

# FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO AA4XXX A PARTIR DOS PÓS ELEMENTARES DE ALUMÍNIO E SILÍCIO VIA TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ \*

*Elinaldo Neves dos Santos<sup>1</sup>  
Everthon Rodrigues de Araújo<sup>2</sup>  
Thamy Gomes Pacheco Sobreira<sup>3</sup>  
Heronilton Mendes de Lira<sup>4</sup>  
Ednaldo Evangelista de Lacerda Júnior<sup>5</sup>  
Oscar Olimpio de Araujo Filho<sup>6</sup>*

## Resumo

O presente trabalho de pesquisa contempla a preparação de ligas de alumínio da série 4XXX a partir de pós elementares de alumínio comercialmente puro (AA 1100) e de pós de silício metálico (Si) nas percentagens em massa de 5, 10 e 13% e com o tempo de 30, 60 e 120 minutos para cada percentagem processados através de técnicas de moagem de alta energia (MAE) utilizando um moinho vibratório Spex, compactação uniaxial a frio e sinterização. Os pós processados foram caracterizados por MEV, DRX, Os pós caracterizados foram compactados uniaxialmente a frio em um moinho do tipo SPEX e sinterizados. Os consolidados MO,MEV e por microdureza Vickers (HV).

**Palavras-chave:** Compósitos de matriz metálica de ligas de alumínio; Silício; Metalurgia do Pó (MP); Propriedades Mecânicas; Moagem de alta energia.

## MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF AA4XXX ALUMINUM ALLOYS PREPARED FROM ELEMENTARY POWDERS OF ALUMINUM AND SILICON VIA POWDER METALURGY TECHNIQUES

## Abstract

The present work of research includes the preparation of 4XXX series aluminum alloys from elemental aluminum and silicon powders. Commercially pure (AA 1100) and metallic silicon (Si) powders in the percentages in mass of 5, 10 and 13% and with the time of 30, 60 and 120 minutes of HEBM processing. Percentage processed through high energy grinding techniques (MAE) using a Spex vibratory mill, cold uniaxial compaction and sintering, under nitrogen atmosphere and then characterization.

**Keywords:** Aluminum Alloys, Silicon, High Energy Ball Milling (HEBM), Powder Metallurgy, Mechanical Properties.

<sup>1</sup> *Licenciado em Física, Mestre em Engenharia Mecânica, Técnico do IFPE, Recife – PE- Brasil.*

<sup>2</sup> *Licenciado em Matemática, Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica – PPGEM – UFPE – Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheira Mecânica, mestranda em tecnologia Nuclear – CTG – UFPE – Recife – Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica – CHESF – Recife – PE – Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica, IFPE, Recife – PE- Brasil.*

<sup>6</sup> *Bacharel em Engenharia Mecânica, Mestre em Engenharia Mecânica, Doutor em Tecnologia Nuclear - Materiais, Professor Associado I, Departamento de engenharia mecânica, UFPE, Recife, PE.*

## 1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são extensivamente utilizadas devido às suas excelentes características de baixo peso e boas propriedades mecânicas, como resistência a corrosão dentre outras. As ligas de alumínio são formadas pela mistura íntima de materiais com características físicas e mecânicas diferentes (metais, semi-metais), onde o material presente em maior percentual é denominado de matriz e os demais constituintes são os elementos de liga (1,2). O que se busca nas ligas de alumínio é a obtenção de propriedades mecânicas superiores que a do alumínio isoladamente.

O alumínio é um elemento abundante na natureza e sobretudo em nosso país, pois, somos o terceiro maior produtor mundial, aliado a possibilidade de reciclagem do acima citado metal que atualmente supera os 90% aqui no Brasil, ou seja, para cada 10 toneladas fabricadas e posteriormente utilizadas, nove delas são reaproveitadas, sem a necessidade de extração de bauxita (mineral que contém o alumínio) e principalmente com grande economia de energia elétrica, já que o processo por eletrólise é o predominante na obtenção do alumínio e por ser este processo muito eletrointensivo requerendo então, enorme quantidade de energia. A utilização das ligas de alumínio também se dá em decorrência de interessantes propriedades apresentadas pelo dito metal, dentre elas: baixa densidade, boa condutividade, alta plasticidade, baixa temperatura de fusão (660°C), alta resistência à corrosão e excelente conformabilidade(3). O alumínio é um metal com coloração típica e usualmente branco acinzentado e que não é tóxico no estado particulado e esta última é a propriedade que mais favorece a sua utilização na metalurgia do pó, porém, é muito reativo e com grande afinidade com o oxigênio. A obtenção do alumínio ocorre por dois métodos, o primeiro deles o químico (datado de 1854) e o outro por eletrólise (1925) e embora este último seja mais recente, requer maior consumo de energia elétrica e apresenta maior produtividade. A escolha dos elementos de liga depende principalmente das características finais desejadas nas ligas e dos custos de fabricação envolvidos e neste trabalho utilizamos o silício (Si). As ligas de alumínio da série 4XXX ligadas ao silício são utilizadas na fabricação de eletrodos nos processos de soldagem (4). A distribuição homogênea do elemento de liga na matriz é um requisito primordial para melhorar as propriedades mecânicas. Nesse contexto, sabe-se que a Metalurgia do Pó (MP) promove uma melhor distribuição do elemento de liga na fase matriz em relação ao processo convencional de fundição, obtendo-se então materiais com melhores e incrementadas propriedades mecânicas tais como dureza (5). Neste trabalho de pesquisa, produziu-se e caracterizou-se a liga de alumínio AA4XXX na fração mássica de 5, 10 e 13% em peso de silício através da técnica de moagem de alta energia (MAE) utilizando-se um moinho vibratório do tipo SPEX, seguido de compactação uniaxial a frio e sinterização. Os pós da liga foram caracterizados por difração de raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) equipado com Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios - X (EDS). A caracterização da microestrutura do sinterizado foi realizada por meio de Microscopia Óptica (MO) e MEV/EDS enquanto que a Dureza Vickers foi utilizada a fim de avaliar essa propriedade mecânica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 1 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada nesse projeto de pesquisa:

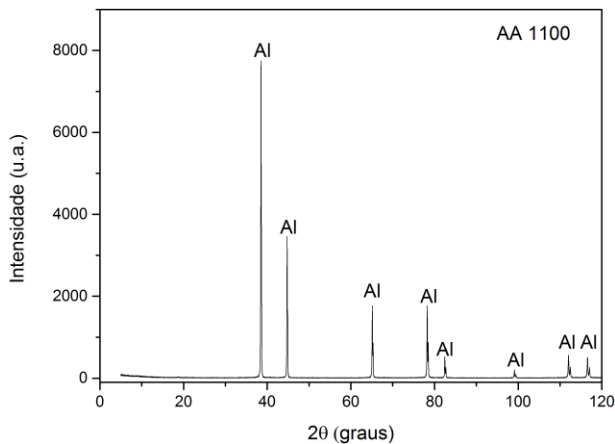


Figura 1. Fluxograma com a metodologia utilizada no trabalho de pesquisa.

