

## **Fabricação e caracterização da liga de alumínio AA8011 através das técnicas de metalurgia do pó**

## **Manufacturing and characterization of the aluminum alloy AA8011 through powder metallurgy techniques**

DOI:10.34115/basrv5n2-020

Recebimento dos originais: 26/02/2021

Aceitação para publicação: 26/03/2021

### **Sandra Torres Zarzar**

Mestrado

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

Rua: Av. Engenheiro Domingos Ferreira, 3181, Apt. 401, Boa Viagem, Recife – PE

E-mail: sandrazarzar@gmail.com

### **Diogo Monteiro do Nascimento**

Mestrado

SENAI – Serviço nacional de Aprendizagem Industrial - PE

Rua: Av. Ministro Marcos Freire, 965, Apt. 01, Bairro Novo, Olinda – PE

E-mail: diogomonteiro.nascimento@gmail.com

### **José Endreo Baracho da Costa**

Graduação

SENAI – Serviço nacional de Aprendizagem Industrial - PE

Rua: cento e quarenta, nº26, caetés 1, abreu e Lima – PE

E-mail: endreomec@hotmail.com

### **Moisés Euclides da Silva Junior**

Mestrado

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

Rua : Antônio Bernardo, Nº50, Ap201, São Vicente de Paulo, Vitória – PE

E-mail: juniormoisés7@hotmail.com

### **Oscar Olimpio de Araujo Filho**

Doutorado

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

Rua : Betania No. 32 Derby Recife PE Brasil

E-mail: oscar.oaraujo@ufpe.br

## **RESUMO**

Foi fabricada a liga de alumínio AA8011 através da técnica de metalurgia do pó. Os pós foram processados através da moagem de alta energia (MAE) durante 30, 60, 120 minutos e em seguida caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difração de raios-x (DRX) e granulometria por Difração a Laser. Após a caracterização dos pós, os pós foram consolidados através de compactação uniaxial a frio, seguida sinterização e de extrusão a quente. A caracterização do sinterizado e extrudado foi feita através de MO, MEV e microdureza vickers. A caracterização do material particulado evidenciou uma diminuição do tamanho das partículas da mistura dos

pós com o aumento do tempo de processamento, o material sinterizado demonstrou uma porosidade acentuada, baixa densificação e uma microestrutura não homogênea, o material extrudado apresentou uma baixa porosidade, boa densificação e uma microestrutura com boa homogeneização, foram observados precipitados ternários (AlFeSi) e binários (AlSi) nas imagens da microscopia eletrônica de varredura, e identificadas as suas composições químicas por espectroscopia de energia dispersiva.

**Palavras-chave:** AA8011, Ligas de Alumínio, Metalurgia do Pó, Extrusão a Quente

#### **ABSTRACT**

The AA8011 aluminum alloy was manufactured through powder metallurgy technique. The powders were processed through high energy ball milling (HEBM) for 30, 60, 120 minutes and then characterized by scanning electron microscopy (SEM), dispersive energy spectroscopy (EDS), x-ray diffraction (XRD) and Laser Diffraction granulometry. After the characterization of the powders, the powders were consolidated through cold uniaxial compaction, followed by sintering and hot extrusion. The characterization of the of the sintered and extruded was carried out using OM, SEM and vickers microhardness test. The characterization of the particulate material showed a decrease in the size of the powder mixture particles with an increase in the processing time, the sintered material demonstrated a marked porosity, low densification and a non-homogeneous microstructure, the extruded material demonstrated a low porosity, good densification and a microstructure with good homogenization, ternary (AlFeSi) and binary (AlSi) precipitates were observed in the scanning electron microscopy images, and their chemical compositions were identified by dispersive energy spectroscopy.

**Keywords:** AA8011, Aluminium Alloys, Powder Metallurgy, Hot Extrusion

## **1 INTRODUÇÃO**

O alumínio é um elemento metálico encontrado de forma abundante na crosta terrestre, geralmente na forma de óxido. Foi descoberto e isolado nas primeiras décadas do século XIX. Com a criação do processo de refino, foi possível produzi-lo em escala comercial, o que promoveu a redução dos custos de fabricação e o consequente aumento na utilização deste metal não ferroso (BARBOSA, 2014).

As ligas de alumínio possuem vasta aplicação nos setores aeroespacial e automotivo devido às suas propriedades mecânicas superiores, como resistência à tração, densidade relativa, ductilidade, formabilidade, trabalhabilidade e resistência à corrosão (MEIGNAMOORTHY *et al.*, 2019). Devido ao excelente comportamento das ligas sob os diferentes pontos de vista de suas propriedades mecânicas, essas propriedades podem ser modificadas para satisfazer diferentes aplicações (TORRALBA *et al.*, 2003).

Uma das áreas de desenvolvimento mais ativas na metalurgia do alumínio está na série 8xxx (SHACKELFORD, 2008). As ligas de alumínio desta série têm como principal elemento de liga um elemento diferente das demais ligas de alumínio classificadas pela

*Aluminum Association* (AA). Alguns exemplos dessas ligas são as formadas por binários Al-Li, Al-Fe, Al-Sn e ternários Al-Cu-Li, Al-Mg-Si, Al-Fe-Si (BARBOSA, 2014).

A Metalurgia do Pó (MP) é uma técnica de produção emergente para a fabricação de componentes com forma final ou próximas a final nas indústrias. Vários tipos de elementos podem ser misturados e propriedades únicas podem ser obtidas via MP (MEIGNAMOORTHY *et al.*, 2018). A MP oferece algumas vantagens em comparação com outros processos metalúrgicos, tal como a baixa temperatura de fabricação e é uma técnica que permite obter materiais que não podem ser obtidos por nenhuma outra rota alternativa (TORRALBA *et al.*, 2003).

