

REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE USINAGEM ATRAVÉS DE MOAGEM DE ALTA ENERGIA PARA A FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PÓS METÁLICOS DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6061*

Elton Ítalo Vieira Xavier¹
Lorene Ester Fernandes²
Diogo Monteiro do Nascimento³
Moisés Euclides da Silva Júnior⁴
Sandra Torres Zarzar⁵
Everthon Rodrigues de Araújo⁶
Oscar Olimpio de Araujo Filho⁷

Resumo

Foi estudada uma metodologia para o reaproveitamento de cavacos de usinagem na fabricação de pós metálicos da liga de alumínio AA6061. Na a fabricação dos pós foi utilizado uma técnica de mecanossíntese, a moagem de alta energia. Tanto as amostras dos pós fabricados quanto uma amostra de pó comercial, este atomizado, foram caracterizados quanto a morfologia e a composição por técnicas de análise de tamanho de partícula (ATP), MEV e EDS e comparadas entre si. Foram obtidos pós que apresentaram distribuição granulométrica unimodal, tamanho mediano de partícula comparável aos pós disponíveis comercialmente, e composição química definida para a liga AA6061.

Palavras-chave: Metalurgia do pó; Liga de alumínio, AA6061, Moagem de alta energia; Ligas de alumínio.

REUSE OF MACHINING CHIPS BY MECHANICAL ALLOYING FOR THE MANUFACTURE AND CHARACTERIZATION OF METALLIC POWDERS OF ALUMINUM ALLOY AA6061

Abstract

It was studied a methodology for the reuse of machining chips in the manufacture of metallic powders of aluminum alloy AA6061. In the manufacturing of the powders a high energy ball milling (HEBM) technique was used. The samples of the manufactured powders and a commercial powder sample were analyzed for morphology and composition by means of particle size analysis (PSA), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The powders obtained presented unimodal particle size distribution, average particle size comparable to commercially available powders, and chemical composition defined for the AA6061 alloy.

Keywords: Powder metallurgy, AA6061 Aluminum alloy, Mechanical alloying; Aluminum alloys.

- ¹ Graduando em Engenharia Mecânica, Bolsista de Iniciação Científica, Departamento de engenharia mecânica, UFPE, Recife, PE.
- ² Graduando em Engenharia Mecânica, Bolsista de Iniciação Científica, Departamento de engenharia mecânica, UFPE, Recife, PE.
- ³ Bacharel em Engenharia Mecânica, mestrando em engenharia mecânica, PPGEM, UFPE, Brasil
- ⁴ Bacharel em Engenharia Mecânica, mestrando em engenharia mecânica, PPGEM, UFPE, Brasil
- ⁵ Bacharel em Engenharia Civil, mestrando em engenharia mecânica, PPGEM, UFPE, Brasil
- ⁶ Licenciado em matemática, Doutor em Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, PE.
- ⁷ Bacharel em Engenharia Mecânica, Mestre em Engenharia Mecânica, Doutor em Tecnologia Nuclear - Materiais, Professor Adjunto, Departamento de engenharia mecânica, UFPE, Recife, PE.

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem das ligas de alumínio é bastante difundida industrialmente devido às vantagens econômicas em se produzir o metal secundário, por meio da refusão, quando comparada a produção do metal primário, a partir do refino da bauxita. Entretanto, quando se trata da reciclagem de cavacos de usinagem as perdas do metal por oxidação podem chegar a 40%, nesse caso a reciclagem no estado sólido, ou reciclagem direta, aparece como uma potencial alternativa para melhorar a eficiência de reciclagem. [1, 2]

Na reciclagem do alumínio no estado sólido, assim como de outros metais, um dos métodos de processamento utilizados é a metalurgia do pó, entretanto a morfologia do resíduo a ser reciclado, tais como os cavacos de usinagem, deve antes ser refinada a forma de pó, que é o material de partida para este processo. Uma técnica de mecanossíntese que pode ser utilizada para o refino destes resíduos e que comumente serve de pré-processamento à metalurgia do pó é a moagem de alta energia. Esta técnica promove através de um processo repetitivo de fratura e soldagem das partículas processadas a homogeneização e a redução do tamanho das mesmas. [3, 4]

