

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

ANÁLISE DE MISTURAS DE AL – ZN – MG PARA A PRODUÇÃO DE  
COMPONENTES SINTERIZADOS VIA METALURGIA DO PÓ CONVENCIONAL

THARSO MACHADO DA COSTA

Orientador: Professor Dr. Rafael Menezes Nunes

Porto Alegre  
2019

THARSO MACHADO DA COSTA

ANÁLISE DE MISTURAS DE Al – Zn – Mg PARA A PRODUÇÃO DE  
COMPONENTES SINTERIZADOS VIA METALURGIA DO PÓ CONVENCIONAL

Trabalho de Diplomação de Curso  
apresentado junto ao curso de graduação  
em Engenharia Metalúrgica da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Porto Alegre  
2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

### CIP - Catalogação na Publicação

DA COSTA, THARSO MACHADO  
ANÁLISE DE MISTURAS DE AL - ZN - MG PARA A PRODUÇÃO  
DE COMPONENTES SINTERIZADOS VIA METALURGIA DO PÓ  
CONVENCIONAL / THARSO MACHADO DA COSTA. -- 2019.  
61 f.  
Orientador: RAFAEL MENEZES NUNES.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. METALURGIA DO PÓ. 2. ALUMÍNIO. 3. SINTERIZAÇÃO.  
I. MENEZES NUNES, RAFAEL, orient. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus primeiramente, por ser o alicerce que me sustenta;

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes pela oportunidade, orientação e confiança;

À minha namorada, que me ajudou de forma intensiva para a realização do trabalho, me dando apoio e carinho;

Ao Gilceu Dos Santos Cardoso pela oportunidade de conhecer mais afundo a Metalurgia do Pó e também por toda ajuda durante a realização do trabalho;

Ao LdTM pela estrutura fornecida;

Aos colegas do laboratório LdTM pela grande ajuda e contribuição de todos;

Aos meus familiares por sempre estarem comigo;

A professora Gelsa Edith Navarro Hidalgo do laboratório LAPROM por toda ajuda nas análises de MEV.

## RESUMO

O crescente uso da Metalurgia do Pó para obtenção de peças tem sido uma técnica atrativa para a fabricação em grande escala de componentes mecânicos com elevada qualidade. O alumínio tem sido amplamente explorado nas indústrias automotiva e aeroespacial devido a diversas características como baixa densidade, resistência à corrosão e sua capacidade de ser combinado com outros elementos como zinco e magnésio a fim de melhorar as propriedades mecânicas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da adição de elementos como zinco e magnésio em uma matriz de alumínio nas propriedades mecânicas e metalúrgicas via Metalurgia do Pó. Foram feitas as seguintes misturas: alumínio puro, alumínio com adição de 1% em massa de magnésio (Al-1%Mg), alumínio com adição de 8% em massa de zinco (Al-8%Zn) e alumínio com adição de 8% em massa de zinco e 1% em massa de magnésio (Al-8%Zn-1%Mg), todas contendo 0,8% em massa de lubrificante Acrawax-C. Antes e depois de passar pelo processo de sinterização, as amostras foram caracterizadas quanto à densidade a fim de realizar análises comparativas em relação às densidades das amostras verdes e teóricas. Utilizou-se a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para verificar a porosidade dos materiais e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para o mapeamento da dispersão dos elementos nas diferentes misturas. Por meio do ensaio de microdureza Vickers foram avaliadas as alterações nas propriedades mecânicas superficiais das amostras. No ensaio de compressão, pode-se avaliar a influência dos aditivos na tensão de escoamento dos materiais. Foi utilizada ainda a microscopia óptica para realização metalográfica das amostras. A partir das análises realizadas, concluiu-se que a adição combinada dos elementos zinco e magnésio propiciaram os melhores resultados, pois apesar de um resultado não tão favorável na análise de densidade, apresentou menor porosidade e melhor distribuição dos materiais, maior microdureza superficial e melhor tensão de escoamento, propriedades importantes que atendem às necessidades das aplicações destes materiais na metalurgia.

Palavras-chave: Alumínio. Al-Zn-Mg. Sinterização.

## ABSTRACT

The growing use of Powder Metallurgy to obtain parts has been an attractive technique for manufacturing large-scale mechanical components with high quality. Aluminum has been extensively exploited in the automotive and aerospace industries due to various characteristics such as low density and corrosion resistance and its ability to be combined with other elements such as zinc and magnesium in order to improve mechanical properties. This work aimed to evaluate the influence of the addition of elements such as zinc and magnesium in an aluminum matrix in the mechanical and metallurgical properties via Powder Metallurgy. The following mixtures were made: pure aluminum, aluminum with 1% by weight addition of magnesium (Al-1% Mg), aluminum with addition of 8% by weight of zinc (Al-8% Zn) and aluminum with addition of 8% by weight of zinc and 1% by weight of magnesium (Al-8% Zn-1% Mg), all containing 0,8% Acrawax-C lubricant. The samples were characterized before and after the sintering process for density in order to execute comparative analyzes in relation to the densities of the green and theoretical samples. The porosity of the materials was observed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and the mapping of the dispersion of the elements in the different mixtures by dispersive energy spectroscopy (EDS). In the Vickers microhardness test the changes in the surface mechanical properties of the samples were evaluated. The influence of the additives on the material the tension-stress can be evaluate by the compression test. The metallographic analysis was used by optical microscopy. Based on the analysis it was concluded that the combined addition of the zinc and magnesium elements provided the best results, because despite of not so favorable result in the density analysis, that samples presented lower porosity and better distribution of materials, better superficial microhardness and better flow properties, important properties that meet the needs of the applications of these materials in metallurgy.

Keywords: Aluminum. Al-Zn-Mg. Sintering.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quadro comparativo entre os meios de fabricação. ....	16
Figura 2 – Representação esquemática de atomizador de pós-metálicos. ....	18
Figura 3 – Esquema moinho atritor. ....	18
Figura 4 – Misturadores do tipo (a) "V" e (b) Duplo Cone. ....	20
Figura 5 – Processo de compactação. ....	21
Figura 6 – Ilustração sinterização fase sólida. v = difusão volumétrica, b = difusão por contorno de grão, s = difusão superficial, e = vaporização/condensação. ....	23
Figura 7 – Etapas da sinterização por fase líquida. ....	24
Figura 8 – Etapa do processo de sinterização. ....	25
Figura 9 – Diagrama de fases Al-Zn. ....	34
Figura 10 - Diagrama das etapas realizadas neste trabalho. ....	35
Figura 11 - Misturador duplo cone. ....	37
Figura 12 – Matriz de compactação mostrada de perfil, junto com os punções inferior (menor) e superior (maior). ....	39
Figura 13 - Curva de compressibilidade para Al+0,8%Acrax-c. ....	44
Figura 14 – Média das densidades das amostras verdes e sinterizadas. ....	45
Figura 15 - Percentual de densificação das amostras verdes e sinterizadas. ....	45
Figura 16 – Al – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x. ....	47
Figura 17 – Mistura Al-1%Mg – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x. ....	48
Figura 18 – Mistura Al-8%Zn – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x. ....	48
Figura 19 – Mistura-Al-8%Zn-1%Mg – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x. ....	49
Figura 20 – a) Fotomicrografia obtida através de MEV mostrando a região da amostra Al-1%Mg onde foram realizadas as análises; b) Espectros dos elementos via EDS da mistura; c) Mapeamento do alumínio via EDS; d) Mapeamento do magnésio via EDS. ....	50
Figura 21 – a) Fotomicrografia obtida através de MEV mostrando a região da amostra Al-8%Zn onde foram realizadas as análises; b) Espectros dos elementos via	

EDS da mistura; c) Mapeamento do alumínio via EDS; d) Mapeamento do zinco via EDS. ....	50
Figura 22 - a) Fotomicrografia obtida através de MEV mostrando a região da amostra Al-8%Zn-1%Mg onde foram realizadas as análises; b) Espectros dos elementos via EDS da mistura; c) Mapeamento do alumínio via EDS; d) Mapeamento do zinco via EDS. e) Mapeamento do magnésio via EDS.....	51
Figura 23 – Gráfico das médias das microdurezas para as amostras de alumínio puro, Al-1%Mg, Al-8%Zn e Al-8%Zn-1%Mg. ....	52
Figura 24 - Gráfico do ensaio de compressão. ....	53
Figura 25 - Imagem obtida através de microscopia óptica, com aumento de 100x, mostrando o (a) alumínio puro e (b) a mistura Al-1%Mg. ....	53
Figura 26 – Imagem obtida através de microscopia óptica, com aumento de 100x, mostrando o elemento Zn distribuído indicado pela seta vermelha nas misturas (a) Al-8%Zn e (b) Al-8%Zn-1%Mg. ....	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistema de designação das ligas forjadas de alumínio.....	29
Tabela 2 – Composições de ligas de alumínio por MP.....	29
Tabela 3 – Composição química do pó de alumínio conforme dados do fabricante.	36
Tabela 4 – Composição química do pó de zinco conforme dados do fabricante. ....	36
Tabela 5 – Composição química do pó de magnésio conforme dados do fabricante. .....	36
Tabela 6 – Composição química das misturas produzidas.....	37
Tabela 7 – Ciclo de sinterização. ....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS

Al – Alumínio

Cu – Cobre

Mg – Magnésio

Mn – Manganês

Si – Silício

Zn – Zinco

O – Oxigênio

DRX – Difração de Raios-X

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MP – Metalurgia do Pó

Ni-Cr – Níquel Cromo

SiC – Carbetto de Silício

AA – *Aluminum Association*

MPa – Mega Pascal

°C – Graus Celsius

g – Gramas

LdTM – Laboratório de Transformação Mecânica

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

kN – Quilo Newton

kV – quilovolt

LAPROM – Laboratório de Processamento Mineral

## SUMÁRIO

CAPA .....	1
FOLHA DE ROSTO .....	2
AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT .....	6
LISTA DE FIGURAS .....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS .....	10
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS .....	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 METALURGIA DO PÓ .....	16
3.1.1 Produção dos Pós.....	17
3.1.2 Mistura dos Pós .....	19
3.1.3 Compactação dos Pós .....	20
3.1.4 Sinterização .....	22
3.2 ALUMÍNIO .....	27
3.2.1 Ligas de alumínio.....	28
3.2.2 Sinterização das ligas de alumínio .....	31
3.2.3 Elementos de liga .....	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	35
4.2 MATERIAIS .....	36
4.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	36
4.3.1 Mistura dos pós.....	37
4.3.2 Curva de compressibilidade .....	38
4.4 PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	38
4.5 SINTERIZAÇÃO CONVENCIONAL.....	40
4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	41
4.6.1 Densidade das amostras .....	41
4.6.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	41
4.6.3 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	42
4.6.4 Microdureza Vickers .....	42
4.6.5 Ensaio de compressão.....	42
4.6.6 Análise Metalográfica .....	43

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1	CURVA DE COMPRESSIBILIDADE.....	44
5.2	DENSIDADE.....	45
5.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	47
5.4	ANÁLISE QUÍMICA DAS AMOSTRAS VIA EDS.....	49
5.5	MICRODUREZA VICKERS.....	51
5.6	ANÁLISE DO ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	52
5.7	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	53
6	CONCLUSÕES.....	55
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
8	REFERÊNCIAS.....	58

## 1 INTRODUÇÃO

A competitividade entre as empresas exige cada vez mais que os meios de fabricação dos produtos sejam eficientes, e para isso, levam-se em conta vários aspectos desde o planejamento à execução, objetivando produzir mais com menos esforços e menos tempo, logo obtém-se uma economia de recursos que, possivelmente, colabora com a preservação do meio ambiente. O crescente uso de Metalurgia do Pó (MP) para obtenção de peças tem sido uma técnica atrativa neste quesito para a fabricação de componentes mecânicos com elevada qualidade e controle dimensional. Através deste processo, os custos de produção são reduzidos devido ao aumento do número de peças a serem fabricadas, se tornando uma alternativa atraente para a produção de grandes lotes de peças (BRUNATTO, 2000).