A extrusão a quente é um processo que permite formas mais complexas quando são empregados metais com facilidade de serem extrudados, como o alumínio. Nesses materiais, é possível obter formas finais com excelentes tolerâncias dimensionais e qualidades superficiais (DIETER, 1981). A extrusão na maioria dos metais é realizada a quente devido às forças necessárias para produzir a deformação (CHIAVERINI, 1986).

O presente trabalho teve como objetivo principal a fabricação e caracterização da liga de alumínio AA8011 via Metalurgia do Pó, por meio da moagem de alta energia, compactação a frio, seguida de extrusão a quente.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental realizado na liga AA8011 consistiu-se na caracterização dos pós, processamento dos pós através da moagem de alta energia (MAE), compactação e extrusão a quente. Seguindo com o processo de caracterização estrutural através da Microscopia ótica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e ensaio de microdureza Vickers.

Foram empregados pós elementares cuja composição das amostras utilizada para compor as ligas estão indicados na Tabela 1. Os percentuais dos pós utilizados foram obtidos e escolhidos a partir da classificação da *Aluminum Association* encontrados no Vol. II do ASM Handbook (1990). Como agente controlador do processo (ACP) foi utilizado o composto orgânico ácido esteárico (C<sub>18</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>), em proporção de 1% da massa total do pó no processo de moagem.

Tabela 1. Composição química liga AA8011. Fonte: ASM Handbook (1990).

Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Zinco (Zn)	Alumínio (Al)
0,9 %	0,6 %	0,1 %	0,2%	0,1 %	98,10 %

## 2.1 PROCESSAMENTO DOS PÓS

Para o processamento dos pós por moagem de alta energia, foi utilizado um moinho vibratório de alta energia SPEX, comumente utilizados para investigação em laboratórios. Foram processadas quatro amostras para cada liga, em períodos de tempo de 30, 60 e 120 minutos a uma velocidade de rotação de 720 rpm. Na Tabela 2 estão os parâmetros utilizados para o processamento dos pós.

Os pós processados por Moagem de Alta Energia foram compactados numa prensa manual com capacidade para 15 t/cm<sup>2</sup>. Para todas as amostras, o tempo de aplicação da carga utilizado foi de 10 minutos a uma pressão de 10 t/cm<sup>2</sup>.

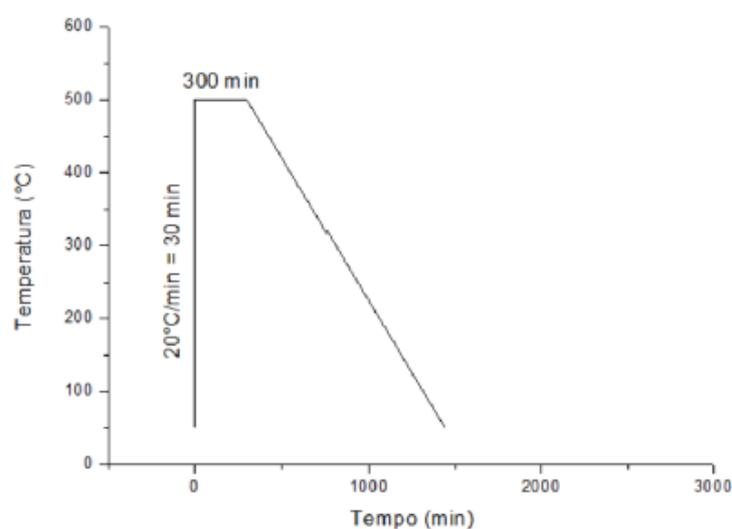
Tabela 2. Parâmetros das amostras para processamento do pó em gramas. Fonte: Os autores (2019).

Amostra	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Tempo (min)
AM01/AM02/AM03/AM04	0,18	0,12	0,02	0,04	0,02	19,62	120

## 2.2 SINTERIZAÇÃO DO COMPACTADO VERDE

Os compactados verdes foram sinterizados em uma atmosfera controlada de argônio para evitar a oxidação a uma temperatura de patamar de 500°C por um período de 5h e taxa de aquecimento de 20°C/min. Logo, o resfriamento ocorreu no próprio forno até atingir a temperatura ambiente. A Figura 1 ilustra o ciclo de sinterização das amostras. Foram sinterizadas três amostras: AM01, AM02, AM03.

Figura 1. Ciclo de sinterização.



Fonte: Os autores (2019).

### 2.3 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

Inicialmente foi realizado o corte ao meio das amostras, as sinterizadas em máquina de corte apropriada, e a extrudada em máquina de corte de baixa velocidade com disco abrasivo apropriado para o corte dessas amostras. Após o corte das amostras, foi realizado seu embutimento com o uso de uma resina auto-polimerizante para permitir um bom manuseio.

Em seguida, foi feito o lixamento da vista das seções das amostras a fim de eliminar vestígios de rebarbas provenientes do corte por disco abrasivo. As lixas d'água utilizadas passaram pela sequência de Mesh de 220, 320, 400, 600 e 1200. O polimento foi feito manualmente numa politriz com o uso de pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e o ataque da superfície por ácido fluorídrico a 0,5% por 15s (COUTINHO, 1980).

### 2.4 EXTRUSÃO A QUENTE

A extrusão foi realizada numa matriz envolta por uma manta térmica que permite manter a temperatura desejada. O compactado verde da amostra foi colocado na matriz, este conjunto foi aquecido a temperatura de 500°C e prensados em uma prensa hidráulica. Foi extrudada a amostra AM04 com tempo de sinterização de 120 minutos.

