade indicaram uma maior densificação a verde nesta amostra como consequência da aplicação da maior pressão.

Segundo Schwartzkopf (1947), a compressibilidade deve ser usado para indicar o grau de aumento da densidade de uma certa massa de pó ao se aplicar uma certa pressão, ao passo que compactibilidade é definida como a pressão mínima necessária para produzir um compacto com certa resistência a verde.

Aydin. *et al.*, (1997), verificou que a compactação de pós metálicos envolve transmissão de tensões via paredes da matriz e a propagação dessas tensões através da massa de pó. As partículas que compõem o pó distribuem as tensões por uma série de processos cinemáticos que envolvem movimentação, escorregamento, rotação, deformação e ruptura das partículas.

3.4. Sinterização e microscopia do sinterizado

Após a sinterização em atmosfera de nitrogênio foi realizado o corte e embutimento das amostras para a metalografia. As densidades dos sinterizados calculadas através da Eq. (1) foi de $\rho_{sint} = 2,472 \text{ g/cm}^3$ para (A) e $\rho_{sint} = 2,427 \text{ g/cm}^3$ para o sinterizado (B).

Ao realizar o comparativo das densidades obtidas em cada etapa do processo, conforme mostra as Figura 5 e 6, observa-se que na etapa de compactação a amostra (A) aumentou 77,5 % de sua densidade e amostra (B), aumentou 107,2% e na etapa de sinterização tanto a amostra (A) e (B) aumentaram apenas 10% de sua densidade. Já comparando com a densidade teórica a amostra (A) obtida atingiu apenas 83,9% e a amostra (B) 82,4%. Este fato explica-se devido a baixa pressão aplicada nas duas amostras, $1,5 \text{ tf/cm}^2$ $1,1 \text{ tf/cm}^2$, pois segundo Chiaverini, (2001),

pode-se atingir na sinterização, para o metal base utilizado neste, elevados valores de densidade: 90% da densidade teórica quando compactado entre 1,7 e 2,1 tf/cm² e 95% quando compactado a 3,5 tf/cm².

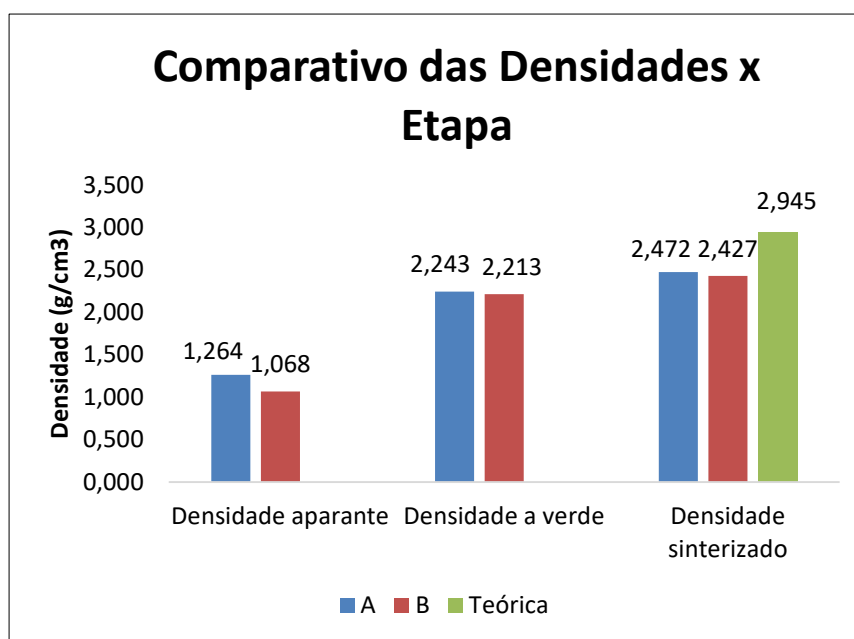


Figura 5: Densidades das amostras (A), (B) por etapa e teórica (JABUR *et. al.*, 2013).