A moagem de alta energia é uma técnica de processamento que é utilizada para a produção e preparação da matéria prima da metalurgia do pó, esta técnica pode ser utilizada para fabricar pós metálicos a partir de partículas maiores, tais como cavacos de usinagem. O tempo de processamento na moagem de alta energia é um dos parâmetros que vai influenciar diretamente no tamanho e na morfologia dos pós obtidos e estas características são variáveis de influência direta na qualidade do pó fabricado e nas propriedades dos componentes processados posteriormente pela metalurgia do pó. [5, 6]

Para a caracterização dos pós metálicos são utilizadas técnicas de microscopia e de análise de tamanho de partícula. A técnica de granulometria a laser é muito utilizada devido à sua flexibilidade de uso, podendo ser realizada em ar, água e emulsões; grande amplitude de análise, podendo detectar partículas de 0,05 a 3500 μm ; e pela facilidade e rapidez na execução. Neste método as partículas são dispersas em um fluido em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluido, estas são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partícula. [7] A microscopia eletrônica de varredura é uma das técnicas de caracterização mais utilizadas hoje em dia encontrando aplicações em engenharia de materiais e metalúrgica, tais como: análises micromorfológicas, morfologia de pós e identificação de fase, na técnica a superfície da amostra é varrida por um feixe de elétrons, o feixe refletido então é captado por detectores que são responsáveis por gerar micrografias da superfície a ser analisada. [8]

Neste contexto, este trabalho visa o estudo de uma metodologia para a fabricação de pós metálicos da liga de alumínio AA6061, a partir de cavacos de usinagem, busca-se por meio da técnica de moagem de alta energia fabricar pós com características que viabilizem o seu uso como matéria prima na metalurgia do pó e comparar os pós fabricados com os disponíveis comercialmente para esse fim. Os pós fabricados foram avaliados quanto ao tamanho, morfologia e composição química, utilizando técnicas de granulometria a laser, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os cavacos da liga de alumínio AA6061 foram captados de um processo convencional de usinagem, o torneamento cilíndrico externo. Os cavacos foram limpos em solução de álcool isopropílico e levados a uma estufa para a secagem. Para a otimização do tempo necessário à cominuição dos cavacos até a forma de pó durante a moagem de alta energia, esses foram particionados manualmente com um alicate de corte, obtendo-se cavacos com uma dimensão característica de cerca de 3mm.

A moagem de alta energia para a fabricação dos pós foi realizada em um moinho vibratório, do tipo *Spex*, disponível no laboratório de metalurgia do pó da UFPE, como meio de moagem foram utilizadas esferas (aço SAE 52100) e jarra de aço inoxidável AISI 304L, o ferramental necessário ao processamento é mostrado na figura 1.

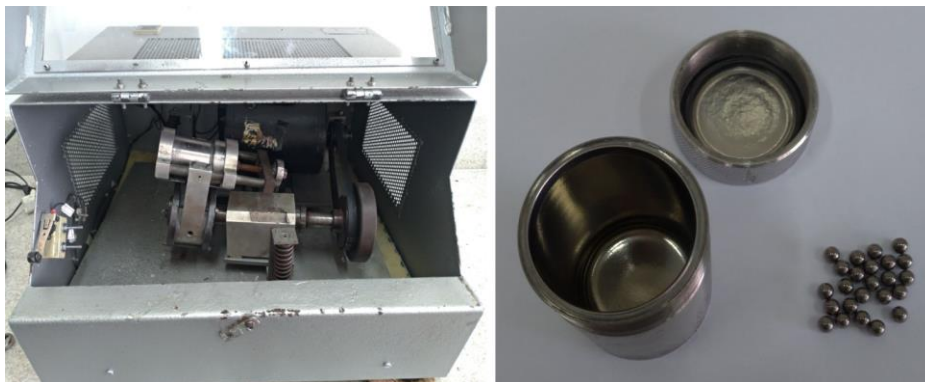


Figura 1. Equipamento utilizado no processamento via moagem de alta energia. (a) Moinho vibratório. (b) Meio de moagem.