### 2.5 ANÁLISE DAS PARTÍCULAS DE PÓ

As análises da distribuição e tamanho das partículas de pó foram realizadas por via úmida com a água como meio dispersante. A distribuição do tamanho de partícula é dada em termos de um gráfico de distribuição de frequência em proporção de volume numa faixa de 0,01 a 3000  $\mu\text{m}$ .

A difração de Raios-X foi realizada para caracterização microestrutural das amostras de pó processadas por Moagem de Alta Energia. Por meio desta técnica identificamos as fases presentes nos pós. A análise foi realizada em um difratômetro de Raios-X do tipo SHIMADZU, modelo XRD-7000, com radiação de Cu-K $\alpha$ , comprimento de onda  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ , tensão de 40KV, corrente de 30mA, faixa de medição ( $2\theta$ ) de 5° a 120°, velocidade de medição de 1°/min e passo de 0,02°.

### 2.6 MICROGRAFIA E DUREZA

Nas análises por MEV visualizamos o formato das partículas dos pós, a distribuição das partículas nos diversos tempos de MAE e a microestrutura da amostra extrudada. As análises químicas por EDS das amostras de pó sinterizada e extrudada, foram analisadas por um equipamento acoplado ao MEV. A análise por microscopia ótica foi realizada com um

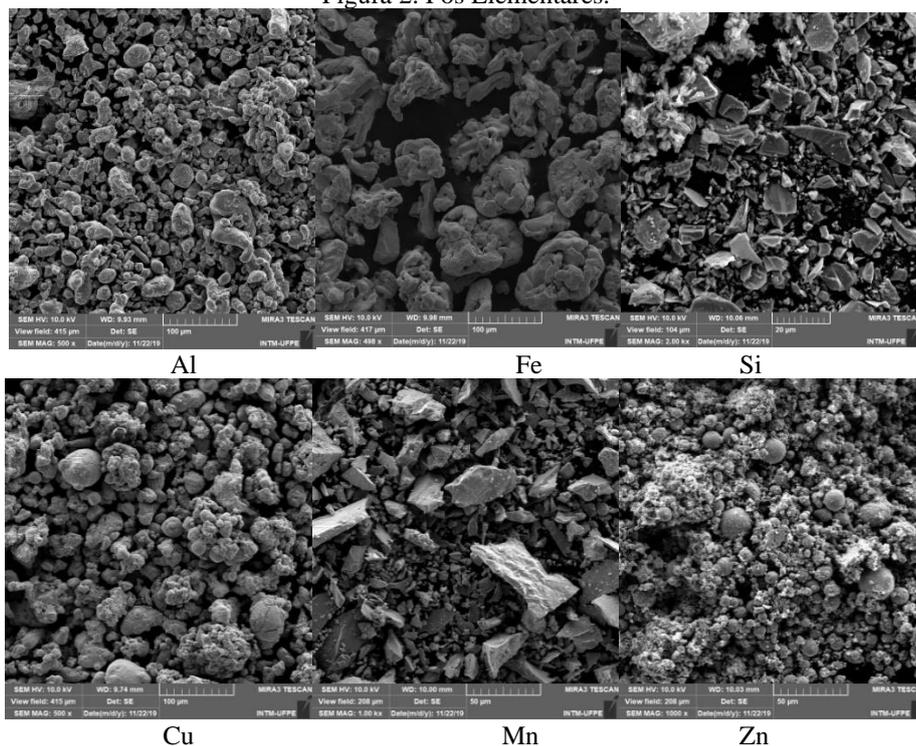
microscópio ótico da marca Zeiss, com câmera de vídeo acoplada AxloCam MRC5 e aumentos de 50x a 1000x e as imagens da amostra em aproximação de 100x, 200x e 500x. Para a microdureza, foi aplicada uma carga de 300g, com um tempo de indentação de 15s em cinco pontos aleatórios distribuídos de uma borda a outra das amostras com velocidade de aproximação entre 1,2 a 25 mm/s e realizado nas vistas superficial (S) e transversal (Ts) das amostras sinterizadas e vistas superfície transversal (T) e seção Longitudinal (L) da amostra extrudada.

### 3 RESULTADOS

Pela observação das imagens do MEV e a análise química do EDS, as morfologias das partículas dos pós de partida possuem formas irregulares ou arredondadas e não foram encontradas impurezas na composição dos pós.

A Figura 2 apresenta as imagens dos pós utilizados na fabricação das ligas pela Microscopia eletrônica de Varredura.

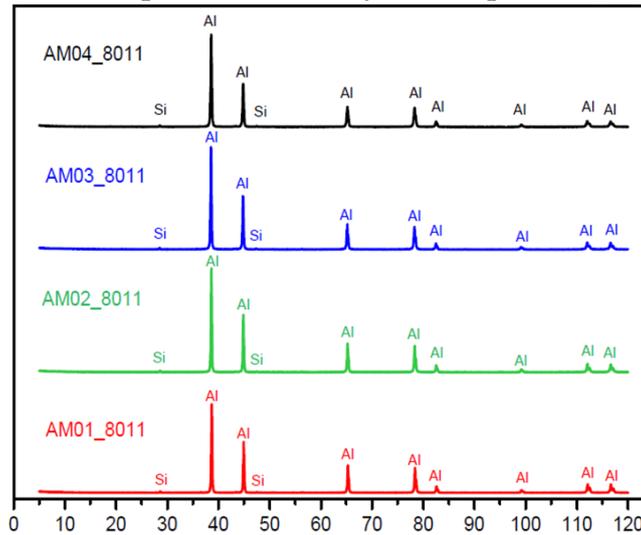
Figura 2. Pós Elementares.



Fonte: Os autores (2019).