A sinterização, parte mais importante do processo de Metalurgia do Pó, é onde acontece a consolidação das partículas que compõem o material. Esta etapa acontece na faixa de aproximadamente dois terços da temperatura de fusão do material. A MP apresenta grande vantagem em relação aos processos convencionais de fabricação em razão da etapa de sinterização, pois fornece um produto final com excelente precisão dimensional, de alta complexidade geométrica e também com uma produção em alta escala. Apresenta menor tempo de execução, alta pureza e controle da composição química dos produtos, facilidade de automação do processo, menor consumo de energia, alto aproveitamento de matéria prima e conseqüentemente menor custo de fabricação, capacidade de produzir produtos complexos com microestrutura uniforme, entre outras características (UPADHYAYA, 2002).

O alumínio (Al) vem ganhando cada vez mais importância no dia a dia das indústrias metalúrgicas. Sua produção aumentou cerca de treze (13) vezes mais nos últimos 60 anos. Esse elemento tem sido amplamente explorado nas indústrias automotiva e aeroespacial devido a diversas propriedades como baixa densidade, baixo ponto de fusão, resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, alta durabilidade, versatilidade, etc. podendo ainda ser combinado com diversos elementos químicos a fim de elevar ainda mais suas vantagens para formar ligas. O alumínio é um elemento muito utilizado na Metalurgia do Pó, porém quando sinterizado isoladamente apresenta características como baixa resistência a esforços mecânicos e baixos níveis de dureza (ZHANG et al, 2019).

Muitos elementos metálicos podem ser combinados com o alumínio para formar as suas ligas, sendo os mais utilizados: cobre (Cu), magnésio (Mg), manganês (Mn), silício (Si) e o zinco (Zn). A escolha dos elementos e sua proporção nessa adição dependem das propriedades finais que se quer obter. Sabe-se que no processo de fundição as ligas de alumínio contendo magnésio, da série 5XXX, caracterizam-se pela elevada resistência à corrosão e excelente usinabilidade, assim como as ligas fundidas de alumínio contendo zinco e magnésio, da série 7XXX, apresentam boas propriedades mecânicas (REIS, 2017). Porém o estudo destas misturas a partir da MP precisa ser mais explorado. No presente estudo utilizou-se o magnésio adicionado a uma matriz de alumínio, para comprovar sua capacidade de formar a fase  $MgAl_2O_4$  que rompe a camada superficial de óxido nas partículas de pó do alumínio e o elemento zinco por possuir um baixo ponto de fusão garantindo a possível sinterização por fase líquida que melhora o processo, colaborando intensamente para uma melhor densificação do material. Estes materiais metálicos combinam suas características mecânicas com as do alumínio a fim de gerar um novo produto com as melhores propriedades de cada componente.

Este trabalho foi idealizado para avaliar a influência da adição de elementos como zinco e magnésio em uma matriz de alumínio nas propriedades mecânicas e metalúrgicas via Metalurgia do Pó.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da adição de elementos como zinco e magnésio em uma matriz de alumínio nas propriedades mecânicas e metalúrgicas via Metalurgia do Pó.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterização mecânica e metalúrgica do alumínio puro e das misturas binárias Al-8%Zn e Al-1%Mg e ternária Al-8%Zn-1%Mg, via Metalurgia do Pó, por meio das seguintes análises:

- Análise comparativa da densidade dos corpos de prova verdes e sinterizados;
- Análise comparativa das densidades encontradas das amostras com suas respectivas densidades teóricas;
- Análise microestrutural das amostras sinterizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Análise do mapeamento da dispersão dos elementos aditivos após a sinterização através de espectroscopia de energia dispersiva (EDS)
- Análise de microdureza superficial dos corpos de prova sinterizados;
- Análise das características mecânicas das amostras sinterizadas por ensaio de compressão.
- Análise metalográfica das amostras sinterizadas;
- Comparação dos resultados obtidos entre as amostras binárias, ternária e a amostra de alumínio.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 METALURGIA DO PÓ

A técnica de conformação de pós através da Metalurgia do Pó (MP) não é recente. Antigas civilizações, como os egípcios e os incas, já produziam certos instrumentos utilizando metais preciosos em pó. O avanço nesta área aconteceu na década de 1920 com a produção de carbonetos de tungstênio e buchas de bronze para rolamentos. Com a chegada da Segunda Guerra Mundial e a necessidade de novos recursos tecnológicos e armamento, houve um desenvolvimento crescente no processo. Neste período foi produzida uma variedade de peças ferrosas e não-ferrosas, incluindo muitos compósitos. Desde então, a MP expandiu-se cada vez mais, pelo processamento econômico e propriedades únicas (UPADHYAYA, 2002).

A MP, quando comparada aos meios convencionais de fabricação, oferece como principais benefícios o controle da composição química, perda mínima da matéria-prima, bom acabamento superficial, precisão dimensional, diversificação de composição química e controle microestrutural durante o processo. Apresenta também como vantagem ser um processo que não precisa de trabalhos posteriores (GERMAN, 1996).

Com a automação do processo, a MP aproveita quase totalmente os materiais utilizados e o baixo consumo energético por quilograma por peça fabricada, faz a MP ser uma alternativa atrativa em relação aos meios convencionais (EPMA, 2019). A Figura 1 mostra esse comparativo.

Metalurgia do pó consiste em uma técnica de produção de peças metálicas a partir de metais e suas ligas em formato de pó. Após produzidos, os pós são convenientemente misturados, submetidos a uma operação de compactação utilizando matrizes com dimensões definidas. Em seguida, os compactados são sinterizados, ou seja, aquecidos em condições controladas de temperatura, tempo e ambiente, de modo a produzir uma consolidação das peças e conferir a estrutura, densidade e propriedades mecânicas desejadas (CHIAVERINI, 1996).

Figura 1 – Quadro comparativo entre os meios de fabricação.





Fonte: KLEIN, 2009.

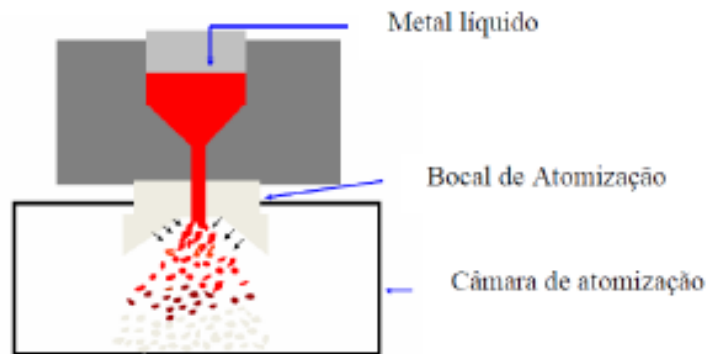
### 3.1.1 Produção dos Pós

A qualidade do pó está diretamente ligada ao processo de fabricação, por isso deve-se ter um controle rigoroso durante a produção. A técnica de produção influencia diretamente nas particularidades do pó, como formato, tamanho e composição de partícula que afetam os processos de compactação e sinterização e assim as qualidades da peça final (CHIAVERINI, 1996).

Os principais métodos de fabricação dos pós são os métodos físicos, métodos químicos e métodos mecânicos. Nos métodos mecânicos a moagem e a atomização destacam-se, sendo que na produção via atomização a quantidade de pós produzida é maior e também é a mais utilizada nas indústrias (LUMLEY, 2011).

Conforme representado na Figura 2, a obtenção do pó se dá forçando o metal líquido a passar por um orifício. Na saída, esse fluxo é desintegrado por um jato de água, ar ou gás. O metal então solidifica imediatamente pela ação do jato e pela expansão ao deixar o bocal. Como resultado, pós com diferentes granulometrias e morfologias são obtidos (ZANATTA, 2007).

Figura 2 – Representação esquemática de atomizador de pós-metálicos.



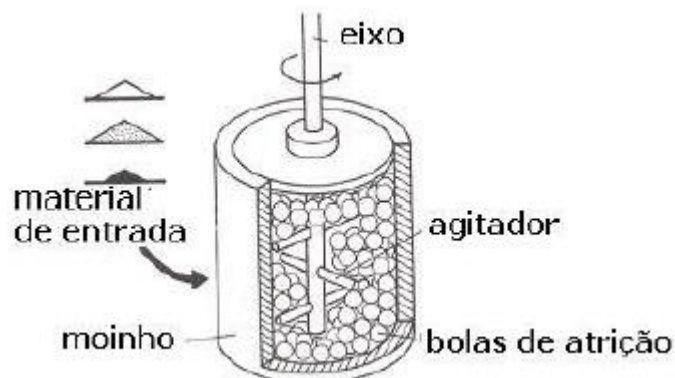
Fonte: FREDEI, 2010.

O pó atomizado diferencia-se dos outros métodos, tais como: eletrólise, redução, precipitação, entre outros pelo seu formato e densidade. Segundo Orlandin (2009), pós atomizados são praticamente livres de porosidade e relativamente compactos, possuem alta densidade de pó solto e baixa área de superfície quando comparado com outros pós. Isto implica diretamente em boa escoabilidade e boa compressibilidade (FILHO, 2016)

A fabricação via moagem é dividida entre materiais frágeis e dúcteis. O processo de moagem em moinho de esferas ou moagem de baixa energia é indicado para materiais frágeis. Para os materiais dúcteis, a moagem de alta energia é a mais utilizada (FILHO, 2016).

O uso de moinhos convencionais na moagem de materiais dúcteis poderia acarretar uma soldagem a frio das partículas de pó, resultando em uma baixa eficiência na produção. Sendo assim, o moinho atritor e o moinho planetário são os mais indicados. A Figura 3 apresenta o moinho atritor.

Figura 3 – Esquema moinho atritor.