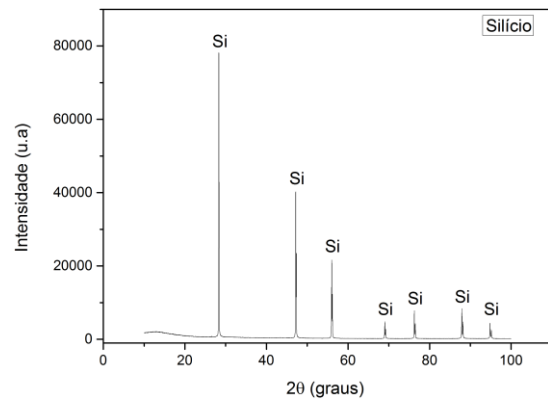
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização dos pós elementares de partida de alumínio e silício

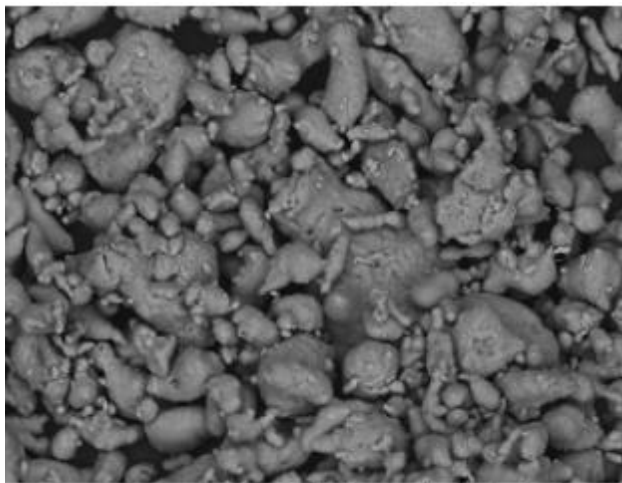
As figuras 2 e 3 apresentam os espectros de difração de raios-X dos pós elementares de alumínio comercialmente puro (AA1100) e silício (Si):



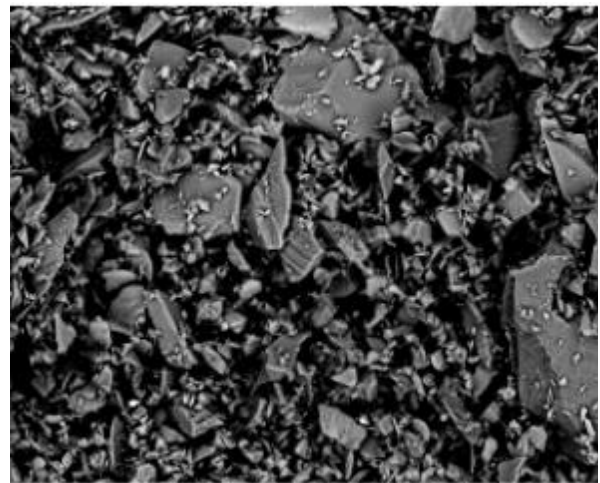
**Figura 2** – espectro de difração de raios-X da liga AA1100 (Alumínio comercialmente puro)



**Figura 3** – espectro de difração de raios-X da liga AA1100 (Alumínio comercialmente puro)



DEMEC \ CTG



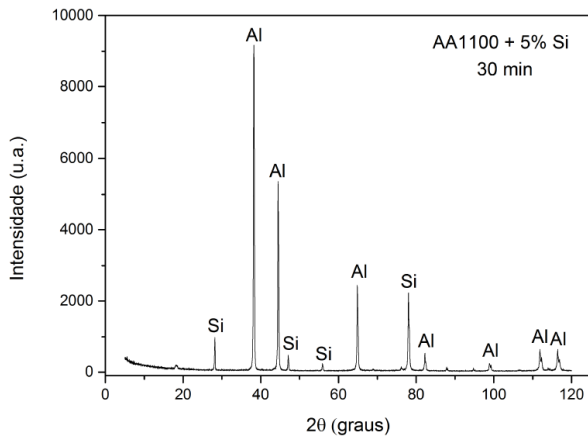
DEMEC \ CTG

**Figura 4** – Imagem de MEV dos pós da liga AA1100 atomizada a ar comprimido

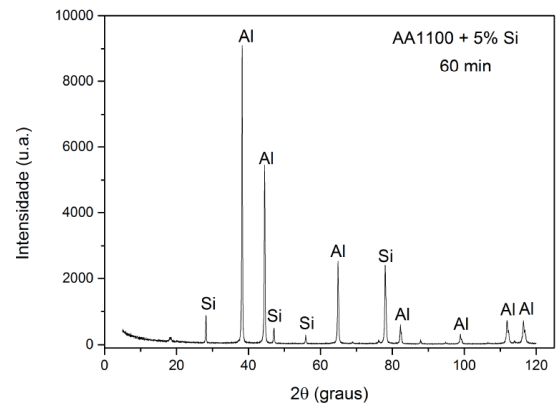
**Figura 5** – Imagem de MEV dos pós de silício

#### 3.2 Espectros de difração de raios-X dos pós da liga AA4XXX processados por moagem de alta energia (MAE)

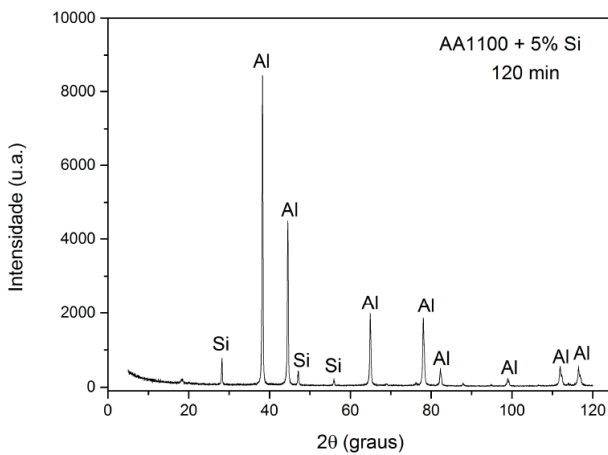
Os pós elementares de alumínio e silício com 5, 10 e 13% de silício forma misturados e processados por Moagem de Alta Energia (MAE) num moinho vibratório do tipo SPEX durante 30, 60 e 120 minutos. Os espectros de difração de raios-X (DRX) são apresentados nas figuras 6 a X:



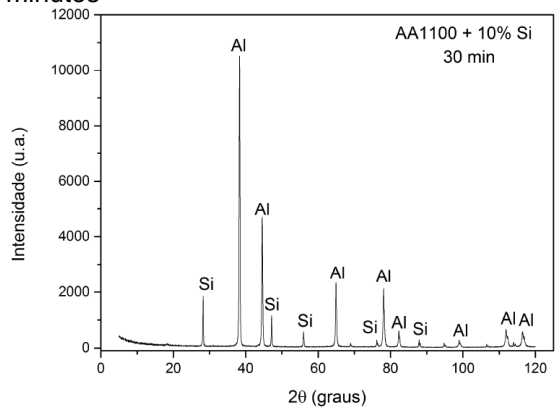
**Figura 6** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 5% de Si processada por MAE durante 30 minutos



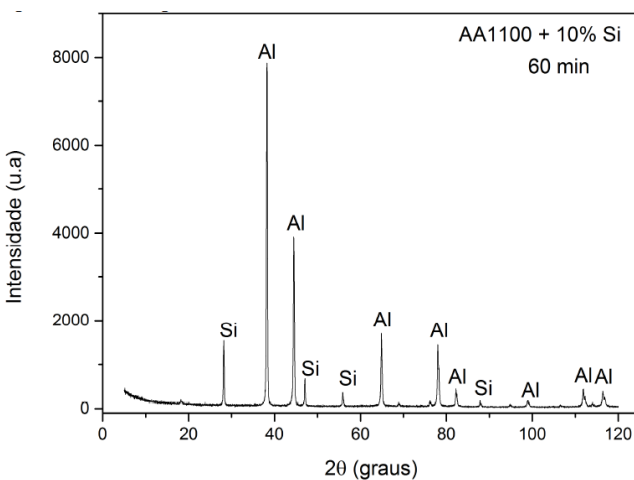
**Figura 7** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 5% de Si processada por MAE durante 60 minutos



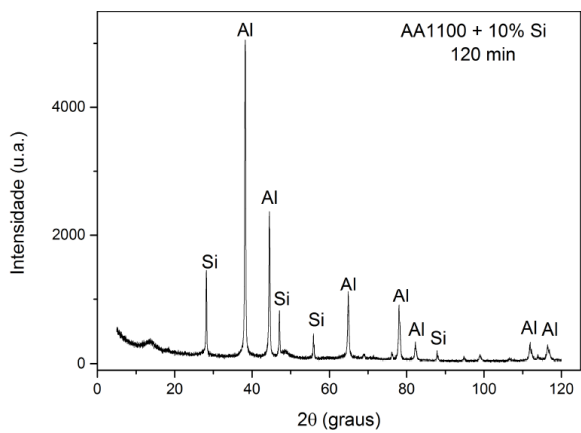
**Figura 8** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 5% de Si processada por MAE durante 120 minutos



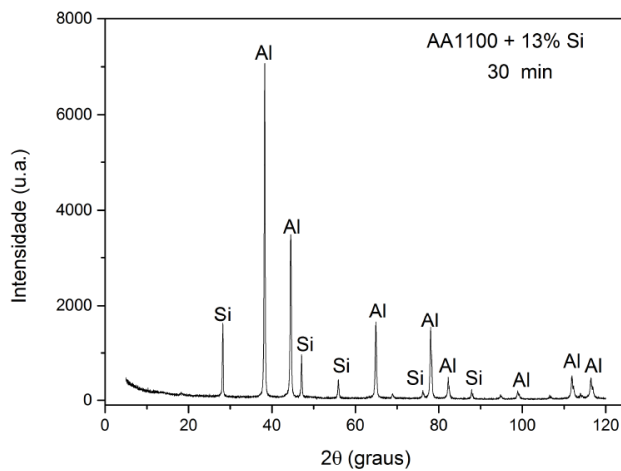
**Figura 9** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 10% de Si processada por MAE durante 30 minutos



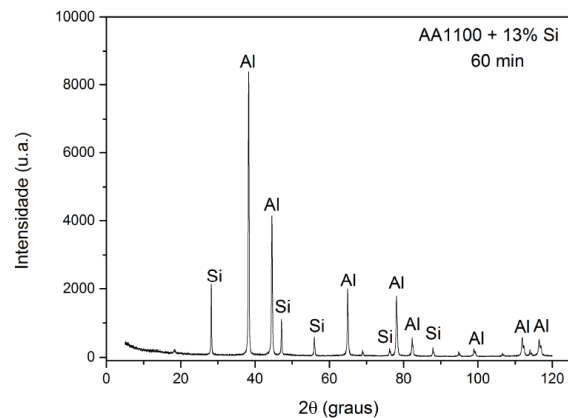
**Figura 10** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 10% de Si processada por MAE durante 60 minutos



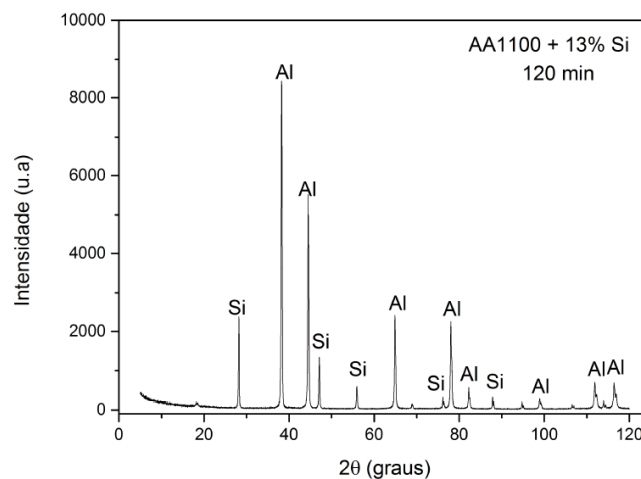
**Figura 11** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 10% de Si processada por MAE durante 120 minutos