A Figura 3 apresenta os difratogramas da liga AA8011 com os tempos de moagem de 30, 60, 120 minutos das amostras (AM01, AM02, AM03 e AM04) com as suas fases. Não houve praticamente nenhum deslocamento dos picos nas amostras.

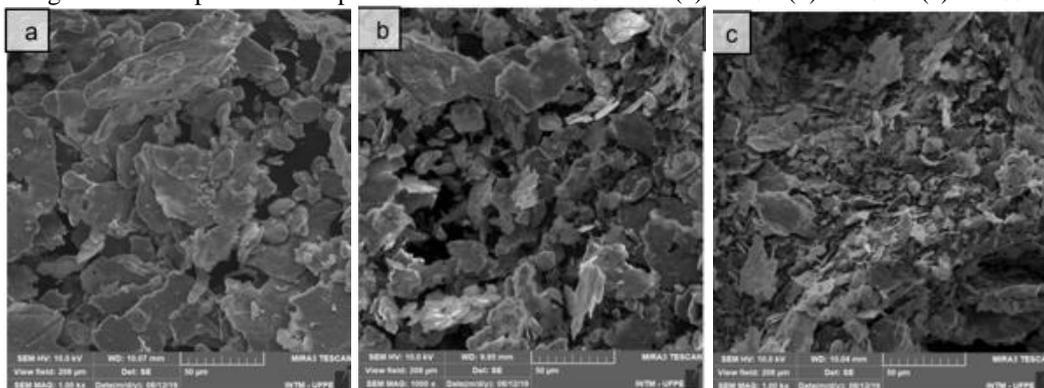
Figura 3. DRX da Liga AA8011 com tempos de moagem de 30, 60, 120 min.



Fonte: Os autores (2019).

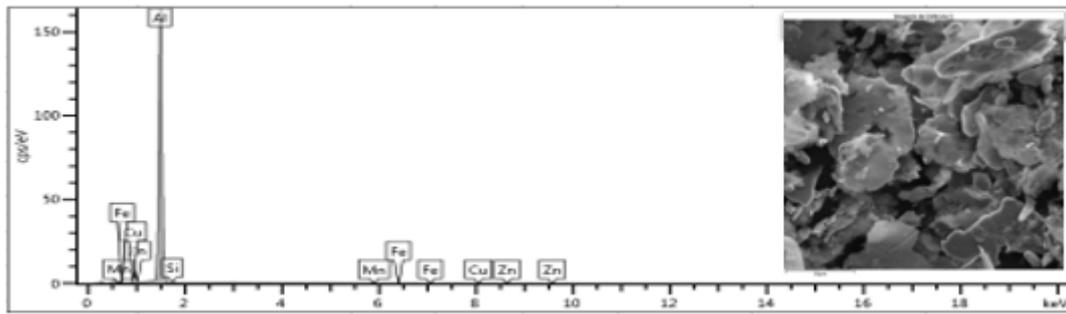
Cunguang *et al.* (2015), ao estudar os efeitos do tamanho do pó de alumínio e microestrutura em compósitos de alumínio reforçado com nitrato de boro, observaram que durante o processo de moagem a maior energia produzida a partir da colisão constante entre as partículas e as esferas de aço, causou deformação plástica nas partículas de pó. Conforme se observa na Figura 4, esse efeito também foi verificado nos pós das ligas estudadas a partir da observação das micrografias que nos mostra pós deformados, formas irregulares e dimensões menores a cada tempo de moagem devido às maiores fraturas ocorridas. Nas Figuras 5 a 7 são apresentados os EDS com a identificação dos elementos presentes nas amostras do pó.

Figura 4. MEV partículas de pó com aumento de 1.00 kx de (a) AM01 (b) AM02 e (c) AM03.



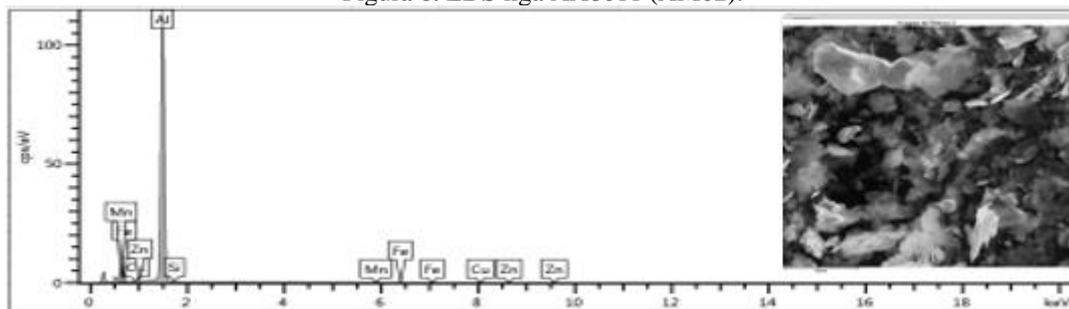
Fonte: Os autores (2019).

Figura 5. EDS liga AA8011 (AM01).



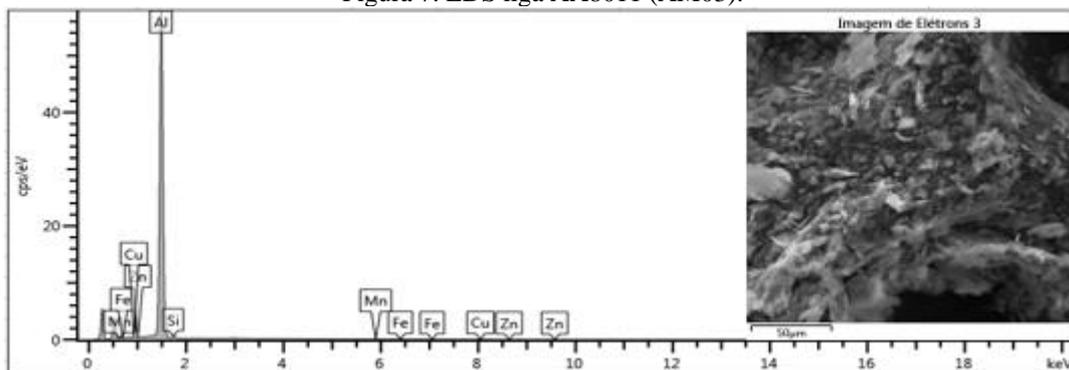
Fonte: Os autores (2019).