Fonte: FILHO, 2016.

### 3.1.2 Mistura dos Pós

A etapa de mistura de pós é de fundamental importância no processo. Esta etapa tem por objetivo obter a homogeneização dos materiais que irão compor a mistura de trabalho, a qual inclui; o material metálico base, os elementos de liga e o lubrificante (LUMLEY, 2011).

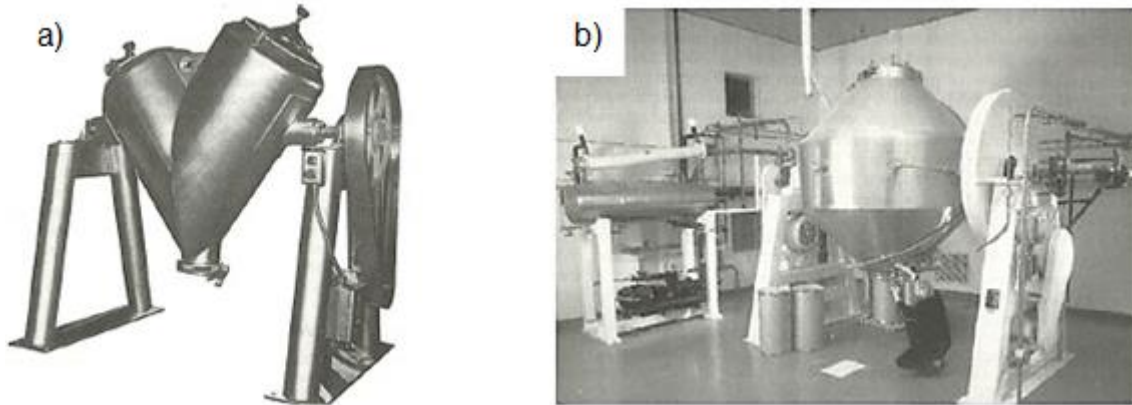
As propriedades obtidas pelo material compactado e posteriormente sinterizado, está ligada diretamente com a diversificação das características dos pós que compõem a mistura. Esses pós, possuindo tamanho de partículas, superfície livre e escoabilidade adequadas, tornam possível adquirir uma peça verde com propriedades melhoradas para a sinterização e assim atingir as especificações desejadas (KLEIN, 2009).

A eficiência da mistura é maior quando o volume de pó ocupa cerca 50 a 60% do volume do misturador. O tempo de mistura pode variar de 5 a 30 minutos. O objetivo é misturar os pós apenas durante o tempo necessário para se obter uma mistura completa. Os misturadores mais comuns na MP são os misturadores tipo duplo cone e misturador em “V” (PEASE, 2002). A Figura 4 apresenta misturador em “V” e o “duplo cone”.

A qualidade da peça final também depende da escolha do lubrificante. O lubrificante serve para lubrificar a mistura facilitando o processo de compactação e remoção da peça da matriz. Os tipos mais comuns de lubrificantes são: ácido esteárico, estearato de zinco, ceras sintéticas, estearato de lítio e etileno bis estearamida (conhecido comercialmente como Acrawax-C) (LUMLEY, 2011). O lubrificante Acrawax-C atualmente é um dos lubrificantes mais frequentemente usados para compactação a frio (GOKÇE & FINDIK, 2008).

A mistura de pós é denominada “*blending*” se os pós são da mesma composição, ou de “*mixing*” se os pós têm composição diferente (UPADHYAYA, 2002).

Figura 4 – Misturadores do tipo (a) "V" e (b) Duplo Cone.



Fonte: PEASE, 2002.

### 3.1.3 Compactação dos Pós

A compactação é a primeira etapa de conformação da peça na MP, na qual a mistura de trabalho é submetida a esforços de compactação. Nesta etapa acontece a densificação dos pós metálicos que se deseja produzir. Após a compactação, o material sai na forma final esperada, com a geometria definida, resistência mecânica para manuseio posterior e com o nível de porosidade reduzido, o que resulta no chamado compactado a verde (GERMAN, 1996).

A prensagem do pó é uma etapa que requer cuidado durante o processo de MP. Uma compactação malfeita pode causar alterações na densificação, logo, o funcionamento da peça produzida pode ficar comprometido (UPADHYAYA, 2002).

Para a compactação podem ser empregados vários tipos de ferramentais (matrizes), tais como; compactação isostática, compactação em matriz rígida (compactação a frio ou a quente), compactação por laminação, extrusão de pós-metálicos e forjamento de pós. A compactação, na maioria dos casos, ocorre em matriz rígida com a aplicação de alta pressão. A pressão de compactação vai depender do pó em questão e da geometria da peça (FERREIRA, 2002).

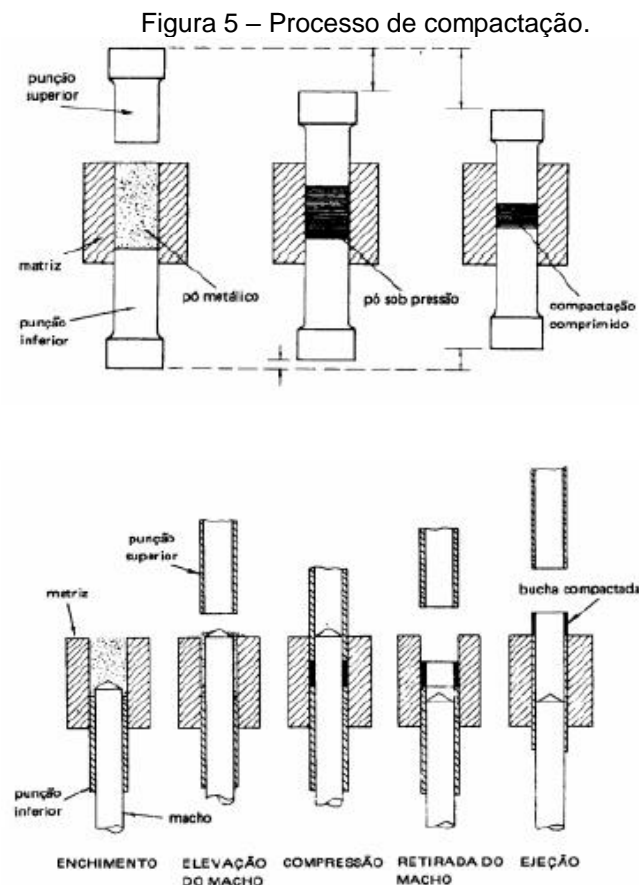
O ciclo de compactação uniaxial é composto pelos movimentos fundamentais: enchimento, compactação, extração e remoção (KLEIN, 2009).

O enchimento da matriz acontece por meio de um silo onde fica armazenada a mistura por meio de mangotes flexíveis até a chegada de sapatas de alimentação (FILHO, 2016; KLEIN, 2009).

Basicamente a compactação em matrizes rígidas pode ser feita através de compactação de ação simples e de ação dupla. A compactação de ação simples é aconselhada para peças cuja relação entre altura e largura são menores. Utilizar este modo em peças que apresentam maior altura relativa causa o chamado “deslocamento da linha neutra”. Com o modo de ação dupla ambos punções, superior e inferior, realizam o movimento de prensagem, sendo assim a linha neutra acaba ficando no centro da peça (FILHO, 2016; KLEIN, 2009).

A extração da peça da matriz termina o processo de compactação. É uma etapa que se deve ter altíssimo cuidado, pois se for feita de maneira brusca pode gerar falhas na peça. A maneira correta é realizada com a elevação do punção inferior ou com o movimento da própria matriz (KLEIN, 2009).

A remoção acontece assim que a matriz é terminada e o compactado verde é removido antes que se inicie novamente o enchimento (KLEIN, 2009). O processo de compactação é mostrado na Figura 5.



Fonte: KLEIN, 2009.

### 3.1.4 Sinterização

A sinterização é um processo termicamente ativado, no qual ocorre a união das partículas do compactado verde através da difusão e transporte de massa. Esta etapa acontece em temperaturas elevadas, podendo formar fase líquida, ou não. A temperatura de sinterização geralmente é  $2/3$  a  $3/4$  da temperatura de fusão do principal constituinte (CHIAVERINI, 1996).

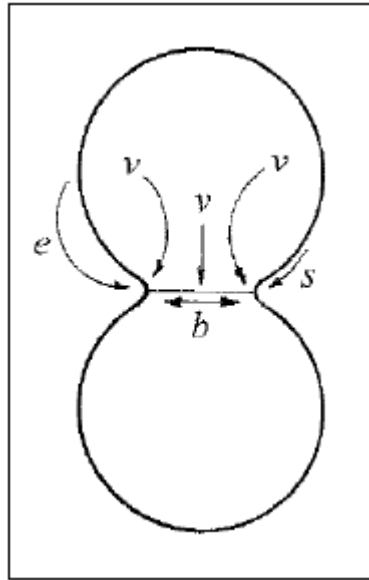
A força motriz da sinterização é a diminuição da energia livre do sistema, no qual acontece a diminuição da curvatura na superfície dos pós e a redução da área superficial total. A sinterização transforma um sistema em desordem, marcado por uma alta energia livre, em um estado estável com uma energia livre e porosidade menores (GERMAN, 1996).

Durante a sinterização ocorre a retração do material levando ao aumento da densidade relativa e também melhorias nas propriedades mecânicas, tais como o aumento significativo na dureza e resistência mecânica e alterações na ductilidade e condutividade térmica em função das transformações microestruturais (GERMAN, 1996).

As duas principais formas de sinterização são a sinterização por fase sólida e a sinterização por fase líquida. Em ambas as formas, a força motriz de sinterização é a diminuição da energia livre de superfície. Estes dois tipos básicos são capazes de densificar, total ou parcialmente, a estrutura. Segundo Brito et al (2007), na sinterização por fase sólida consegue-se um controle melhor sobre a porosidade, ao passo que, na sinterização por fase líquida pode-se obter o fechamento próximo do total da porosidade.

A sinterização por fase sólida, apresentada na Figura 6, acontece sem que haja a formação de qualquer líquido no material. As formas de transporte podem ser: fluxo viscoso, difusão atômica e transporte de vapor. Nesses casos, os constituintes do material são transferidos para a região de contato entre as partículas (KALPAKJIAN, 2000).

Figura 6 – Ilustração da sinterização por fase sólida.  $v$  = difusão volumétrica,  $b$  = difusão por contorno de grão,  $s$  = difusão superficial,  $e$  = vaporização/condensação.



Fonte: GERMAN, 1984.