**Figura 12** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 13% de Si processada por MAE durante 30 minutos



**Figura 13** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 13% de Si processada por MAE durante 60 minutos



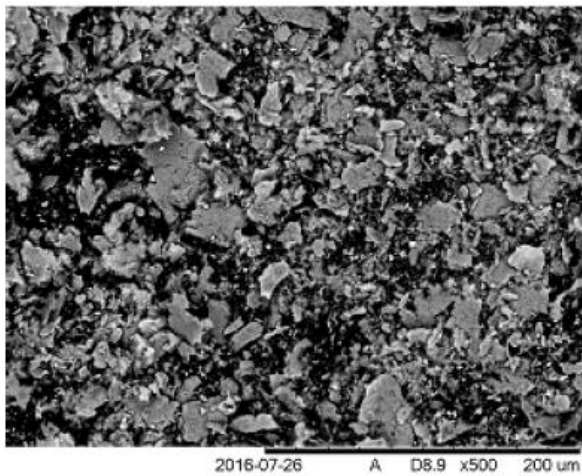
**Figura 14** – Espectro de DRX da liga AA4XXX com 13% de Si processada por MAE durante 120 minutos

A análise dos espectros de difração de raios-X das ligas da série AA4XXX objeto desse trabalho de pesquisa para as concentrações em massa de 5, 10 e 13% de silício para os tempos de processamento por Moagem de Alta Energia (MAE), sinalizam para uma não efetiva alteração das fases presentes, outrossim, o aumento do percentual de silício acarretou uma discreta alteração na intensidade dos picos desse elemento (fase) (6,7).

### 3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Baixa Energia de raios\_X (EDS) dos Pós das Ligas da Série AA4XXX Processados por Moagem de Alta Energia (MAE)

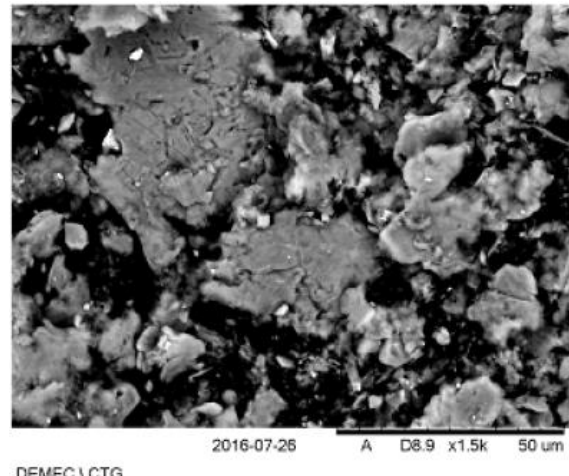
### 3.3.1 MEV da Liga AA4XXX com 5% de Silício Processados por 30 Minutos

As figuras 15 e 16 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 5% de Silício Processados por 30 Minutos:



DEMEC \ CTG

**Figura 15** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 5% de Silício processados por 30 Minutos

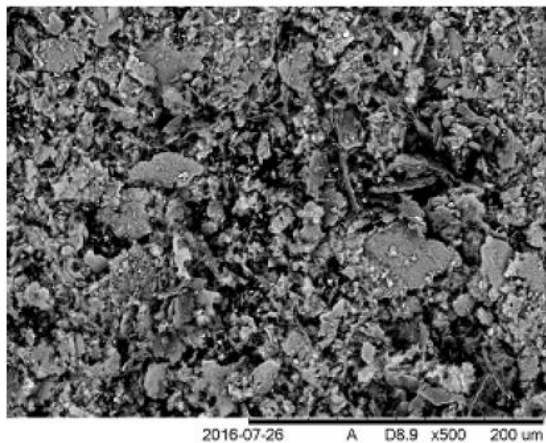


DEMEC \ CTG

**Figura 16** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 5% de Silício processados por 30 Minutos

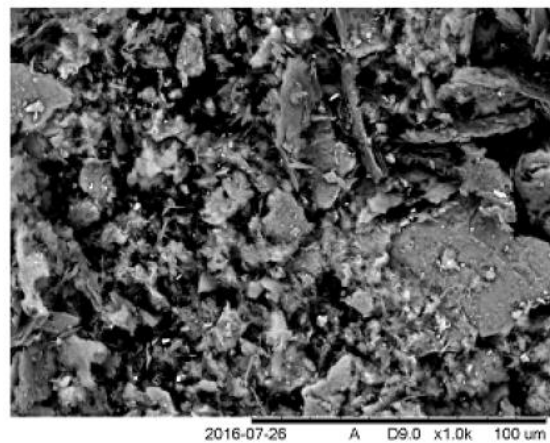
### 3.3.2 MEV da Liga AA4XXX com 5% de Silício Processados por 60 Minutos

As figuras 17 e 18 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 5% de Silício Processados por 60 Minutos:



DEMEC \ CTG

**Figura 17** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 5% de Silício processados por 60 Minutos

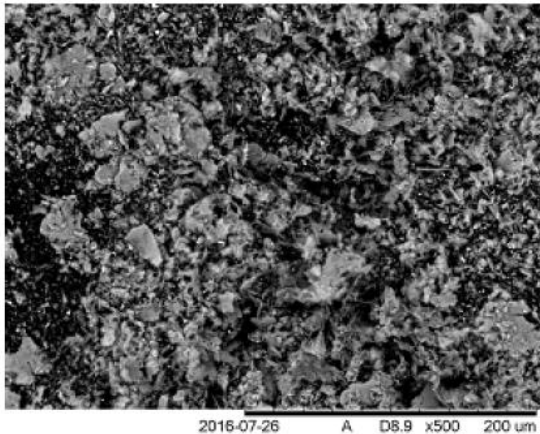


DEMEC \ CTG

**Figura 18** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 5% de Silício processados por 60 Minutos

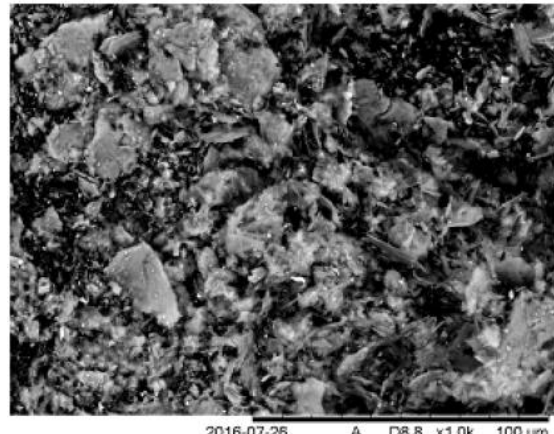
### 3.3.3 MEV da Liga AA4XXX com 5% de Silício Processados por 120 Minutos

As figuras 19 e 20 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 5% de Silício Processados por 120 Minutos:



DEMEC \ CTG

**Figura 19** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 5% de Silício processados por 120 Minutos

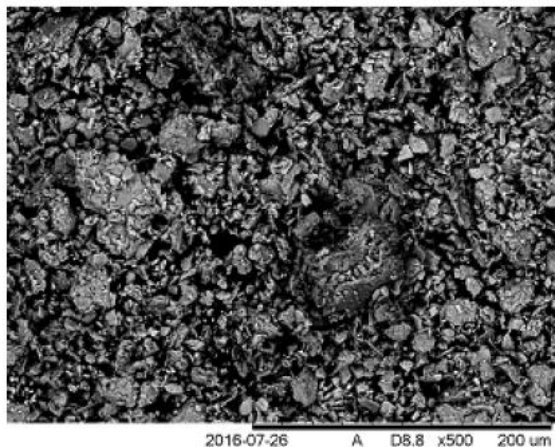


DEMEC \ CTG

**Figura 20** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 5% de Silício processados por 120 Minutos

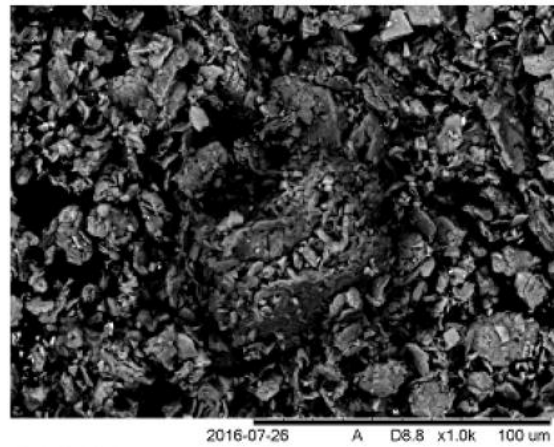
### 3.3.4 MEV da Liga AA4XXX com 10% de Silício Processados por 30 Minutos

As figuras 21 e 22 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 10% de Silício Processados por 30 Minutos:



DEMEC \ CTG

**Figura 21** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 10% de Silício processados por 30 Minutos



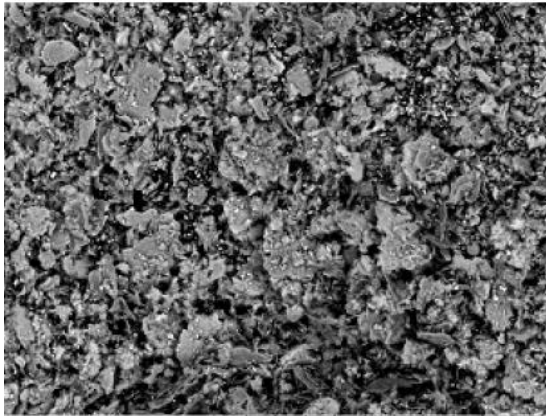
DEMEC \ CTG

**Figura 22** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 10% de Silício processados por 30 Minutos

### 3.3.5 MEV da Liga AA4XXX com 10% de Silício Processados por 60 Minutos

As figuras 23 e 24 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 10% de Silício Processados por 60 Minutos:

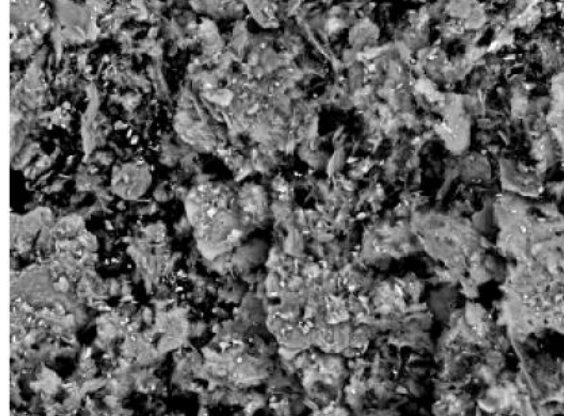




2016-07-26 A D8.7 x500 200 um

DEMEC \ CTG

**Figura 23** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 10% de Silício processados por 60 Minutos



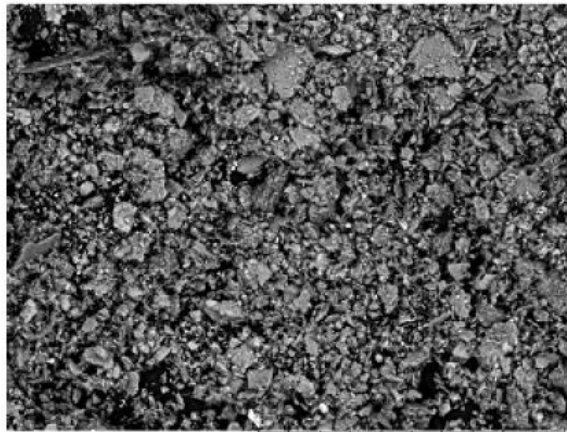
2016-07-26 A D8.7 x1.0k 100 um

DEMEC \ CTG

**Figura 24** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 10% de Silício processados por 60 Minutos

### 3.3.6 MEV da Liga AA4XXX com 10% de Silício Processados por 120 Minutos

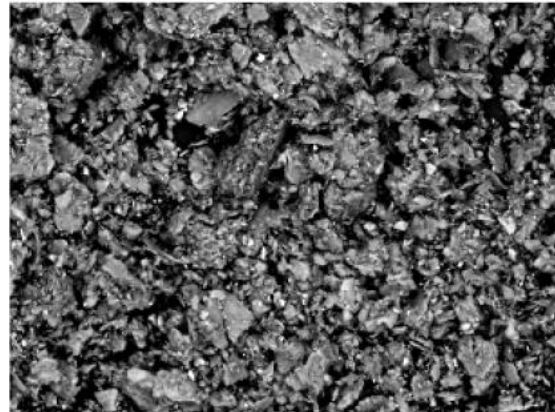
As figuras 25 e 26 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 10% de Silício Processados por 120 Minutos:



2016-07-26 A D8.7 x500 200 um

DEMEC \ CTG

**Figura 25** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 10% de Silício processados por 120 Minutos



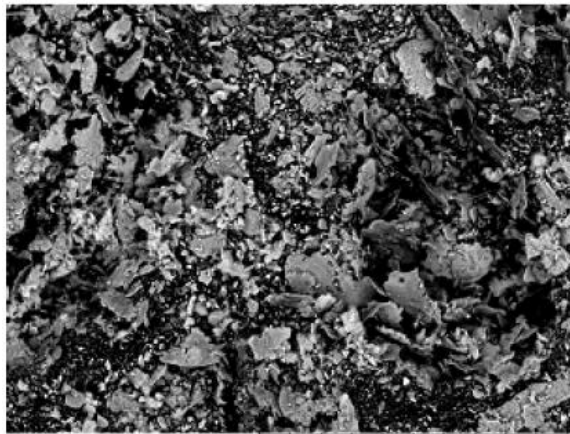
2016-07-26 A D8.7 x1.0k 100 um

DEMEC \ CTG

**Figura 26** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 10% de Silício processados por 120 Minutos

### 3.3.7 MEV da Liga AA4XXX com 13% de Silício Processados por 30 Minutos

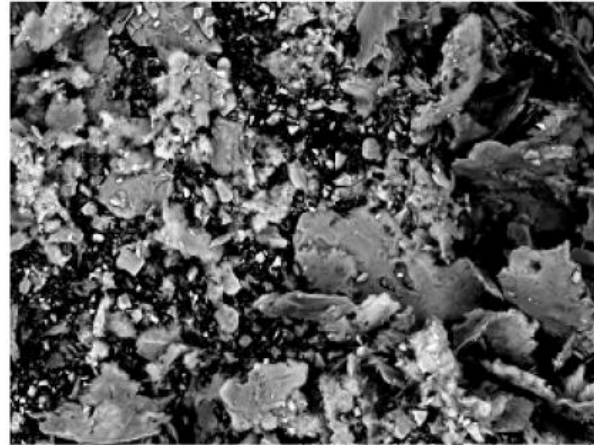
As figuras 27e 28 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 13% de Silício Processados por 30 Minutos:



DEMEC \ CTG

2016-07-27 A D8.9 x500 200 um

**Figura 27** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 13% de Silício processados por 30 Minutos



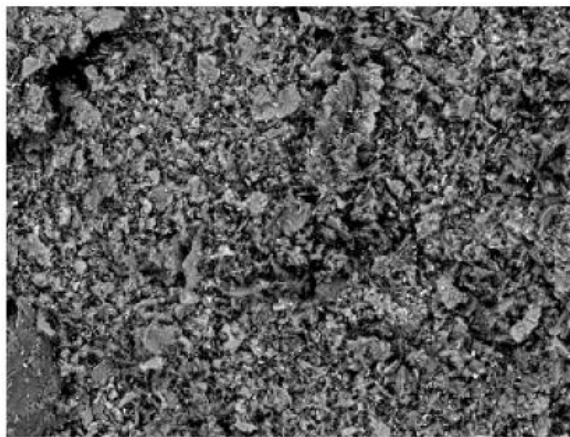
DEMEC \ CTG

2016-07-27 A D8.9 x1.0k 100 um

**Figura 28** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 13% de Silício processados por 30 Minutos

### 3.3.8 MEV da Liga AA4XXX com 13% de Silício Processados por 60 Minutos

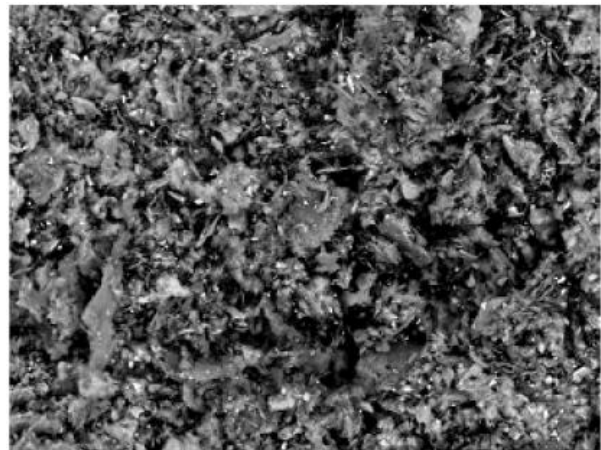
As figuras 29 e 30 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 13% de Silício Processados por 60 Minutos:



DEMEC \ CTG

2016-07-27 A D8.8 x500 200 um

**Figura 29** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 13% de Silício processados por 60 Minutos



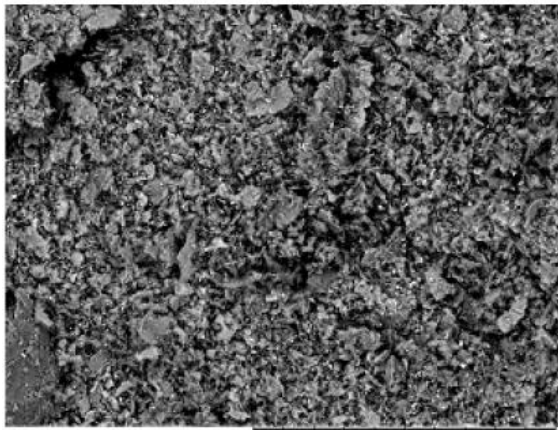
DEMEC \ CTG

2016-07-27 A D8.9 x1.0k 100 um

**Figura 30** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 13% de Silício processados por 60 Minutos

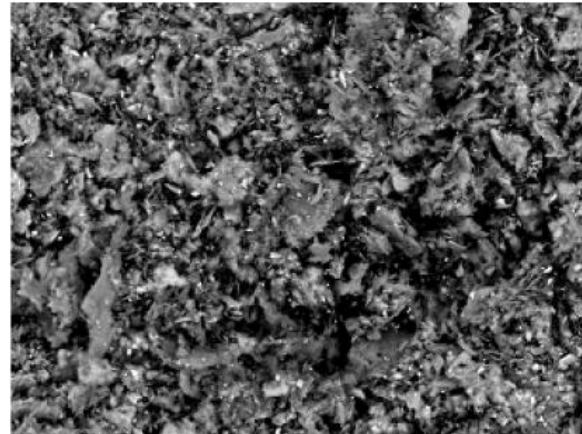
### 3.3.9 MEV da Liga AA4XXX com 13% de Silício Processados por 120 Minutos

As figuras 31 e 32 apresentam imagens de MEV da Liga AA4XXX com 13% de Silício Processados por 120 Minutos:



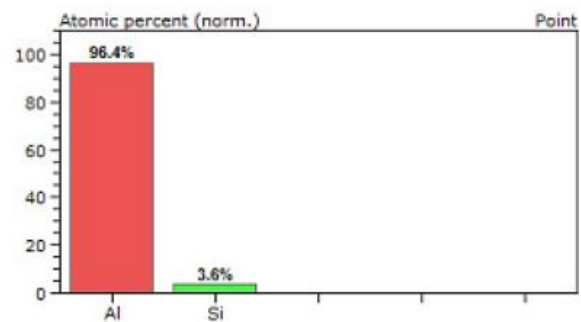
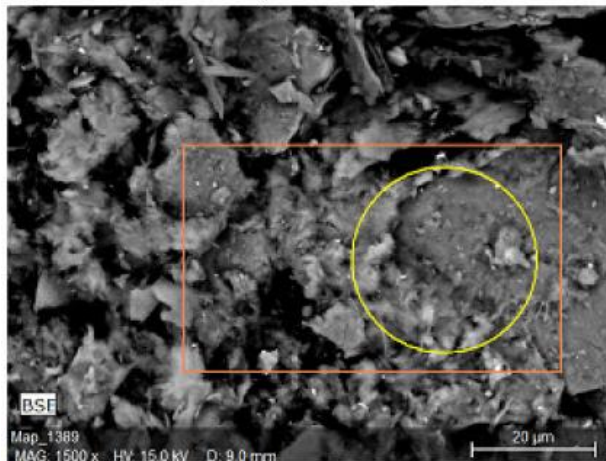
DEMEC\CTG