Para a fabricação dos pós as jarras foram carregadas com 10 gramas de cavaco e 100 gramas de esferas caracterizando a moagem com um BPR (razão bolas-carga) de 10:1, adicionalmente foi utilizado 0,2 gramas (2% da amostra) de ácido esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$) no carregamento das jarras, o ácido esteárico atua como agente controlador do processo (*PCA – Process Control Agent*) na moagem de alta energia e tem a função de controlar a tendência de soldagem a frio das partículas de alumínio por meio da diminuição da energia superficial das mesmas, além de atuar como um lubrificante sólido durante o processamento.

Foram fabricadas duas amostras de pó distintas para posterior caracterização, sendo que estas diferem apenas por um parâmetro de moagem, o tempo de processamento utilizado na sua fabricação, sendo realizadas moagens com 2 e 4 horas. A figura 2 mostra evolução dos cavacos durante o processamento, desde a sua captação do processo de torneamento até os pós processados por moagem de alta energia que foram obtidos.

Nas duas amostras do pó produzido e uma amostra do pó comercial, este atomizado a ar comprimidos, foi realizada a Análise do Tamanho de Partícula (ATP) em meio aquoso, para isso foi utilizado um analisador granulométrico a laser, marca *Malvern Panalytical* e modelo *Mastersizer 2000*, disponível no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFPE.

A caracterização da morfologia dos pós produzidos foi realizado por MEV, para tal foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura com detector EDS, marca *TecScan* e modelo *Mira3*, disponível no laboratório de microscopia da UFPE.

No microscópio eletrônico de varredura com a utilização do detector de elétrons secundários (SE) foram geradas micrografias das amostras com aumentos de 200x, 500x, 1000x, 2000x e 3000x, nestas imagens pode-se observar o aspecto e a morfologia das partículas dos pós produzidos e compará-los com a amostra atomizada que também foi avaliada nas mesmas condições.

Com a utilização do Espectrômetro de Difração de Energia (EDS), foi realizada a detecção e o mapeamento dos raios-x característicos por EDS, este procedimento utiliza as imagens do MEV e gera um espectro das energias dispersivas em uma região da amostra, o que permite identificar os elementos químicos presentes, bem como sua composição. Por esta técnica avaliou-se a composição das amostras de pó produzidas, de modo que se pode comparar com a composição definida para a liga AA6061.

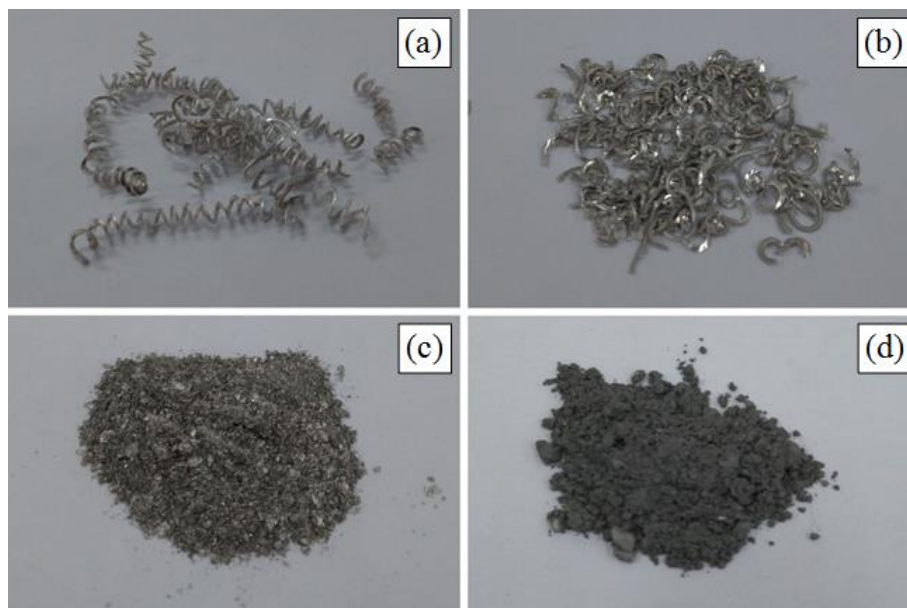


Figura 2. Evolução da morfologia do cavaco durante o processo de obtenção dos pós. (a) Após usinagem. (b) Após particionamento manual. (c) Após 2h de moagem. (d) Após 4h de moagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de Tamanho de Partícula