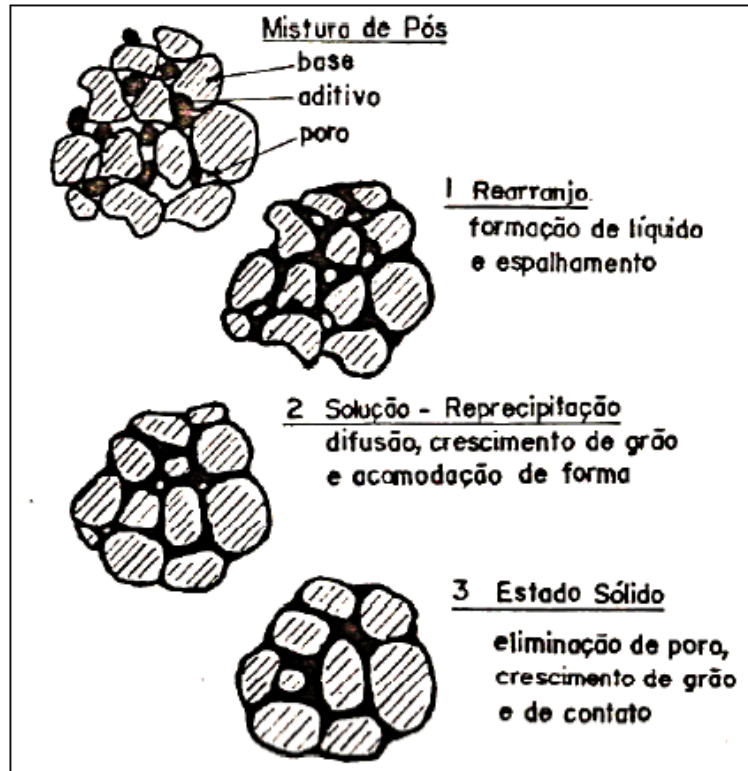
A sinterização por fase líquida, apresentada na Figura 7, é configurada pela formação de líquido no material base. O líquido forma-se a partir da fusão de um dos componentes minoritários do sistema ou ainda da reação entre pelo menos, dois dos elementos integrantes. A presença de fase líquida acelera o processo de sinterização, colaborando intensamente para uma melhor densificação do material. Durante a sinterização, a fase líquida flui entre as partículas de pó e ajuda a densificação por ação capilar, rearranjo de partículas e transporte de massa aprimorado. Com isso, a sinterização por fase líquida é uma alternativa para materiais que são de difícil sinterização por fase sólida (GERMAN, 1996).

German (1985), tendo como base o entendimento dos fenômenos fundamentais de sinterização em fase líquida reconheceu que é possível definir certas características do diagrama de fases ideal. As principais características de um sistema de sinterização de fase líquida ideal são as seguintes:

- O aditivo deve ter um ponto de fusão inferior ao da base. A alternativa é um eutético de baixo ponto de fusão, que é menos vantajoso porque a formação de líquido não ocorre espontaneamente durante o aquecimento.
- A solubilidade do aditivo na base deve ser baixa, pois isso garante que o aditivo permaneça segregado aos limites das partículas e maximize o volume do líquido.

- Enquanto a base deve ser solúvel no líquido, não é necessário que a base seja solúvel no aditivo sólido. Líquidos completamente miscíveis garantem que o transporte de massa não seja restrito. Além disso, a base também deve ter alta difusividade no líquido. Isso garante altas taxas de transporte de massa e, portanto, rápida sinterização.

Figura 7 – Etapas da sinterização por fase líquida.



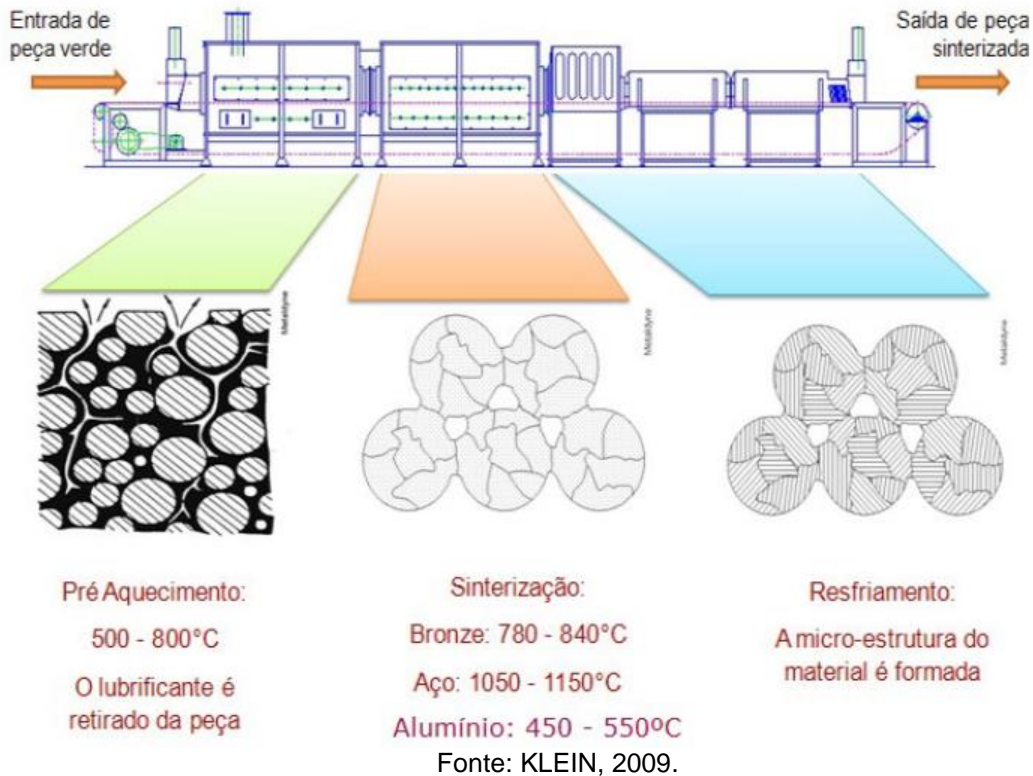
Fonte: GERMAN, 1996.

O processo de sinterização pode ser dividido basicamente em três momentos distintos, como pode ser visto na Figura 8.

No primeiro momento dá-se o pré-aquecimento do material, onde acontece a retirada do lubrificante presente na mistura. O segundo momento é fundamental, no qual acontece a sinterização por difusão do material. O último momento consiste no resfriamento da peça (KLEIN, 2009).



Figura 8 – Etapa do processo de sinterização.



German (1996) descreve o processo de sinterização mais detalhadamente apresentando também três momentos distintos, porém sobre como ocorre a união das partículas:

1. Formação de “*necks*”: Na ligação entre os fragmentos ocorre a formação pescoços, tornando constantes as ligações. Nesta etapa são gerados os contornos de grão que são muito importantes para a densificação. Acontece retração dimensional na peça;

2. Fase intermediária: Nesta fase acontece o aumento da relação entre raio do *neck* e raio da partícula, que aos poucos perde sua forma. Duas “fases” são possíveis de serem identificadas, a fase sólida e os poros. Acontece elevada retração dimensional;

3. Fase final: Neste momento a forma dos poros se torna arredondada (chegando a alcançar 95 a 99% da densidade teórica do material) e eles se separam.

Todo o processo acontece sob condições controladas de tempo, temperatura e atmosfera nos fornos de sinterização (CHIAVERINI, 1996; UPADHYAYA, 2002).

A temperatura tem grande influência na taxa e na magnitude das modificações que ocorrem no decorrer da sinterização. Quanto maior for a temperatura, mais rápidas e maiores serão as mudanças que ocorrerão no sinterizado (LUMLEY, 2011).

Em comparação com a temperatura, o tempo também aumenta o grau de sinterização, mas em menores proporções. O aumento do tempo, em qualquer temperatura, não faz com que toda a porosidade seja removida pela sinterização, pois a força motora do processo diminui ao longo do tempo. Para conseguir as propriedades desejadas das peças sinterizadas é sugerido encurtar o tempo e aumentar a temperatura do processo. No entanto, maiores serão os custos com energia e manutenção (parâmetros se elevam em altas temperaturas) (CHIAVERINI, 1996, MARTIN 2003).

Os fornos para sinterização podem ser a gás, elétricos, de resistência ou de indução (aquecimento a vácuo, geralmente). Os materiais utilizados na confecção dos fornos resistivos são de níquel cromo (Ni-Cr) para temperatura de trabalhos de até 1150 °C, já para o patamar de 1400 °C é utilizado o carbeto de silício (SiC), o molibdênio ou tungstênio proporcionam trabalhos até a temperatura da ordem de 1550 °C, sendo obrigatório o uso de atmosfera protetora redutora de hidrogênio (FERNANDES, 2014).

O cuidado com a atmosfera durante a sinterização se faz necessário para evitar que reações químicas indesejáveis ocorram na peça, tais como, oxidação, redução, carburação, descarburação, nitretação e decomposição, incluindo a eliminação de impurezas. Atmosfera controlada também ajuda a evitar evaporação indesejada do componente principal ou dos elementos de liga e fornece transferência de calor por convecção no forno (THUMMLER & OBERACKER, 1993). Esta atmosfera deve ser compatível com o material de construção do interior do forno e com os elementos de aquecimento, desde que estes estejam em contato com o gás. A prevenção da oxidação é a função mais significativa das atmosferas de sinterização na Metalurgia do Pó. Assim, a maioria dos produtos metálicos e cerâmicos são sinterizados em gases protetores que excluem a atmosfera ambiente. Apenas alguns metais nobres, cerâmicas convencionais e algumas cerâmicas avançadas de óxido são sinterizadas no ar ambiente.

A escolha de uma atmosfera de sinterização adequada no caso do alumínio e suas ligas é de suma importância, pois através dela o material pode obter um ganho das propriedades mecânicas e também alcançar a precisão dimensional desejada. A

utilização da atmosfera de nitrogênio é conveniente pelo fato desse gás ser inerte para grande parte dos metais e ligas, uma vez que não é inflamável (CARDOSO, 2016). O nitrogênio apresenta também outras vantagens em relação ao alumínio, pois o mesmo pode acabar difundindo-se para o interior do material, o que facilita a formação de nitretos (melhoram a sinterização) gerados pelo calor liberado da reação do alumínio com o nitrogênio (SCHAFFER & HALL, 2002).

### 3.2 ALUMÍNIO

Alumínio é um material metálico não-ferroso com uma ampla variedade de utilização e atualmente, um dos mais consumidos no mundo. Possui alta resistência à corrosão (inclusive em ambientes como a água salgada) e ótima condutibilidade térmica e elétrica o que leva às mais diversas aplicações como, trocadores de calor, evaporadores, aquecedores, entre outros. Sua principal limitação é a baixa temperatura de fusão (660 °C) o que restringe a sua aplicação a altas temperaturas (ASM HANDBOOK, 1998).

O alumínio é um metal que possui muita afinidade com o oxigênio, por esta razão ele é permanentemente recoberto por uma camada de óxido, onde a temperatura usada sob determinada atmosfera de exposição tem relação direta com a espessura da camada formada. Esta camada passiva de óxido na superfície do pó pode afetar a interdifusão entre partículas causando uma expansão volumétrica e consequente diminuição da densificação (LUMLEY, 2011).