**Figura 31** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 13% de Silício processados por 120 Minutos



DEMEC\CTG

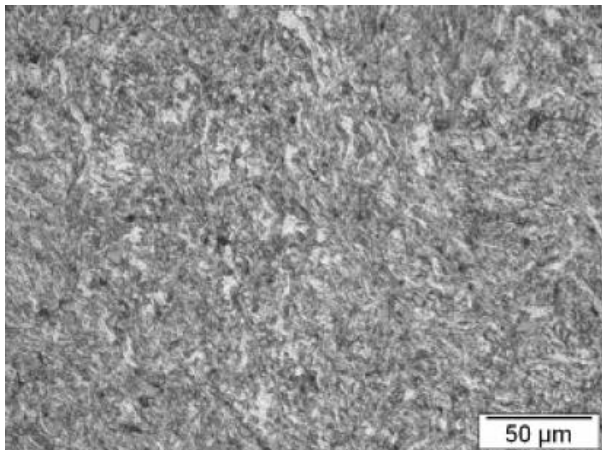
**Figura 32** – Imagem de MEV dos pós da liga AA4XXX com 13% de Silício processados por 120 Minutos



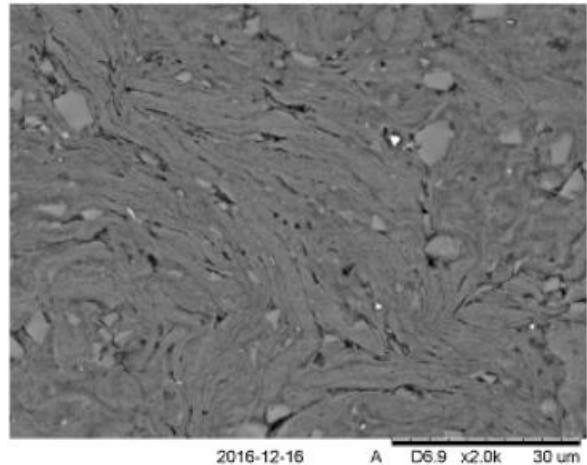
**Figura 33** – EDS da liga AA4XXX com 5% de silício processada por MAE durante 60 minutos

### 3.4 Imagens de Microscopia Óptica (MO) e Eletrônica de Varredura dos Sinterizados das Ligas da Série AA4XXX

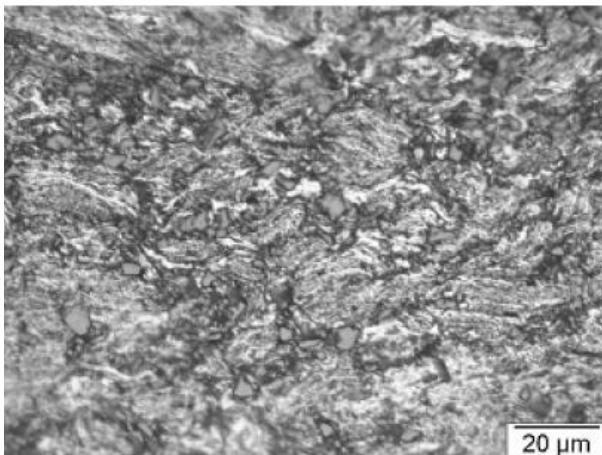
As figuras 34 a 39 apresentam imagens de MO e de MEV dos sinterizados das ligas da série AA4XXX. Os corpos de prova em questão foram sinterizados a 500°C sob atmosfera de nitrogênio (N<sub>2</sub>) durante 5 horas.



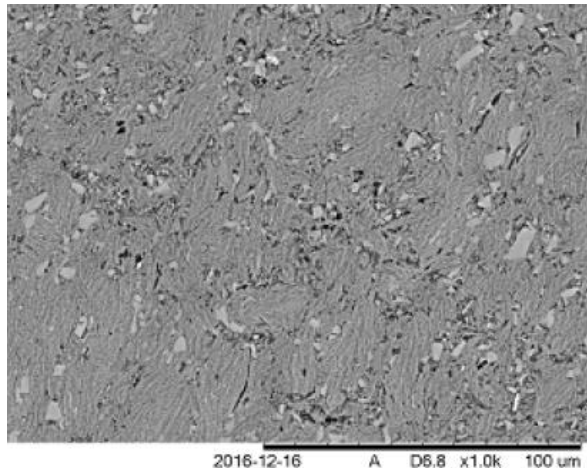
**Figura 34** – Imagem de MO da liga Al-Si com 5% de silício



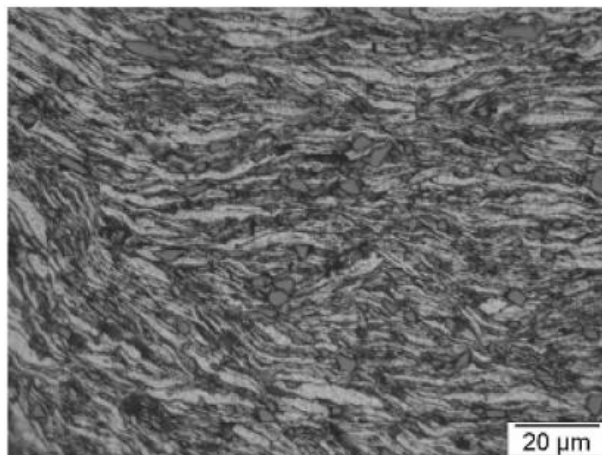
**Figura 35** – Imagem de MEV da liga Al-Si com 5% de silício



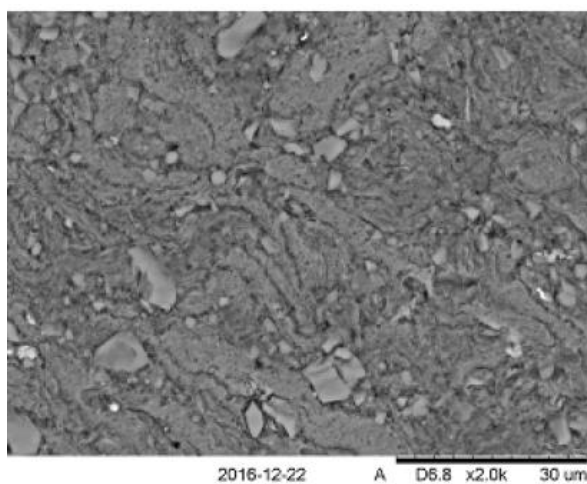
**Figura 36** – Imagem de MO da liga Al-Si com 10% de silício