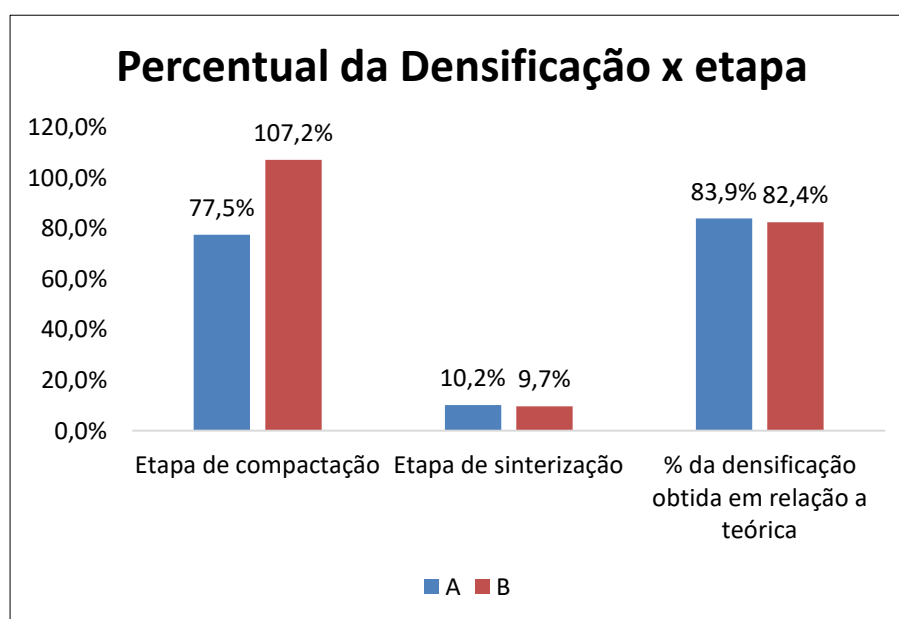


Figura 6: Percentual da densificação das amostras (A), (B) por etapa e com a teórica (JABUR *et. al.*, 2013).

Segundo Moro e Auras (2007), uma das características da sinterização é possibilitar o controle da porosidade do produto final. Durante este processo ocorrem reações químicas e físicas entre as partículas, reduzindo e em alguns casos até eliminando a porosidade existente no compactado verde. A contração do compactado verde, em comparação com a peça final, chega a ser de 40% do volume, sendo uma redução linear de cerca de 16%. Além disso, a densidade é um fator importante, devido à difusão dos gases através de seus poros (quanto maior a densidade menor é a porosidade).