Por meio da análise granulométrica a laser obteve-se a distribuição do tamanho de partícula para cada um dos pós processados a partir do cavaco pela moagem de alta energia, e também, para efeito de comparação, a distribuição para a comparação com o pó comercial. Através dessa análise pode-se caracterizar as amostras quanto ao tipo de distribuição e quanto ao tamanho mediano das partículas. As distribuições para as três amostras são mostradas nas figuras 3, 4 e 5.

d(0.1): 13.443 um d(0.5): 75.307 um d(0.9): 281.690 um

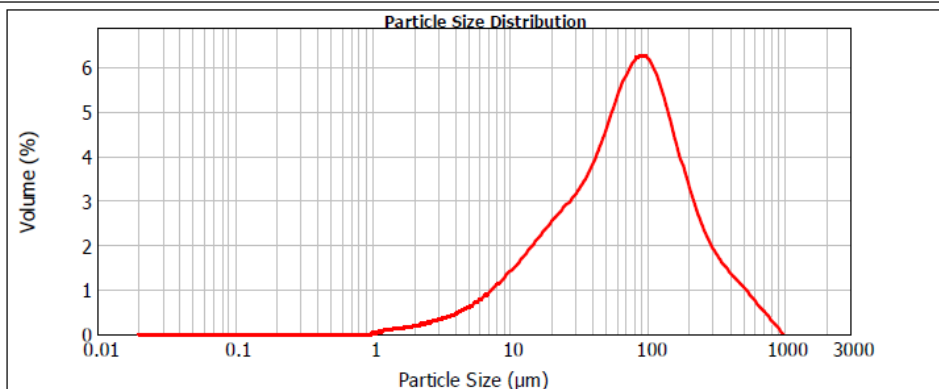


Figura 3. Distribuição do tamanho de partícula para o pó obtido com 2 horas de moagem.

d(0.1): 3.539 um d(0.5): 10.581 um d(0.9): 30.477 um

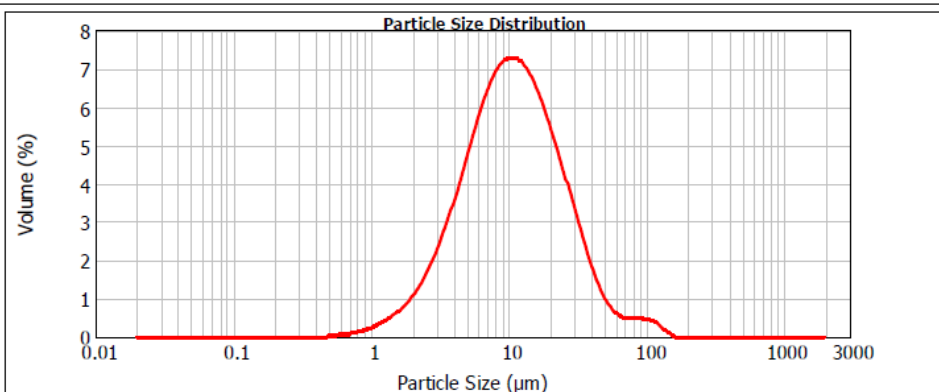


Figura 4. Distribuição do tamanho de partícula para o pó obtido com 4 horas de moagem.

d(0.1): 53.246 um d(0.5): 84.151 um d(0.9): 133.892 um

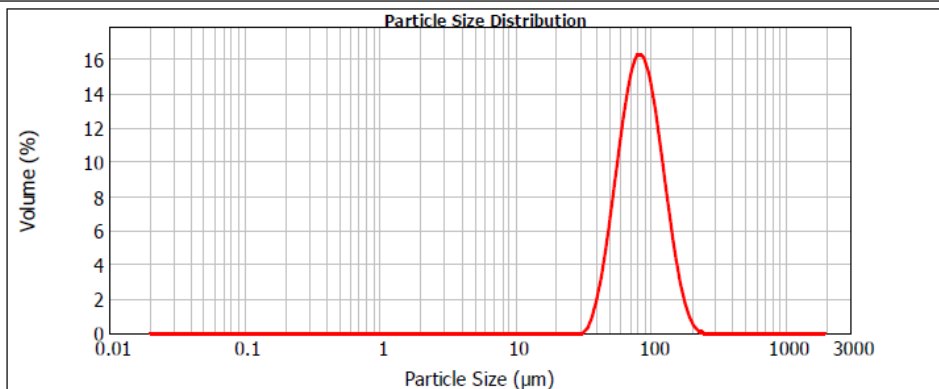


Figura 5. Distribuição do tamanho de partícula para o pó comercial (atomizado à gás).