Figura 6. EDS liga AA8011 (AM02).



Fonte: Os autores (2019).

Figura 7. EDS liga AA8011 (AM03).



Fonte: Os autores (2019).

Pela observação da curva de distribuição de frequência, foi identificada uma distribuição unimodal, característica que indica que os pós podem ser utilizados para a Metalurgia do Pó. Também se observa que há um deslocamento para a esquerda o que mostra a diminuição de diâmetro da partícula dos pós que decresce a cada aumento do tempo de moagem, como pode ser confirmado pelos valores de diâmetro mediano - D50, apresentado no Tabela 3. Essa diminuição do tamanho mediano das partículas, indica que estas ficam cada vez mais finas, demonstrando que o tempo de moagem influencia no processo.

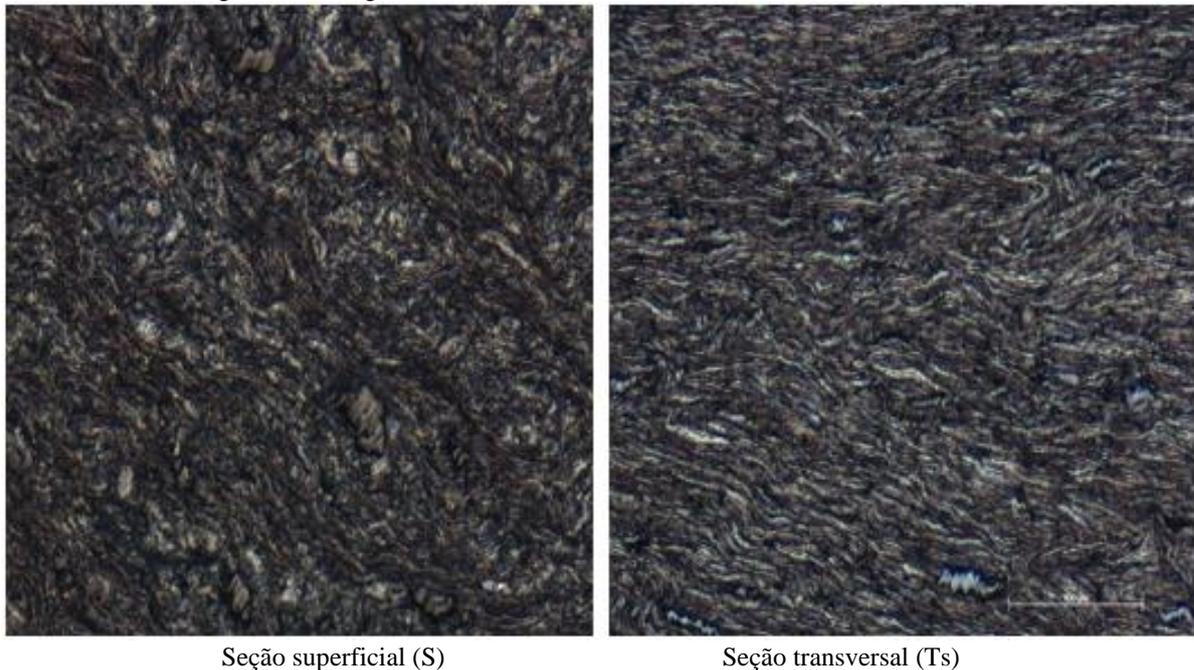
Tabela 3. Distribuição das partículas de pó.

Amostra	Tempo de moagem	D10 ( $\mu\text{m}$ )	D50 ( $\mu\text{m}$ )	D90 ( $\mu\text{m}$ )
AM01	30 min	20,336	57,182	122,905
AM02	60 min	8,908	26,818	62,302
AM03 AM04	120 min	5,910	20,438	53,678

Fonte: Os autores (2019).

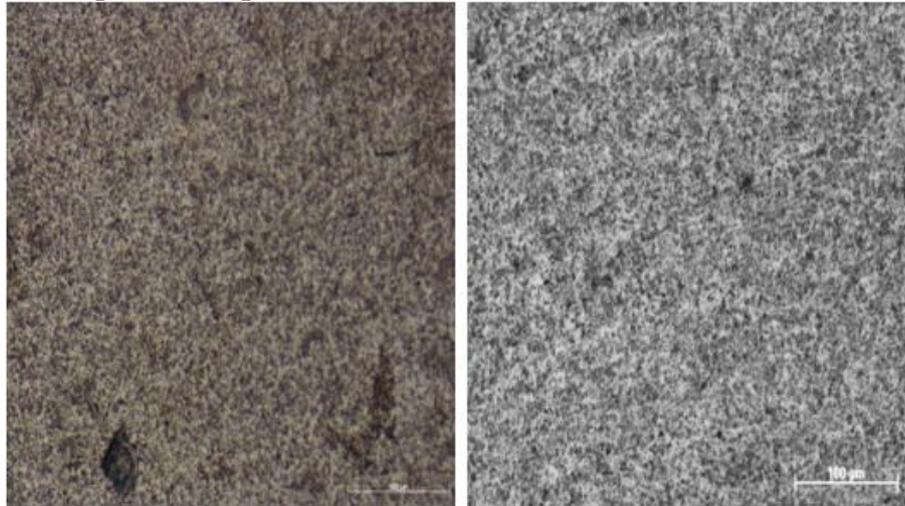
A Figura 8 apresenta o resultado da MO na amostra sinterizada (AM03) da liga de alumínio AA8011, em sua seção superficial (S) e seção transversal (Ts) no tempo de moagem de 120 minutos com aumento de 200x. A Figura 9 apresenta o resultado da MO na amostra extrudada (AM04) em sua superfície transversal (T) e seção Longitudinal (L). Observando as imagens, a morfologia de ambas as amostras se apresenta deformada, com contornos de grão não definidos, a presença de porosidade nas amostras e maior homogeneização da amostra extrudada. As alterações na estrutura dos grãos ocorrem pelas sucessivas soldagens e fraturas da MAE.