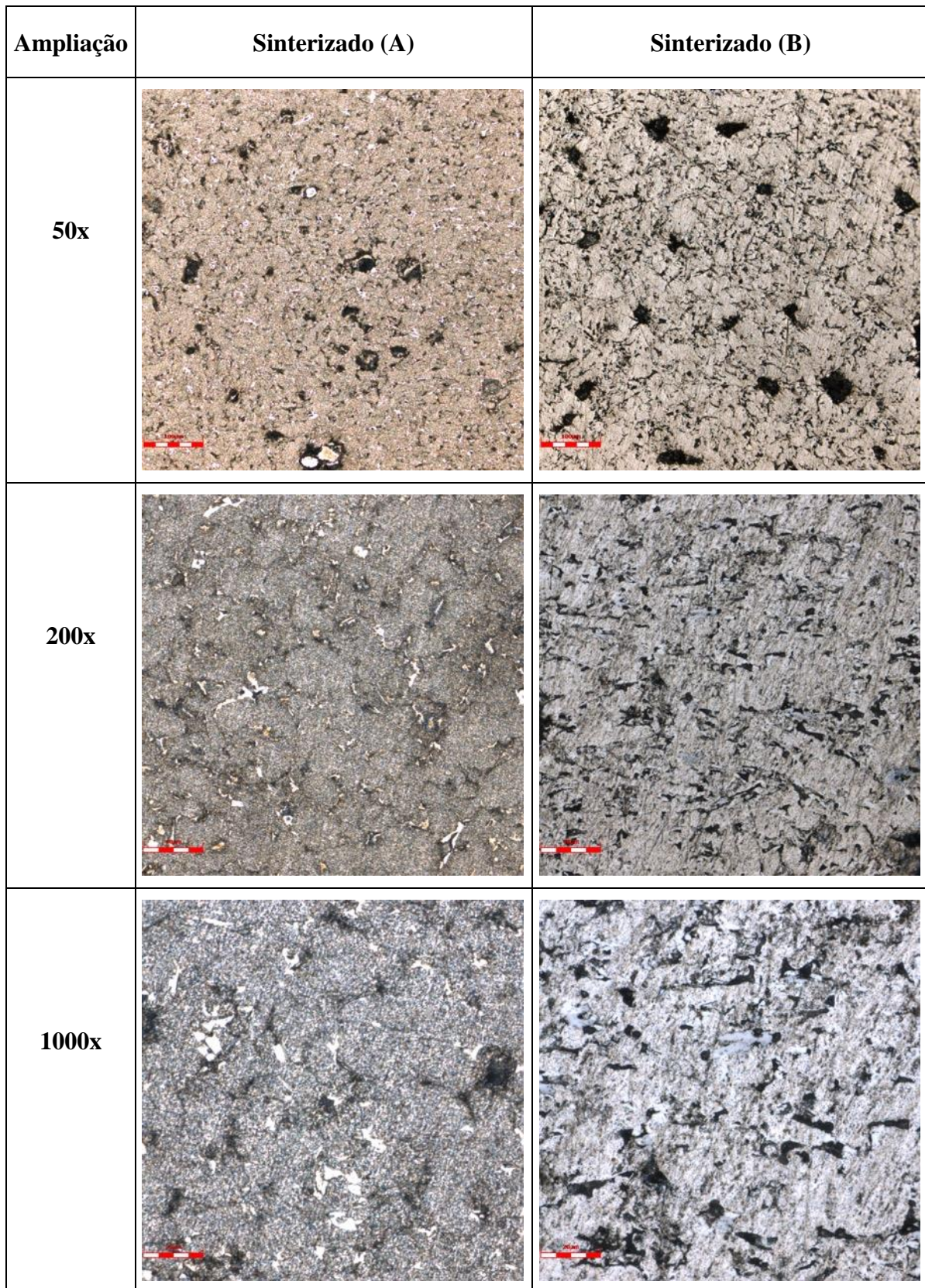


Figura 7: Comparação das microscopias dos sinterizados.

Além disso, foram realizadas as análises de microscopia com o microscópio Confocal para avaliar a eficácia da sinterização, bem como a observar a porosidade nas ligas obtidas.

Pela análise de MEV da Figura 7 pode se verificar que o material (A) teve pouca porosidade, porém uma sinterabilidade pouco eficaz. Já o material (B) teve uma boa sinterabilidade, entretanto ficou mais poroso, o que contribuiu com a redução na densificação final obtida.

Ainda de acordo com as imagens de MEV da Figura 7 observa-se que a amostra (A) possui pontos mais claros evidenciando a diferença de elementos comprovando que a sinterização não foi efetiva, diferente do que ocorreu na amostra (B). Este fato se deve principalmente ao tempo inferior de moagem de (A) em relação à (B). Observa-se também que na amostra (A) ocorreu a menor porosidade, devido a pressão de compactação de (A) ser superior a (B).

De acordo com Torres (2009), o aumento do tempo de moagem influencia significativamente na qualidade do sinterizado. Para Castagnet (2008), o aumento do tempo de moagem favorece a homogeneização das misturas ativas mecanicamente, diminuindo a compressibilidade, provavelmente em razão do maior encruamento.

3.5. Microdureza

Os valores encontrados da microdureza para (A) e (B) estão descritos na Tabela 1. Observa-se a diferença de microdureza entre as amostras comprovando a influência do tempo de moagem na obtenção da liga.

De acordo com Coelho (2003), a dureza do material aumenta com o aumento do tempo de moagem. O autor fez um estudo e verificou que a barra extrudada do pó de alumínio processado em 10 horas no moinho atritor, teve a dureza muito mais elevada do que o material processado em 5 horas em condições semelhantes. Segundo experiências observadas na literatura, este fato já era esperado, pois o material, conforme seu processo, moagem de alta energia, aumenta o encruamento, conseqüentemente, sua dureza aumenta. Por outro lado, a formação de fases intermetálicas com o aumento do tempo de moagem, contribui para a melhoria nas propriedades do material.

Tabela 1: Microdureza das amostras (A) e (B)

Amostra	Microdureza (HV)
A	29,84 ± 1,83
B	52,16 ± 1,63

Na amostra (A) a baixa dureza está relacionada com não formação da liga de forma homogênea, fato não observado na amostra (B) que adquiriu uma dureza mais elevada.

Segundo Brian (1991), o aumento da dureza é proporcional à quantidade e a natureza dos elementos de liga. Elementos de liga que possuem diferenças significativas de raios atômicos aumentam a dureza. Como no caso da amostra (A) a sinterização não foi eficaz, não houve formação de liga o que acabou diminuindo a microdureza do material.

4. Conclusão

A partir dos resultados obtidos pode-se dizer que o tempo de moagem afeta diretamente a qualidade dos sinterizados, como homogeneidade dos elementos na liga, a porosidade e a microdureza. Outro fato observado é que a pressão de compactação influenciou de forma direta principalmente na densificação das amostras, pois os valores de pressão utilizados foram abaixo da faixa teórica indicada e conseqüentemente os valores de densidade final obtidos ficaram abaixo do esperado para a liga. A avaliação desses parâmetros é fundamental para a determinação das propriedades mecânicas e conseqüentemente definir a sua correta aplicação.