Em relação à distribuição do tamanho de partícula das amostras pode-se observar que os dois pós fabricados apresentaram uma distribuição unimodal, ou seja, apresentaram apenas um pico nas representações gráficas mostradas anteriormente, esta característica é um fator positivo para utilização dos pós como matéria-prima na metalurgia do pó, pois tende a uniformizar a densidade do compactado. Entretanto os pós fabricados apresentaram dispersão maior (desvio padrão) em relação ao valor médio, o que tende a diminuir a densidade aparente destes, quando comparados ao pó comercial. [9]

No que concerne ao tamanho das partículas, o tempo de processamento de duas horas obteve um tamanho médio de partícula de $75,307\mu\text{m}$. Este tempo de moagem já foi suficiente para a obtenção de um pó com tamanho próximo a amostra comercial que apresenta um tamanho médio de $84,151\mu\text{m}$. A amostra processada por quatro horas apresentou um tamanho médio de partícula de $10,581\mu\text{m}$, sendo este um pó bem menor em relação ao praticado convencionalmente na metalurgia do pó e do qual se espera melhor desempenho na fase de sinterização devido a sua alta energia superficial. No entanto, pós finos tem utilização na fabricação de componentes por uma técnica de Moldagem Por Injeção de Pós Metálicos (MIM) [9, 10]

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Utilizando-se uma técnica de microscopia eletrônica de varredura obteve-se as imagens das amostras estudadas. Através destas micrografias podemos analisar a morfologia das partículas dos pós fabricados e do pó comercial e compara-las entre si. A morfologia dos pós é uma variável de interesse no processo de fabricação através de técnicas de metalurgia do pó, partículas com uma morfologia equiaxial (próximo ao esférico) apresentam maior densidade aparente e melhor densificação na compactação, levando a melhores propriedades mecânicas. [9, 11]

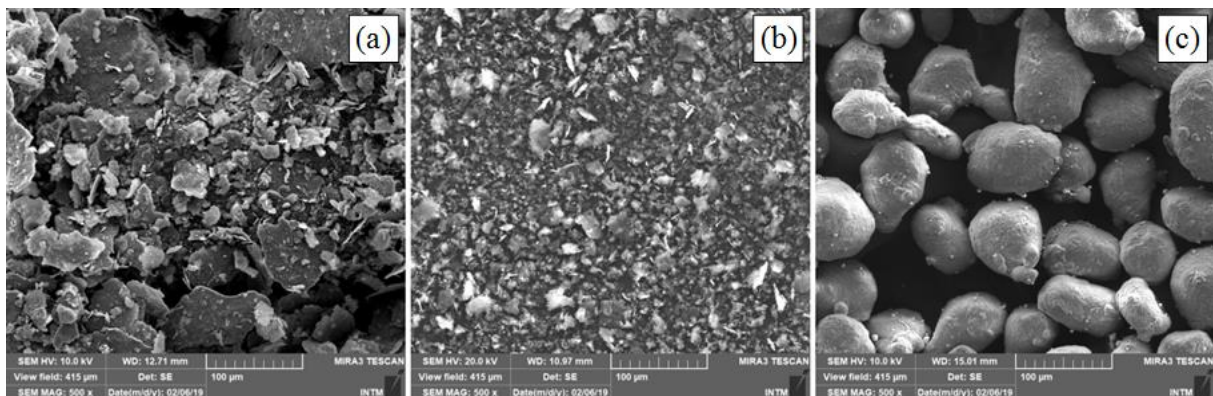


Figura 6. Micrografias geradas no MEV, aumento de 500x. (a) Amostra fabricada com 2h de moagem. (b) Amostra fabricada com 4h de moagem. (c) Amostra comercial.