O alumínio se torna um metal tão atrativo, pois tem facilidade de combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, que são os chamados “elementos de liga”, o que acaba formando as ligas de alumínio usadas na indústria de hoje. Com todas estas combinações, o alumínio se ajusta com facilidade para a maioria de suas aplicações no produto final. Os elementos de liga têm como principal função aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades dos materiais. Desta forma, as novas ligas desenvolvidas estão combinando as propriedades adequadas às aplicações específicas (ABAL, 2019).

Do ponto de vista da engenharia, a densidade é uma das características físicas mais interessante e mais conhecida do alumínio e pôde ser vista em estudos anteriores, com exceção do magnésio. Essa baixa densidade torna o alumínio competitivo em relação aos outros materiais no que diz respeito ao peso, mesmo

quando esses materiais demonstram melhores propriedades volumétricas. Se comparada a densidade do aço, que é cerca de três vezes maior, o alumínio apresenta maior facilidade quanto aos procedimentos de soldagem (manuseio das lâminas e subconjuntos), mesmo com diferenças marcantes, principalmente em relação a procedimentos e custos, o que vem a ser um fator decisório na escolha do alumínio (GOMES, 2001).

### 3.2.1 Ligas de alumínio

Existem atualmente no mercado, ligas de alumínio com resistência mecânica de até 600 MPa, que possibilitam a melhoria das características de eficiência de projeto e podem contribuir para o aumento da velocidade de produção. Um dos principais atributos das ligas de alumínio é a boa usinabilidade no fresamento, fator diferencial na escolha da liga, uma vez que esses processos são relevantes no chão-de-fábrica (GOMES, 2001).

As ligas de alumínio, sobretudo aquelas endurecíveis por precipitação, são as mais usadas nas pesquisas sobre materiais obtidos via MP de alta resistência, com enfoque nas aplicações na indústria aeronáutica e automobilística, e também como matrizes de compósitos de matriz metálica. O emprego do alumínio na Metalurgia do Pó foi densamente impulsionado pela utilização de ligas que formam eutéticos de baixo ponto de fusão, viabilizando a sinterização com fase líquida e resultando em ligas com alto desempenho. Razões estas que estimulam o desenvolvimento de novas ligas e técnicas de fabricação e o aprimoramento de tecnologias com o natural aumento do desempenho destes materiais (DA COSTA, 2001).

O pó de metal puro de alumínio pode ser combinado com outros aditivos, como cobre, silício, magnésio e zinco, para formar composições de ligas específicas. As composições das atuais ligas de alumínio na MP são baseadas em ligas forjadas ou fundidas. A Tabela 1 apresenta a designação das ligas forjadas de alumínio, conforme (AA) *Aluminum Association*. Geralmente segue-se o método de designação de quatro dígitos para ligas forjadas de alumínio, em que o primeiro dígito especifica o principal elemento de liga que é adicionado ao alumínio e, portanto, define essa série de liga (ASM HANBOOK, 2018).

Tabela 1 – Sistema de designação das ligas forjadas de alumínio.

Designação da série	Indicação da composição
1XXX	Alumínio puro (99,00% pureza mínima)
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos

Fonte: ASM HANDBOOK, 2018

Exemplos de ligas comuns de alumínio PM são dadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composições de ligas de alumínio por MP.

Designação		Composição (% em massa)					
Internacional	Alternativa	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Outros
A-1050		Matriz					
A-2014	201AB	Matriz	3,8 – 5,0	0,2 – 1,2	0,5 – 1,2		1,5
A-2214	202AB	Matriz	3,8 – 4,2				1,5
A-2314	MD-22	Matriz	1,8 – 2,2	0,8 – 1,2			1,5
A-4032	Alumix 231	Matriz	2,4 – 2,8	0,5 – 0,8	14 – 16		1,5
A-6061	601AB; MD-69	Matriz	0 – 0,4	0,8 – 1,2	0,4 – 0,9		1,5
A-6002	602AB	Matriz		0,4 – 0,8	0,2 – 0,6		1,5
A-7075	Alumix 431	Matriz	1,5 – 2,0	2,2 – 2,8		5,6 – 6,4	1,5

Fonte: adaptado de ASM HANDBOOK, 1998.

Somente para a série de alumínio puro, os dois últimos dígitos definem a porcentagem mínima de alumínio acima de zero, ou seja, a pureza do material. Por exemplo, a designação de liga 1050 significa que o alumínio está em um nível mínimo de pureza de 99,50%. Para todos os outros sistemas de liga, os dois últimos dígitos denotam um número de liga arbitrariamente atribuído, não relacionado à composição. O segundo dígito, se diferente de 0, denota uma modificação de uma liga específica; por exemplo, embora as ligas 3003, 3004 e 3005 sejam diferentes umas das outras, a liga 5352 é uma derivação ou modificação da liga 5252 e da liga 5052 (ASM HANDBOOK, 2018).

A liga 202AB é projetada para forjamento a frio. As ligas 601AB e MD-69 são semelhantes entre si e estão relacionadas à liga 6061. Essas ligas oferecem boa resistência, ductilidade e resistência à corrosão e podem ser anodizadas. Para uma maior condutividade, a liga 602AB pode ser usada. A liga 601AB também está disponível para processos em que um lubrificante misturado não é desejável. A lubrificação da parede da matriz seria usada para compactação (ASM HANDBOOK, 1998).

#### *3.2.1.1. Ligas da série 5XXX*

As ligas forjadas de Al-Mg (série 5XXX) constituem um importante grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, mas sim por solução sólida e encruamento. Além desse ganho de resistência mecânica, o magnésio permite à essas ligas manterem um elevado nível de ductilidade, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade. Por este motivo, ligas Al-Mg apresentam a melhor relação de resistência mecânica, resistência à corrosão, ductilidade e propriedades mecânicas intermediárias entre as ligas da série 3XXX (Al-Mn) e as ligas endurecíveis por precipitação (ASM HANDBOOK, 1998).

Ligas da série 5XXX são utilizadas na prática em funções que exigem resistência mecânica e contra corrosão. Ligas Al-Mg com teores variando entre 3 e 5% são muito utilizadas na indústria naval na fabricação de diversos componentes. As ligas 5042, 5352, 5082 e 5182 são usadas na fabricação de tampas para latas de bebidas. A liga 5182, assim como a 5052, também é usada na indústria automobilística. As ligas 5356, 5554 e 5556 são usadas como metais de adição na soldagem (ASM HANDBOOK, 1998).

As ligas Al-Mg também recebem destaque por apresentarem boa resistência mecânica e acabamento superficial. Essa combinação favorável amplia significativamente o uso dessas ligas, que com baixos teores de ferro e tratamentos adequados, podem ser usadas na fabricação de acessórios para automóveis, componentes arquitetônicos e outras aplicações decorativas (ASM HANDBOOK, 1998).

#### *3.2.1.2 Ligas da série 7XXX*

As ligas forjadas de Al-Zn são representadas pela série 7XXX, dentre os subgrupos estão as ligas de Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu. Essas ligas podem ser endurecidas por precipitação, ou seja, quando são tratadas termicamente (usualmente) por solubilização e envelhecimento, causam aumento de dureza. O principal uso dessas ligas é na área da aviação visto que essa série atinge os níveis mais elevados de resistência mecânica entre as ligas de alumínio (ASM HANDBOOK, 1998).

A temperatura de fusão das ligas da série 7XXX são mais baixas em relação a outros tipos de ligas de alumínio. Uma temperatura típica de solubilização de uma liga Al-Zn-Mg seria em torno de 480°C, enquanto que para uma liga Al-Mg-Si seria aproximadamente 560°C (ASM HANDBOOK, 1998).

O zinco por si só é altamente solúvel no alumínio, porém não exerce influência tão significativa na microestrutura de uma liga binária de Al-Zn como a 7072. Entretanto, nas ligas ternárias Al-Zn-Mg, mais frequentemente usadas, são ligas bem mais resistentes que as binárias só com zinco. Contendo combinações de 4 a 8% de Zn e de 1 a 3% de Mg na matriz de alumínio, as ligas Al-Zn-Mg da série 7XXX apresentam ótimos resultados em suas propriedades mecânicas (REIS, 2017).

### **3.2.2 Sinterização das ligas de alumínio**

Segundo Kwon & Savitskii (2001), é difícil entender a força motriz para a sinterização de sistemas com multicomponentes, porém essa compreensão tem importância primordial para a ciência da sinterização. Uma compreensão adequada sobre a natureza da força motriz fornece o entendimento sobre os fenômenos que envolvem a sinterização e o controle eficiente sobre o processo.

A força motriz para a sinterização de pós com apenas um componente é a diminuição da energia da superfície livre desse sistema particulado devido à redução da área total da superfície dos poros interpartículas.

Uma mistura de dois ou mais componentes, além do excesso de energia livre devido a uma grande área superficial de partículas constituintes dispersas, possui um excesso de energia livre relacionado à capacidade dos componentes de formar uma liga durante a sinterização. Portanto, a sinterização de uma mistura de pós envolve dois processos: o encolhimento do volume da compactação e a formação da liga (SAVITSKII, 1999).

De acordo com Schaffer (2001), ao invés de produções de ligas sinterizadas que simplesmente imitem as ligas forjadas existentes, é preferível desenvolver ligas que sejam especificamente projetadas para serem sinterizadas.

A temperatura e o tempo de sinterização são determinados em função da composição da liga e no seu mecanismo de sinterização. As ligas de alumínio utilizam a sinterização por fase líquida a partir de elementos de liga que podem ser adicionados, como por exemplo o zinco e o estanho, que possuem temperatura de fusão menor que o alumínio e formam uma fase líquida, o que melhora a sinterização (LIU, 2006).

A temperatura de fusão do alumínio é de 660°C, portanto, a sinterização é tipicamente realizada a temperaturas entre 570°C e 620°C. A sinterização ocorre em uma série de estágios sobrepostos, mas equilibrados, através de vários mecanismos de densificação os quais dependem também de condições atmosféricas. Os fornos utilizados para sinterização do alumínio são tipicamente fornos de transporte de três zonas tipo mufla, semelhantes aos fornos de atmosfera protetora usados para sinterizar cobre e materiais à base de pó de ferro. Peças de alumínio podem ser sinterizadas em uma atmosfera inerte controlada ou a vácuo. As atmosferas inertes mais comuns para a sinterizar ligas de alumínio são as atmosferas de nitrogênio ou de argônio. No entanto, a produção com argônio é bastante cara, por isto esta é geralmente usada somente para o aquecimento da atmosfera de sinterização (ASM HANDBOOK, 1998). Já o nitrogênio, além de ser ter um custo menor, segundo Cardoso (2016) apresenta melhores resultados nas densificações das amostras sinterizadas por esta atmosfera quando comparadas a sinterização por atmosfera de argônio.