Figura 8. MO liga AA8011 com aumento de 200x da amostra sinterizada.



Fonte: Os autores (2019).

Figura 9. MO liga AA8011 com aumento de 200x da amostra extrudada.



Seção longitudinal (L)

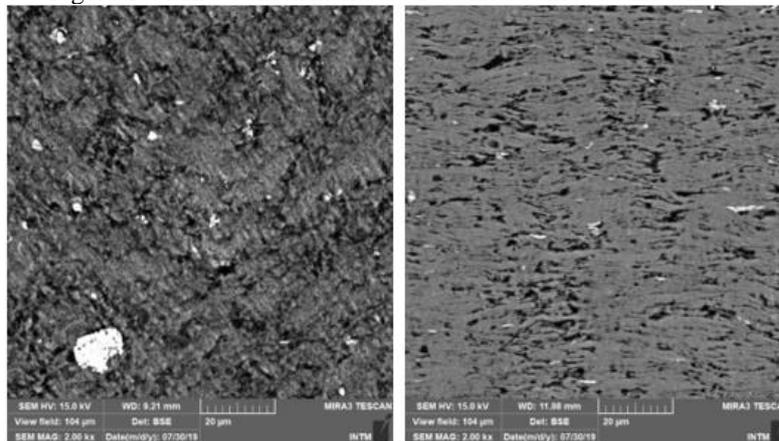
Superfície transversal (T)

Fonte: Os autores (2019).

A Figura 10 apresenta os resultados da MEV da amostra sinterizada em suas seções superficiais (S) e transversais (Ts) no tempo de moagem de 120 minutos e aumento de 2.00kx. A Figura 11 apresenta MEV e EDS da amostra sinterizada. A Figura 12 apresenta os resultados da MEV da amostra extrudada em sua superfície transversal (T) e seção Longitudinal (L) no tempo de moagem de 120 minutos e aumento de 2.00kx. A Figura 13 apresenta MEV e EDS da amostra extrudada, cujo círculo vermelho indica os precipitados e a seta amarela a direção da extrusão.

Em nenhuma das amostras na análise da MEV e EDS apareceram elementos que não pertenciam às ligas confirmando que os pós não sofreram contaminação. Apenas apresentando precipitados de  $AlFeSi$  e  $AlSi$ , com a coloração mais clara para o precipitado ternário e mais opaca para o precipitado binário.

Figura 10. MEV com aumento de 2.00 kx da amostra sinterizada.

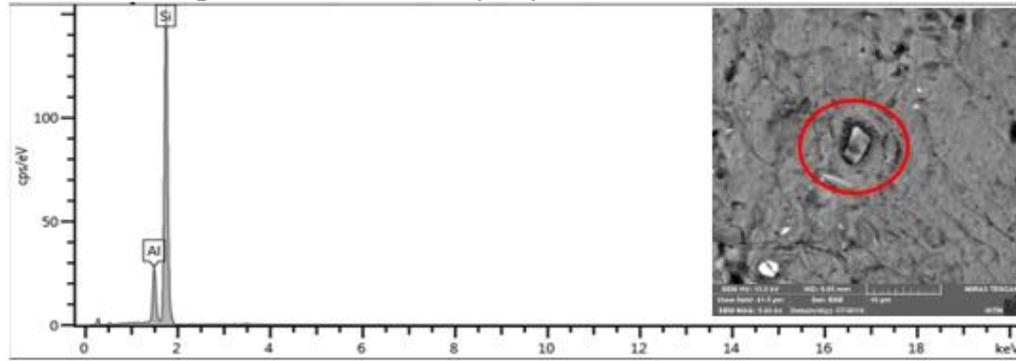


Seção Superficial (S)

Seção Transversal (Ts)

Fonte: Os autores (2019).

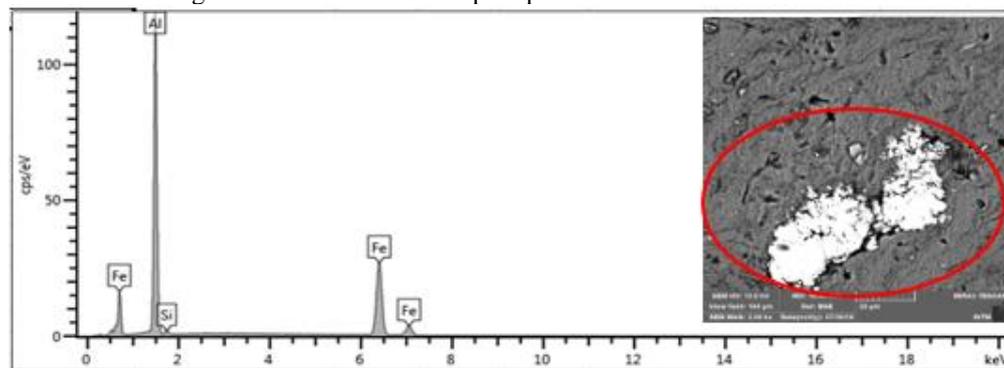
Figura 11. MEV e EDS dos precipitados da amostra sinterizada.