As micrografias para as três amostras são mostradas na figura 6. Tais micrografias apresentam pós com morfologia irregular, achatada e não-equiaxial, para as duas amostras fabricadas pelo processo de moagem de alta energia, enquanto a amostra comercial apresentou morfologia arredondada e equidimensional, característica de pós fabricados pelo processo de atomização à gás. Diante destes resultados é de se esperar maior densidade aparente do pó e melhores características de empacotamento por ocasião da compactação para o pó atomizado, entretanto a morfologia irregular das amostras fabricadas é favorável a sinterização, pois aumenta a interação entre as partículas favorecendo a difusão incrementando a densificação. [9]

3.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios-X (EDS)

Através da técnica de EDS podemos atestar a composição química dos pós fabricados por meio de um espectro gerado para os elementos químicos nas amostras processadas, sendo também obtidas as composições em termos

percentuais dos principais elementos químicos presentes. Para efeito de comparação a composição padrão que define a liga AA6061 é mostrada para os principais elementos de liga na tabela na tabela 1.

Tabela 1. Composição química da liga AA6061

Liga	Mg	Si	(Cu, Mn e Cr)
6061	1,0	0,6	0,6

Nas figuras 9 e 10 podemos ver os resultados obtidos na análise, ou seja, os espectros gerados e a composição dos principais elementos de liga (Mg e Si) presentes nas amostras fabricadas.

A análise de composição do EDS mostrou bons resultados no que diz respeito a composição química, a amostra fabricada com 2 horas de moagem apresentou para os principais elementos de liga composição muito próxima a definida para a liga AA6061, com os valores de 1,03% de Mg e 0,54% de Si, já a mostra fabricada com quatro horas de moagem apresentou para o magnésio um valor com uma diferença considerável em relação a liga comercial, tendo 1,6% deste elemento quando a composição definida é de 1,0%, já para o silício o valor apresentou pequena diferença tendo uma composição de 0,53%.