### **3.2.3 Elementos de liga**

Descrever as funções de cada elemento de liga individualmente é muito complicado, uma vez que estas se alteram, não só com a quantidade de elementos presentes na liga, mas também, pela interação com outros elementos. Em geral, pode-se dividir os elementos entre aqueles que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão e fluidez no preenchimento de moldes) e os que têm função auxiliar, como o controle de microestrutura, das impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser



controlados no seu teor máximo. Os elementos de liga aumentam consideravelmente a resistência do alumínio, assim como o tratamento térmico (SILVA, 2011).

### 3.2.3.1 Magnésio

O magnésio desempenha um papel crítico em romper quimicamente o filme de óxido do pó de alumínio, permitindo a sinterização de qualidade para as ligas de alumínio via MP (LUMLEY, 2011). A quantidade ideal de magnésio necessária para facilitar a sinterização do alumínio depende do volume do óxido e, portanto, depende do tamanho da partícula e da espessura do óxido nas partículas de pó de alumínio. Há um relato que sugere que a influência benéfica do magnésio na resposta de sinterização decai à medida que as misturas em pó são mantidas em armazenamento por longos períodos (LUMLEY, 2011).

O uso excessivo de magnésio é desnecessário, a faixa ótima é de 0,1-1,0% em massa para a sinterização de ligas de Al-Mg binárias, dependendo do tamanho de partícula do alumínio. A densidade reduz quando a concentração de magnésio é maior que a quantidade crítica. A redução da densidade em teores mais altos de magnésio tem sido atribuída à difusão de magnésio em alumínio (LUMLEY, 2011).

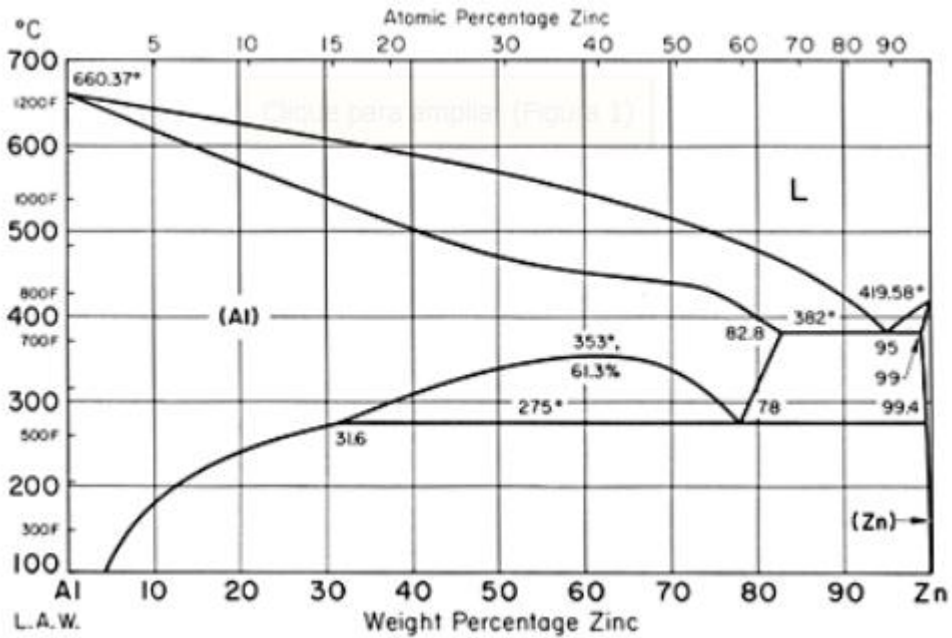
### 3.2.3.2 Zinco

O sistema Al-Zn, como pode ser visto na Figura 9, mostra algumas das características de um sistema de sinterização de fase líquida ideal em que o zinco tem um ponto de fusão mais baixo que o alumínio, não há fases intermediárias e há completa miscibilidade no líquido. No entanto, a taxa de solubilidade sólida não é ideal. A solubilidade máxima do zinco no alumínio é de 83,1%, enquanto a solubilidade máxima do alumínio no zinco é de 1,2 %. (SCHAFFER, 2001).

A fase líquida durante a sinterização de Al com Zn é, portanto, altamente transitória e as ligas Al-Zn são extremamente sensíveis ao processo. Taxas de aquecimento rápidas e tamanhos de partículas de zinco grosseiros aumentam a sinterização. Quando são usadas finas partículas de zinco, o zinco se dissolve no alumínio antes que grandes quantidades de fase líquida possam se formar (SCHAFFER, 2001).

Altas taxas de aquecimento também favorecem a formação de líquido, porque a oportunidade para a difusão ocorrer antes da fusão é minimizada e a reação é retardada para temperaturas mais altas, onde a solubilidade de equilíbrio é menor e, portanto, a saturação local pode ocorrer mais facilmente (SCHAFFER, 2001).

Figura 9 – Diagrama de fases Al-Zn.



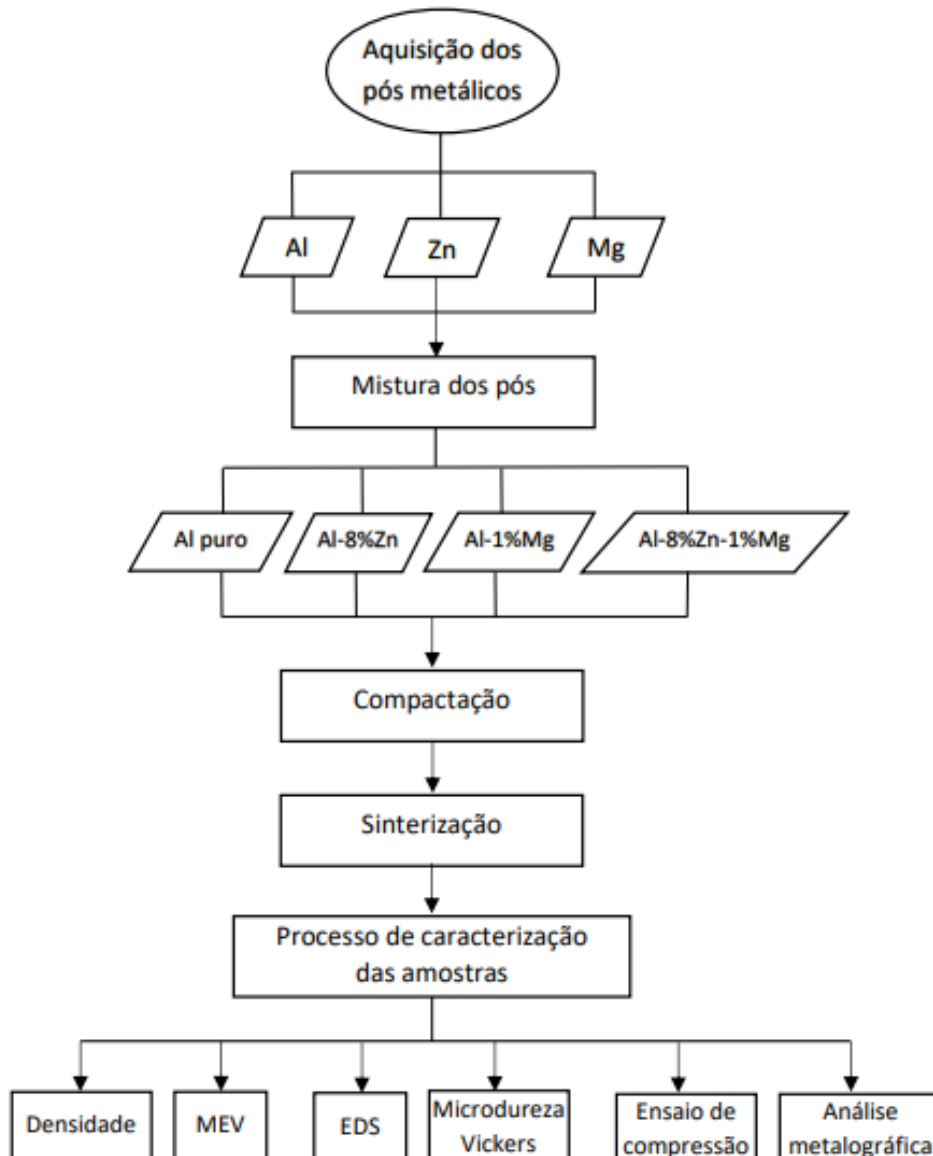
Fonte: INFOMET, 2019.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta etapa são apresentados os materiais e os métodos utilizados neste trabalho. Inicialmente são detalhados os materiais e a metodologia para a preparação dos corpos de prova onde é mostrado como foi feita a mistura dos pós e a realização da compactação para posterior sinterização convencional. E por fim, os métodos utilizados para a análise das amostras verdes e sinterizadas. A Figura 10 apresenta o diagrama que resume as etapas realizadas ao longo do trabalho.

Figura 10 - Diagrama das etapas realizadas neste trabalho.



Fonte: O autor.

## 4.2 MATERIAIS

Para o presente estudo utilizou-se pós metálicos de alumínio, zinco e magnésio. As Tabelas de 3 a 5 apresentam as composições químicas de cada pó individualmente.

Neste estudo foi utilizado o pó de alumínio como material base com teor de pureza de 99,70%, conforme dados do fabricante. A Tabela 3 apresenta de forma mais detalhada a composição química do material fornecida pelo fabricante.

Tabela 3 – Composição química do pó de alumínio conforme dados do fabricante % em massa

% Alumínio (Al)	% Ferro (Fe)	% Silício (Si)	% Outros Metais	Total (%)
99,7	0,21	0,05	0,04	100

A Tabela 4 apresenta a composição química do Zn com teor de pureza de 98% conforme dados do fabricante.

Tabela 4 – Composição química do pó de zinco conforme dados do fabricante % em massa

% Zinco (Zn)	% Ferro (Fe)	% Silício (Si)	% Outros Metais	Total (%)
98%	0	0	2%	100

A Tabela 5 apresenta a composição química do pó de Mg com teor de pureza de 99,5% de acordo com o fabricante.

Tabela 5 – Composição química do pó de magnésio conforme dados do fabricante % em massa

% Magnésio (Mg)	% Ferro (Fe)	% Silício (Si)	% Outros Metais	Total (%)
99,5	0	0	0,5	100

## 4.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para realizar a aferição dos corpos de prova utilizou-se uma balança analítica, da marca Master, modelo EXPLORER OHAUS, carga máxima de 210g e resolução de 0,1g, na qual mediu-se a massa dos pós para que fossem respeitadas as proporções dos elementos.

Na obtenção dos corpos de prova, os pós foram pesados juntamente com o lubrificante sólido Acrawax-C, na proporção de 0,8% em massa. O uso do

lubrificante facilita o processo de compactação evitando a adesão das partículas de pó nas paredes da matriz e reduzindo os esforços de compactação e o desgaste do ferramental.