AlSi

Fonte: Os autores (2019).

Figura 11. MEV e EDS dos precipitados da amostra sinterizada.

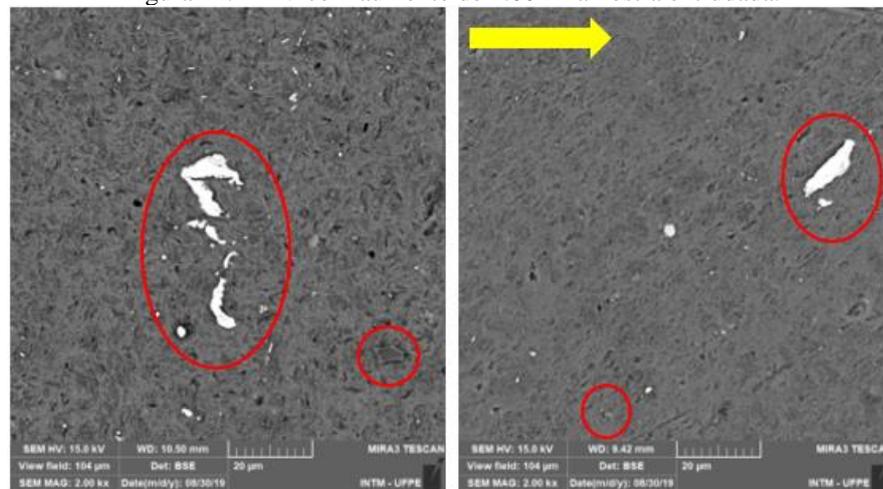


AlFeSi

Fonte: Os autores (2019).

Conforme Ferguson e Roberts (1998), a extrusão produz uma melhor densificação no material e confere uma distribuição longitudinal e transversal uniforme da fase dispersa. A extrusão é o principal método de densificação na produção de metais através da MAE baseada na MP como meio de produzir uma distribuição uniforme das fases do material.

Figura 12. MEV com aumento de 2.00 kx amostra extrudada.

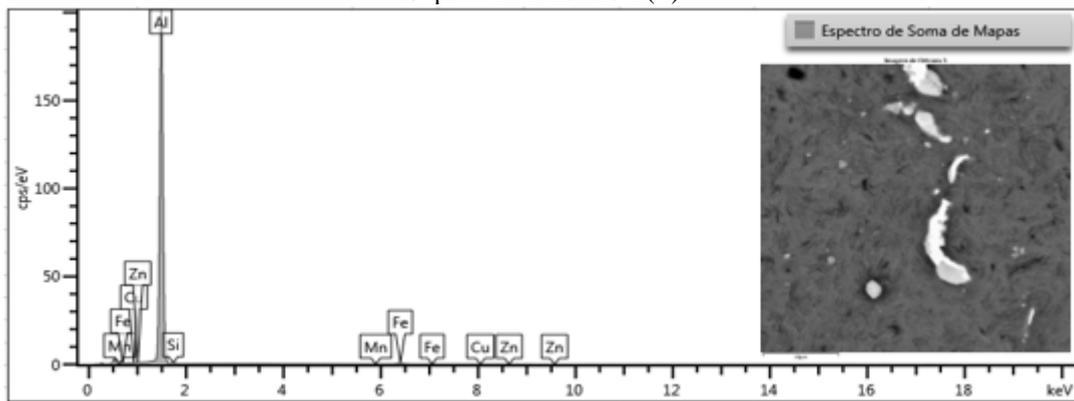


Superfície transversal (T)

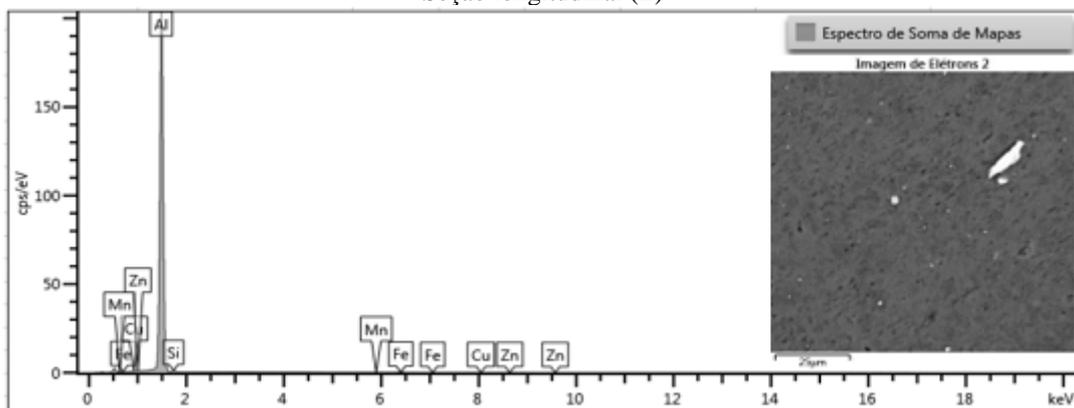
Seção longitudinal (L)

Fonte: Os autores (2019).

Figura 13. MEV e EDS dos precipitados da amostra extrudada.  
Superfície transversal (T)



Seção longitudinal (L)



Fonte: Os autores (2019).

A Tabela 4 apresenta a média e o desvio padrão para a microdureza obtido das amostras da liga AA8011 sinterizada (AM03) em suas seções superficiais (S) e transversais (Ts), e extrudada (AM04) nos cortes das seções longitudinal (L) e superfície transversal (T).