**Figura 37** – Imagem de MEV da liga Al-Si com 10% de silício



**Figura 38** – Imagem de MO da liga Al-Si com 13% de silício

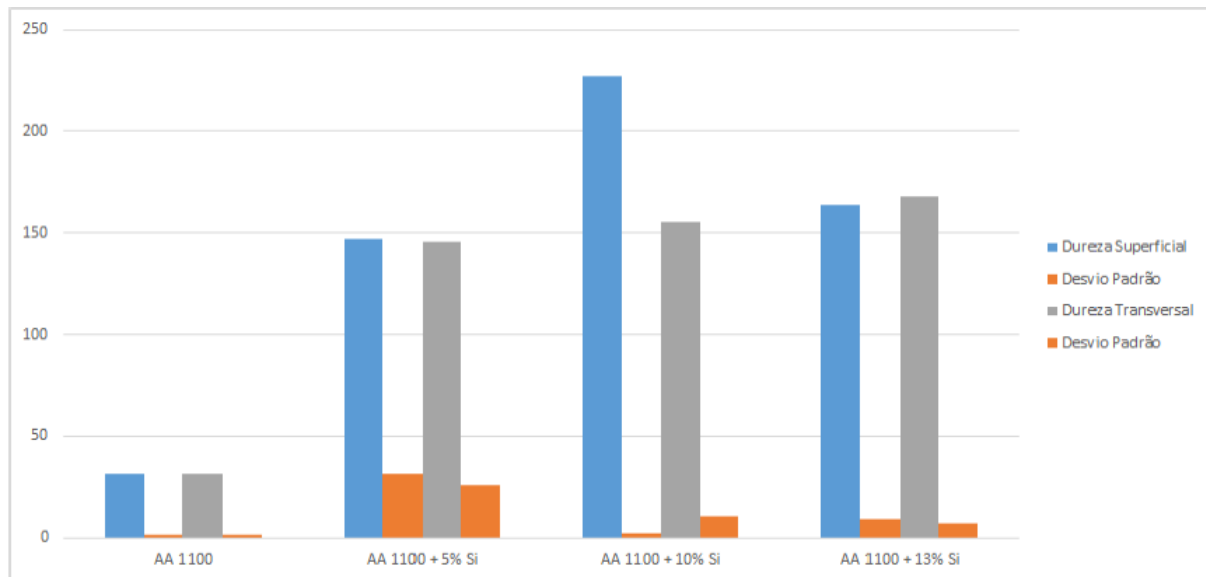


**Figura 39** – Imagem de MEV da liga Al-Si com 13% de silício

As figuras 34 a 39 apresentam imagens de Microscopia Óptica (MO) e de Microscopia Eletrônica de Varredura onde se evidencia a morfologia texturizada (marmorizada) em forma de lamelas das ligas Al-Si (8,9).

### 3.5 Microdureza Vickers das ligas Al-Si (AA4XXX) com 5, 10 e 13% de silício

A figura 40 apresenta o gráfico com os resultados dos ensaios de microdureza Vickers das ligas Al-Si (AA4XXX) com 5, 10 e 13% de silício.



**Figura 40** - resultados dos ensaios de microdureza Vickers das ligas Al-Si (AA4XXX) com 5, 10 e 13% de silício

## 4. CONCLUSÕES

- Obteve-se com relativo sucesso através de técnicas de Metalurgia do Pó (MP) de Moagem de Alta Energia (MAE), compactação uniaxial a frio e sinterização sob atmosfera de N<sub>2</sub> as ligas da série AA4XXX com 5, 10 e 13% de silício.
- Em todos os compósitos avaliados a incorporação da fase de Silício apresentou uma maior incorporação do reforço no processo de moagem de alta energia (MAE) nos maiores tempos de moagem. Por outro lado, o aumento dos tempos de moagem propiciaram uma redução dos tamanhos de partícula. É de se observar também que o aumento da fração da fase de reforço de silício contribuiu para a redução dos tamanhos do processo de fragmentação das mesmas durante a moagem.
- A eficiência da Moagem de Alta Energia (MAE) utilizando o moinho vibratório SPEX no que concerne a obtenção das ligas de Al-Si é verificada pelos espectros de DRX e imagens de MEV.
- As imagens de MEV apresentaram boa densificação, pouca porosidade e boa distribuição da fase de reforço para a liga com 13% de Si e 120 minutos de moagem.

- Os resultados de microdureza apresentaram-se crescentes com o aumento da quantidade de silício (Si).

## REFERÊNCIAS

- 1 A Metalurgia do Pó: Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental – Vários – Editora Metallum Eventos Técnicos e Científicos. 1ª. Edição, 2009.
- 2 ABAL Associação Brasileira de Alumínio, 2013.
- 3 RACK, H.J. Fabrication of High Performance Powder-Metallurgy Aluminium Matrix Composites, in: Metal-Matrix Composites Vienna, UNIDO, p:80-91, (Advances in Material Technology: Monitor, v. 17), 1990.
- 4 D.Charles, “Addressing the challenge of aircraft component design and manufacture from MMCs”, J.Aerospace Eng.(Proc. IMechE), p:1-13, 1992.
- 5 Richard T.Holt, “recente developments in aluminium technology for aerospace applications”, Canadian Aeronautics and Space J., v:35, p:128-147, Sept-1989.
- 6 Benjamim, J. S. and Volin, T. E. – The Mechanism of Mechanical Alloying – Metallurgical Transactions, vol. 5, p 1929 – 1934, 1974.
- 7 Gilman, P. S. and Nix, W. D. – The Structure and Properties of Aluminum Alloys Produced by Mechanical Alloying – Powder Processing and Resultant Powder Structures - Metallurgical Transactions A, Vol. 12A p 813 – 824, 1981.
- 8 Koch C. C., Synthesis of nanostructural Materials by Mechanical Milling: Problems and Opportunities, Nanostructured Materials, V9, n 1-8, p. 13-22, 1997.
- 9 Murty, B. S.and Ranganathan, S. – Novel Material Synthesis by Mechanical Alloying/ Milling – Mater. Rev. v 43, n 3, p. 101-141, 1998.