Foram feitas quatro diferentes misturas conforme consta na Tabela 6. Uma mistura simples contendo somente alumínio e lubrificante, duas binárias sendo uma de alumínio e zinco (Al-8%Zn) e outra de alumínio e magnésio (Al-1%Mg) e uma mistura ternária contendo os três elementos (Al-8%Zn-1%Mg).

Tabela 6 – Composição química das misturas produzidas.

Amostras	%Zn em peso	%Mg em peso	Massa (Al)(g)	Massa (Zn)(g)	Massa (Mg)(g)	Total (g)	Lubrificante (g)
Al			3			3	0,024
Al-8%Zn	8		2,76	0,24		3	0,024
Al-1%Mg		1	2,97		0,03	3	0,024
Al-8%Zn-1%Mg	8	1	2,73	0,24	0,03	3	0,024

Fonte: O autor.

Foram produzidas doze (12) peças para cada tipo de mistura, totalizando quarenta e oito (48) amostras.

#### 4.3.1 Mistura dos pós

Para obter uma mistura adequada dos pós e garantir a mais perfeita homogeneização, foi utilizado um misturador do tipo duplo cone apresentado na Figura 11. As misturas foram preparadas individualmente

Figura 11 - Misturador duplo cone.



Fonte: O autor.

### 4.3.2 Curva de compressibilidade

Antes de realizar a compactação das amostras foi necessária a confecção de uma curva de compressibilidade do pó de alumínio, a fim de identificar a pressão de compactação das amostras e a proporção ideal de lubrificante.

Foram realizadas três curvas de compressibilidade com diferentes proporções em massa de lubrificante Acrawax-C, 0,5, 0,8 e 1,0%.

Para a construção de cada curva, realizou-se o cálculo da densidade aparente do pó. Este cálculo foi feito com o preenchimento completo da cavidade da matriz com o pó e o lubrificante. Então, a massa de pó foi retirada da cavidade e pesada. Com a massa de pó e as medidas da matriz conhecidas calculou-se o volume do material e posteriormente a densidade aparente. A densidade aparente é o primeiro ponto da curva de compressibilidade.

A construção das curvas seguiu-se com a confecção das três misturas de pó de alumínio e lubrificante (Al+0,5%Acrawax-C, Al+0,8%Acrawax-C e Al+1%Acrawax-C), cada mistura contendo uma massa total de 30g que serviu para a produção de 10 corpos de prova (3g por corpo de prova) para cada mistura. Estipulou-se pressões que variaram de 100 a 1000 MPa, com intervalos de 100 MPa por compactação. Através da relação entre pressão vezes área, pode-se calcular a força necessária para as compressões, pois o equipamento utiliza a unidade de força em vez de pressão. Após cada variação da pressão de compactação, mediu-se altura, diâmetro e massa das amostras. A partir destes valores calculou-se o volume e as densidades das amostras verdes. Possuindo esses dados, construíram-se as curvas de compressibilidade que são caracterizadas pelos gráficos densidade versus pressão.

## 4.4 PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DAS AMOSTRAS

O conjunto de compactação é composto pelo corpo da matriz e os punções superior e inferior, fabricados em aço “*American Iron and Steel Institute*” (AISI) D6 temperado. A matriz possui diâmetro de 13mm e altura de 52,50mm em sua cavidade cilíndrica. A Figura 12 apresenta o conjunto de compactação que foi utilizado para a compactação dos corpos de prova.

Figura 12 – Matriz de compactação mostrada de perfil, junto com os punções inferior (menor) e superior (maior).



Fonte: O autor.

Antes da disposição dos pós no interior da cavidade da matriz, fez-se uma limpeza com auxílio de algodão embebido em álcool para a retirada de sujeira. Essa limpeza foi feita após a confecção de cada corpo de prova, pois o pó de alumínio é um material que se adere facilmente as paredes da matriz, sendo assim deve ser removido para que a compactação não seja prejudicada. Após a limpeza, espalhou-se 0,005 g do pó de lubrificante Acrawax-C pelo interior da matriz e nos punções a fim de ajudar na compactação. Este procedimento foi feito também após cada compactação.

Feito isso, primeiramente se colocou o punção inferior para fechar um dos lados da matriz. Na etapa de preenchimento da cavidade da matriz, deve-se ter cuidado para que não haja perda de material, pois este já está com a massa de trabalho determinada. Com cuidado, foi feito o transporte do pó para o interior da cavidade da matriz. Posteriormente se faz a colocação do punção superior.

Feito o preenchimento da matriz, esta foi levada para a etapa de prensagem. Foi utilizada uma prensa hidráulica manual de 30 toneladas de capacidade da marca BOVENAU, localizada no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Com a pressão de trabalho de 700 MPa, os corpos de prova de cada mistura foram compactados individualmente. A compactação ocorre por deslocamento do punção superior a temperatura ambiente. Nos primeiros movimentos do punção, a compactação causa apenas o adensamento do pó, sem deformação das partículas e sem produzir adesão entre as mesmas. Com

o aumento da pressão, ocorre deformação plástica das partículas, formando um corpo de prova rígido. Os procedimentos adotados durante a compactação foram os mesmos para todas as amostras.

Para a remoção dos corpos de prova da cavidade da matriz, utilizou-se o movimento contrário do punção superior com o auxílio da prensa hidráulica e um extrator.

#### 4.5 SINTERIZAÇÃO CONVENCIONAL

O processo de sinterização convencional foi realizado em um forno do tipo mufla da marca Sanchis, modelo Tubular 1600, do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. As amostras foram dispostas em uma base, sendo aquecidas pela irradiação térmica das resistências pertencentes ao forno.

No período do processamento as amostras ficaram expostas em atmosfera controlada de gás nitrogênio com teor de 99,99% de pureza.

O processo de aquecimento das amostras teve início em temperatura ambiente (20°C) com um acréscimo gradual de 10°C/min. Durante esta etapa houve a remoção do lubrificante, o qual possui temperatura de queima igual a 144°C. O processo de aquecimento gradual aconteceu até um patamar de temperatura de 550°C, onde permaneceu por um período de 60 minutos no qual ocorreu a sinterização propriamente dita. Depois de uma hora expostas à temperatura de 550°C, o forno foi desligado e as amostras foram mantidas no seu interior ainda com atmosfera de nitrogênio, até o completo resfriamento. A Tabela 7 apresenta este ciclo.

Tabela 7 – Ciclo de sinterização.

Processo	Atmosfera	Etapa	Tempo (min)	Temp. (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)
Sinterização Convencional	Nitrogênio	Aquecimento/ remoção do lubrificante	53	20-550	10
		Sinterização	60	550	
		Resfriamento	110	25	-5

Fonte: O autor.



Foram utilizadas as mesmas etapas de sinterização em todas as amostras.

## **4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS**

Para fins de caracterização das amostras sinterizadas convencionalmente, foram realizadas análises de densidade, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), microdureza Vickers, ensaio de compressão e análise metalográfica.

### **4.6.1 Densidade das amostras**

Para encontrar a densidade a verde das amostras, também chamada de massa específica aparente, foi adotado o princípio da massa pelo volume calculado por meio das medições das amostras após a compactação. Já para determinar a densidade das amostras sinterizadas foi empregado o Método de Arquimedes, que se baseia no empuxo exercido sobre a amostra durante sua imersão em uma vasilha com água acoplado a uma balança analítica, cuja intensidade é igual à massa do volume do fluido deslocado. Para realizar o levantamento das medições necessárias para a determinação das densidades foram utilizados equipamentos tais como, balança analítica e paquímetro digital da marca INSIZE.

Além disso, fez-se a comparação das densidades das amostras com suas respectivas densidades teóricas levando em conta a pureza de cada material e sua proporção utilizada na mistura.

Para este ensaio foram utilizadas doze (12) amostras de cada mistura e para discussão dos resultados fez-se o cálculo da média das densidades.

### **4.6.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Para a análise de MEV pegou-se três (3) amostras sinterizadas de cada mistura, nas quais foi feito um corte transversal para observar melhor a porosidade ao longo de cada amostra. As amostras foram preparadas metalograficamente antes do ensaio. Cada amostra foi lixada na sequência granulométrica de #100, #200, #400, #600 e #1200 e logo após, foram polidas com pasta de diamante de granulometria de 0,3 $\mu$ m. Não foi realizado ataque químico nas amostras. O microscópio eletrônico de

varredura utilizado foi o da marca TESCAN modelo VEGA3, localizado no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia do UFRGS.

#### **4.6.3 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)**

A microanálise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplada ao MEV foi utilizada para a realização do mapeamento da distribuição dos constituintes metálicos de cada amostra. A partir do EDS pode-se determinar quais elementos químicos estão presentes em determinado local e assim, determinar qual material estava sendo observado. Enquanto o MEV proporcionou nítidas imagens, o EDS permite a imediata identificação através do mapeamento da distribuição dos elementos químicos, gerando mapas composicionais de elementos desejados.

#### **4.6.4 Microdureza Vickers**

Com o intuito de avaliar a resistência mecânica à indentação, foram realizados ensaios de microdureza Vickers na face das quatro diferentes misturas. Utilizou-se um microdurômetro automático digital, da marca INSIZE, modelo ISH – TDV1000, para cargas de trabalho de 100 gf, localizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS.

Para este ensaio foram utilizadas 3 amostras sinterizadas de cada mistura, onde foram feitas 5 indentações em regiões aleatórias pela superfície de cada amostra, a partir dos valores obtidos através do equipamento calculou-se a média para uma melhor discussão dos resultados.

#### **4.6.5 Ensaio de compressão**

As amostras sinterizadas foram submetidas ao ensaio de compressão, para avaliar a curva de escoamento ou determinar o limite entre a região elástica e a região plástica. Com objetivo de avaliar a carga máxima que o material pode suportar, antes que comece a se deformar ou chegar à ruptura. O equipamento utilizado foi a máquina universal de Ensaios Emic, com capacidade de até 600 kN, localizada no Laboratório

de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS.

Para este ensaio utilizou-se uma amostra de cada mistura. Todos os corpos de prova que foram submetidos à compressão possuíam altura inicial de 8mm, chegando a 3mm de altura final. A velocidade de deformação utilizada foi de 5mm/min.

#### **4.6.6 Análise Metalográfica**

Através da microscopia óptica realizou-se a análise metalográfica na superfície das misturas sinterizadas. A preparação dos corpos de prova foi a mesma utilizada no ensaio de MEV, sendo no final atacadas quimicamente visando realçar a microestrutura das misturas de forma a torná-las observáveis ao microscópio óptico.

Foram utilizadas 3 amostras de cada mistura, as quais foram submetidas a ataque químico com o reagente Keller durante 10 segundos, na sequência foram limpas com álcool 99% e secas em soprador térmico. Foi utilizado o microscópio eletrônico da marca OLIMPUS GX51, localizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS.