Observa-se que processo de fabricação por metalurgia do pó torna-se viável quando se deseja produzir materiais para aplicações específicas, podendo, com a variação dos diversos parâmetros envolvidos, obter diferentes características para o mesmo material. Dessa forma, comprova-se que a técnica apresenta grande versatilidade e aplicabilidade em comparação com outros processos.

Referências

1. Aydin, I.; Briscoe, B. J.; Ozkan, N. Modeling of powder compaction – a review. *MRS Bulletin*, v.22, p.45-51, 1997.
2. Brian, J. W. High performance ferrous P/M materials for automotive applications - *Met. Powder Rep.*, v.46, n.9, September 1991.
3. Brito F. I. G.; Medeiros K. F.; Lourenço J. M. Um Estudo Teórico Sobre a Sinterização na Metalurgia do Pó. *Holos*, v. 3. p. 204-211, 2007.
4. Castagnet, Mariano. Avaliação da compressibilidade de mistura de pós de nióbio e alumínio ativadas mecanicamente. 2008. 81 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear, Ipen, São Paulo, 2008.
5. Chiaverini, V. Metalurgia do Pó: técnicas e produtos, 4ed., São Paulo, 2001.
6. Coelho, R. E., Lima, S. J. G., Ambrozio, F. Extrusion of aluminum alloys prepared from mechanical alloying powder, *Mat Sci. Forum. Switzerland*: v.416-18, p.176 - 182, 2003.
7. Dias, Maria Cely Freitas. Sinterização, microestrutura e condutividade elétrica com adições de SrO, TiO₂ e SrTiO₃. 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear-materiais, Ipen, São Paulo, 2013.
8. Esswein Junior, Jorge Alberto Lewis. Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais - Ppgem, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
9. Faria, Jonas Dias et al., Influência na microestrutura e na microdureza decorrente da adição de 4%Ag na liga Al-4%Cu solidificada unidirecionalmente. *Matéria (Rio J.)* [online]. **2015**, vol.20, n.4, pp.992-1007. ISSN 1517-7076. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620150004.0103>.
10. Ferreira, A. D. B. L.; *Resumo de materiais metálicos*, Cidade de Porto, 2012.
11. Figueiredo, Nathália Cândido. Caracterização metalúrgica de fases em uma liga Fe-30Ni processada por metalurgia do pó. 2013. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
12. Hezhou Y., Xing Y. L., Hanpin G. H. Fabrication of Metal Matrix Composites by Metal Injection Molding - A Review. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 200, p. 12-24, 2008.
13. Jabur, Adnan S.; AL-HAIDARY, Jafar T.; AL-Hasani, Emad S. Characterization of Ni-Ti shape memory alloys prepared by powder metallurgy. *Journal Of Alloys And Compounds*. Kerbala, Iraq, p. 136-148. 06 maio 2013.
14. Klar, E. Commercial water atomization of metals. *Met. Powder Rep.*, p.7-18, January 1985.
15. Lawley, A. Fundamentals of particulate metallurgy-in rapid solidification technology, *Source Book ASM*, p.47-72, 1983.
16. Lee, J. D. Química inorgânica não tão concisa. Tradução da 5ª ed. inglesa. Editora Edgard Blücher Ltda. pp. 24, 217, 360-370. 1999.
17. Lourenço, J. M.; Tese de doutorado: Sinterização a plasma, 2006.
18. Martínez V. P., Aguilar C., Marin J., Ordoñez S., Castro F. Mechanical Alloying of Cu-Mo Powder Mixtures and Thermodynamic Study of Solubility. *Materials Letters*, v. 61, p. 929-933, 2007.
19. Moro, Norberto; Auras, André Paegle. Processo de fabricação. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007. 28 p.
20. Salgado, L.; Ambrozio, F. F.; Neves, M. D. M.; Pola, E. J. G ; Souza, O. C. Characterization of Nickel-Copper alloy powders produced by atomization process. *Mater. Set Eng. A*, v. 133, p 692-697, 1991.
21. Schwartzkopf, P. Powder metallurgy: its physics and applications, Macmillan, New York, 1947.
22. *Shriver, D.F.; Atkins, PW; Química Inorgânica*, 4ª ed., Porto Alegre, Bookman, 2008.

23. Song P., Cheng J., Wan L., Zhao J., Wang Y., Cai Y. Preparation and Characterization of Mo-15 Cu Superfine Powders by a Gelatification-Reduction Process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008.
24. Souza, Sérgio A. de. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. 5.ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1982.
25. Suryanarayana, C. Mechanical alloying and milling, *Progr. Mater. Sci.*, v. 46, p. 1-184, 2001.
26. Torres, Camila dos Santos. *Estudo de moagem de alta energia e sinterização de metal duro WC-Ni*. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.