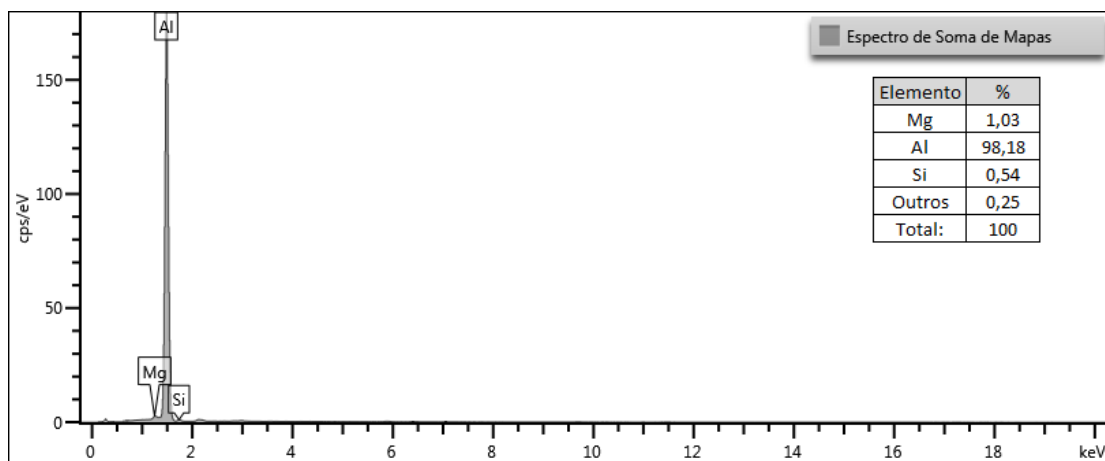


Figura 7. Espectro gerado no EDS e composição para o pó obtido com 2h de moagem

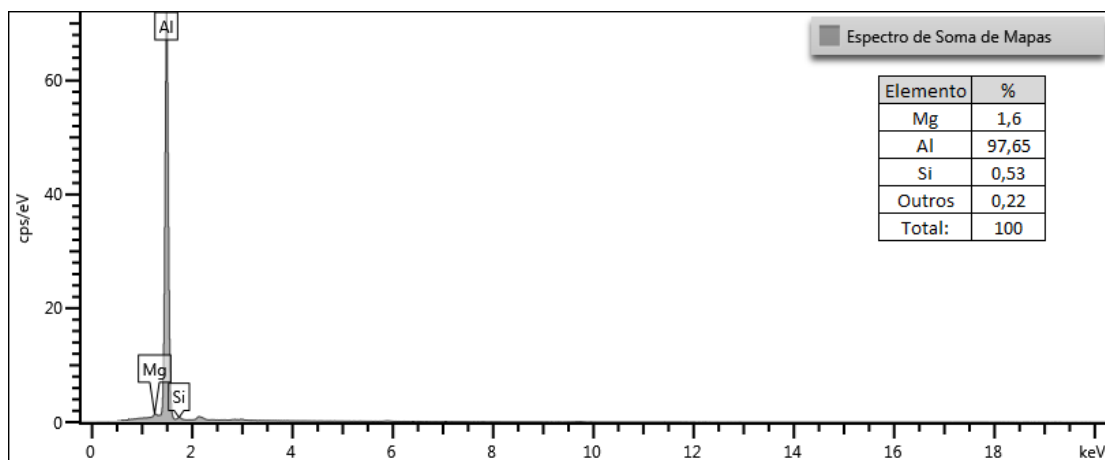


Figura 8. Espectro gerado no EDS e composição para o pó obtido com 4h de moagem

3 CONCLUSÃO

Aplicando a metodologia utilizada se conseguiu obter pós da liga de alumínio AA6061 com tamanho de partícula utilizado comumente na metalurgia do pó, embora tanto a morfologia irregular e achatada dos pós fabricados, quanto a distribuição de tamanho de partícula mais espaçada tenham aumentado sua densidade aparente. Uma técnica de peneiramento pode vir a reduzir o desvio padrão das distribuições de tamanho de partícula obtidas, melhorando os resultados esperados na etapa posterior de compactação.

Do ponto de vista da composição química os pós fabricados apresentaram excelente resultado obtendo-se a composição definida para os principais elementos de liga presentes na liga estudada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PIBIC/UFPE e ao CNPq pelo apoio financeiro e aos técnicos e colegas de laboratório do DEMEC/UFPE pelo apoio dado durante a realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Barbosa C. Metais não ferrosos e suas ligas: Microestrutura, propriedades e aplicações. Rio de Janeiro: E-papers; 2014. Ligas de Alumínio; p. 13-123.
- 2 Shazarel S, Lajis M, Zhong ZW. Evolutionary in Solid State Recycling Techniques of Aluminium: A review. Procedia CIRP. 2016; 40:256–261.
- 3 de Souza JRP. Efeito da sinterização e da moagem de alta energia na microestrutura e nas propriedades mecânicas em ligas de alumínio recicladas a partir de latas de bebidas [Dissertação]. Natal: UFRN; 2017.
- 4 de Souza JRP, Peres MMP. Análise microestrutural de pó de alumínio sinterizado obtido pela moagem de alta energia de latas de bebidas. In: 22º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais; 2016; Natal, Brasil. Natal; 2016. p. 4811-4819.
- 5 Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. Progress in Materials Science. 2001; 46:1–184.
- 6 Suryanarayana C, Ivanov E, Boldyrev VV. The science and technology of mechanical alloying. Materials Science and Engineering. 2001; 306:151–158.
- 7 de Clein E, Holm R, den Mooter GV. Size Analysis of Small Particles in Wet Dispersions by Laser Diffractometry: A Guidance to Quality Data. Journal of Pharmaceutical Sciences. 2019; 108:1905-1914.
- 8 da Silva MAP, Ferri FA. Nanocharacterization Techniques: Micro and Nano Technologies; 2017. Scanning Electron Microscopy; p.1-35.
- 9 Chiaverini V. Metalurgia do pó: Técnica e produtos. 3. ed. São Paulo: ABM; 1992.
- 10 Samuel M. A new technique for recycling aluminium scrap. Journal of Materials Processing Technology. 2003; 135:117–124.
- 11 Groover MP. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes and systems. 4. ed. Pennsylvania: John Wiley & Sons; 2010. Powder Metallurgy; p. 344-367.