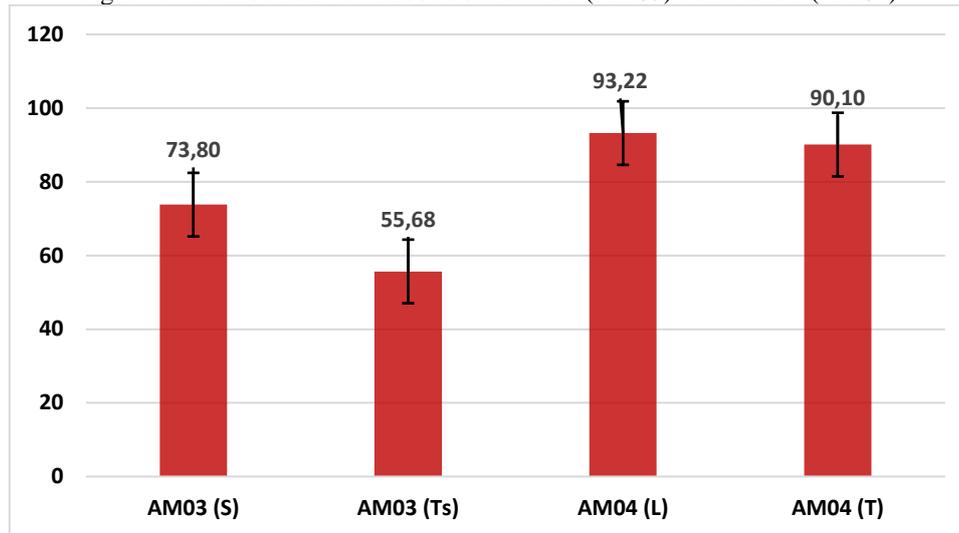
Tabela 4. Médias e desvios padrões dos valores de microdureza Vickers das amostras sinterizada e extrudada.

Liga AA8011	AM03 (S)	AM03 (Ts)	AM04 (L)	AM04 (T)
Média (HV)	73,80	55,68	93,22	90,10
Desvio Padrão	14,73	6,53	4,74	1,38

Fonte: Os autores (2019).

Segundo Conforme Ferguson e Roberts (1998), a fina camada protetora de óxido (alumina –  $Al_2O_3$ ) que envolve as partículas de pó é facilmente quebrada na extrusão. A microdureza da amostra extrudada para um tempo de moagem de 120 minutos obteve valores maiores que os da amostra sinterizada. Isso se deve ao fato de que a camada de alumina poder ser quebrada na extrusão, o que provoca uma melhoria na densificação do material. A figura 14 apresenta as microdureza das amostras.

Figura 14. Microdureza da amostra sinterizada (AM03) e extrudada (AM04).



Fonte: Os Autores (2019).

#### 4 CONCLUSÕES

Os achados experimentais sobre o desenvolvimento apresentaram a morfologia dos pós elementares com formas irregulares ou arredondadas. Por meio do ensaio de granulometria, verificou-se a diminuição do tamanho das partículas dos pós à medida que o tempo de moagem aumenta. Observou-se nas imagens do MO e MEV da amostra sinterizada e da extrudada, uma estrutura deformada em que foi identificado pela análise dos EDS, precipitado ternário (AlFeSi) e binário (AlSi). Na imagem da seção transversal da amostra sinterizada e seção longitudinal da amostra extrudada fica evidenciada a formação de lamelas perpendiculares à direção da compactação. A análise das imagens do MO e principalmente do MEV da amostra sinterizada mostra uma porosidade maior e uma densificação menor que a porosidade e densificação da amostra extrudada. A amostra extrudada apresenta melhor homogeneização que a sinterizada o que melhora a resistência dos materiais.

## REFERÊNCIAS

ASM Handbook. **Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, Vol 2, 1990

BARBOSA, CÁSSIO. **Metais não Ferrosos e suas Ligas: Microestrutura, Propriedades e Aplicações**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2014.

CHIAVERINI, VICENTE. **Tecnologia mecânica: processo de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 1986. v. 2.

COUTINHO, TELMO DE AZEVEDO. **Metalografia de Não-Ferrosos**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1980.

CUNGUANG CHEN; LEICHEN GUO; JI LUO; JUNJIE HAO; ZHIMENG GUO; VOLINSK, ALEX A. **Aluminum powder size and microstructure effects on properties of boron nitride reinforced aluminum matrix composites fabricated by semi-solid powder metallurgy**. *Materials Science & Engineering A*, 646, pp. 306–314, 2015.

FERGUSON, B. L.; ROBERTS, P. R. **Extrusion of Metal Powders**. *In: ASM Handbook Committee, Vol. 7, Powder Metal Technologies, and Applications*, 1998.

MEIGNAMOORTHY, M.; RAVICHANDRAW, A. **Synthesis, properties and microstructure of sintered and hot extruded boron carbide reinforced AA8079 (Al-Cu-Fe-Si-Zn) matrix composites**. *Materials Research Express*, 2018.

MEIGNAMOORTHY, M.; RAVICHANDRAW, A.; ELMARIUNG, A. **Effect of Sintering Temperature on the Microstructure and Forming Behavior of AA8079 (Al-Cu-Fe-Si-Zn)**. *Advances in Manufacturing Technology*, pp. 607 – 613, 2019.

TORRALBA, J.M., COSTA, C.E., VELASCO, F. **P/M Aluminum Matrix Composites: Na Overview**. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 203 – 206, 2003.

SHACKELFORD, JAMES F. **Ciência dos Materiais**. 6º edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.