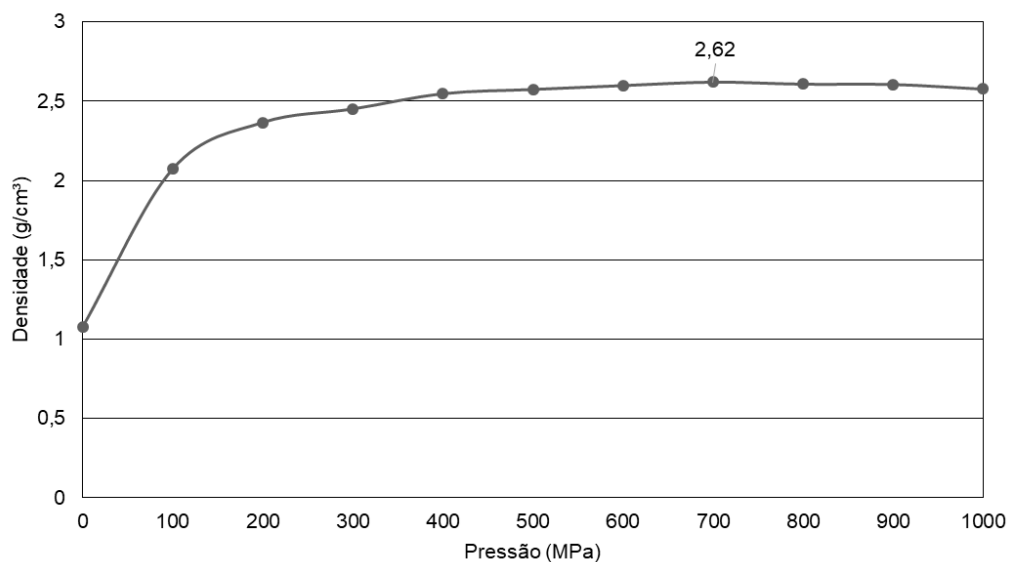
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CURVA DE COMPRESSIBILIDADE

Para a proporção de 0,5% em massa de lubrificante, a pressão ideal de trabalho foi de 1000 MPa para uma densidade de 2,69 g/cm<sup>3</sup>, sendo esta pressão muito elevada para uma densidade de valor não tão significativo em relação a outras proporções, já na proporção de 0,8% em massa de lubrificante a pressão ideal de trabalho mostrou-se menor, 700 MPa, para uma densidade muito parecida, 2,62 g/cm<sup>3</sup>. Para proporção de 1,0% em massa de lubrificante, a maior densidade apresentada foi de 2,58 g/cm<sup>3</sup>, um valor baixo, para uma pressão de 600 MPa. Portanto, o gráfico que indicou melhor a pressão de compactação foi o da mistura de alumínio com 0,8% em massa do lubrificante Acrawax-C, o qual é mostrado na Figura 13. Sabendo que a densidade teórica do Al puro é de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, com a pressão de 700 MPa conseguiu-se atingir um valor muito próximo (2,62 g/cm<sup>3</sup>) ao que corresponde a densificação plena.

A proporção de 0,8% em massa do lubrificante Acrawax-C foi arbitrada para as misturas binárias e ternária neste trabalho.

Figura 13 - Curva de compressibilidade para Al+0,8%Acrawax-C.  
Curva de compressibilidade Al-Acrawax-c

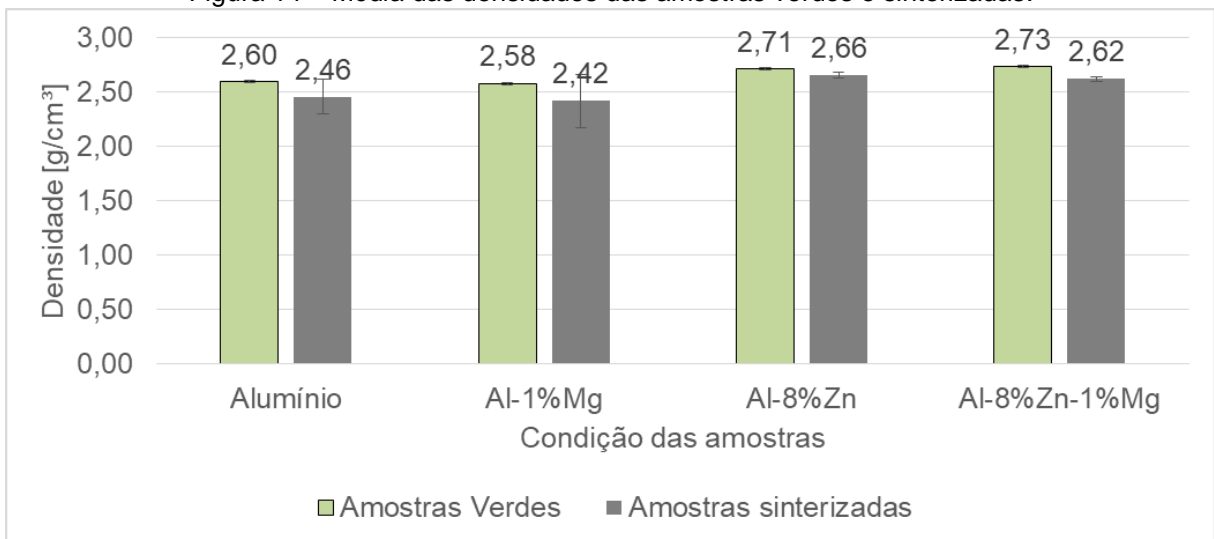


Fonte: O autor.

## 5.2 DENSIDADE

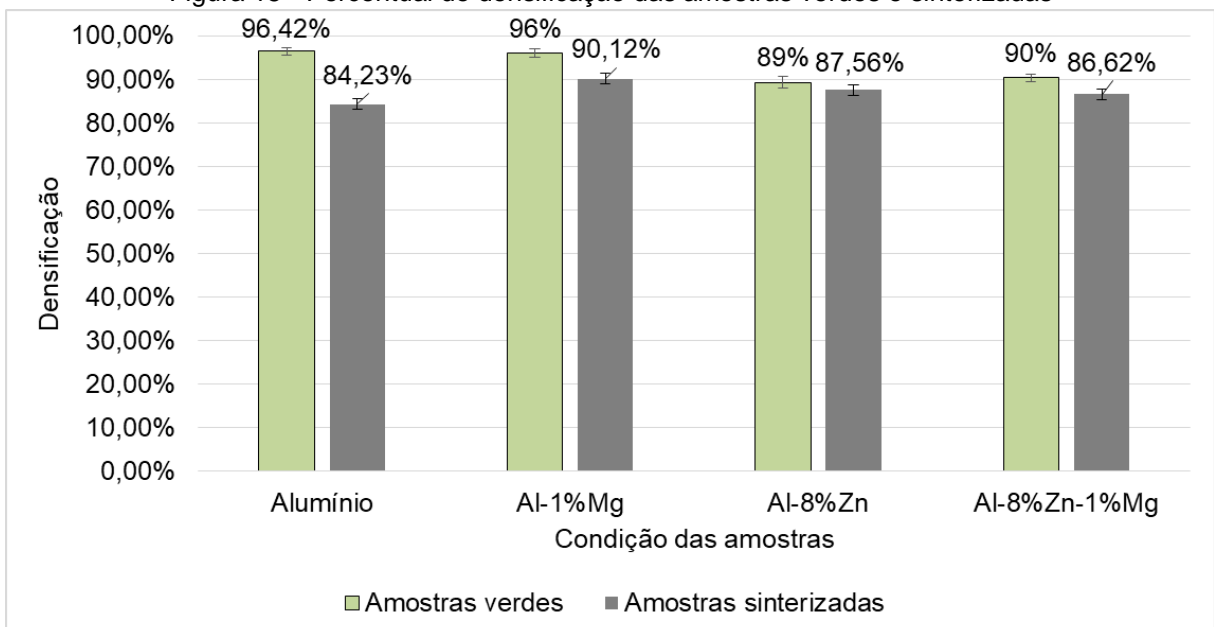
A Figura 14 mostra as médias de densidade das amostras verdes e sinterizadas para cada uma das misturas. A Figura 15 mostra a comparação das densificações das amostras com suas respectivas densidades teóricas que foram calculadas levando em conta a pureza de cada pó, a densidade real de cada material e a proporção utilizada na mistura.

Figura 14 – Média das densidades das amostras verdes e sinterizadas.



Fonte: O autor.

Figura 15 - Percentual de densificação das amostras verdes e sinterizadas



Fonte: O autor.

De acordo com a Figura 14, as amostras de alumínio puro sinterizadas apresentaram diminuição de 5,22% na densidade quando comparadas às amostras verdes. Sabendo que a densidade do alumínio puro é  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , estas mesmas amostras obtiveram diminuição de densificação de 3,58% nas amostras verdes e 15,77% nas amostras sinterizadas, como pode ser visto na Figura 15. Esta diminuição da densificação do alumínio já é um fenômeno conhecido, isto ocorre devido a porosidade presente no material após sua sinterização e ainda pela camada passivadora de óxidos presentes nas partículas do pó de alumínio, que podem ser fatores prejudiciais na sinterização e conseqüentemente na diminuição da densidade (LUMLEY, 2011).

As amostras de Al-1%Mg sinterizadas apresentaram diminuição de 6,22% na densidade em relação às amostras verdes dessa mistura (Figura 14). Já ao comparar a densidade desta mistura com sua respectiva densidade teórica ( $2,68 \text{ g/cm}^3$ ), verificou-se que a mistura Al-1%Mg obteve o melhor resultado de densificação entre as misturas, apresentando assim, uma diminuição de densificação de 4% nas amostras verdes e 10% nas amostras sinterizadas. Esse melhor resultado na densificação pode ter sido ocasionado pela presença do magnésio, que segundo Lumley et al (2009), o magnésio tem a capacidade de romper quimicamente a camada passiva de óxidos sobre a superfície do pó de alumínio.

As amostras da mistura de Al-8%Zn sinterizadas apresentaram diminuição de 1,93% na densidade em relação às amostras verdes (Figura 14) e em relação a densidade teórica da mesma ( $3,04 \text{ g/cm}^3$ ), obtiveram uma diminuição de densificação de 11% nas amostras verdes e 12,54% nas amostras sinterizadas (Figura 15). Tal diminuição de densificação pode ser explicada segundo Savitskii et al (1982), o qual diz que a sinterização de materiais compactados a partir da mistura de pós de alumínio e zinco, gera uma possível formação de líquido, no qual é acompanhado pelo seu crescimento de volume e um aumento correspondente na sua porosidade, ocasionando então, a diminuição da densificação da mistura. A formação de inúmeros poros nesta mistura é evidenciada nas imagens de microscopia eletrônica de varredura.

As amostras da mistura de Al-8%Zn-1%Mg sinterizadas apresentaram diminuição de 4,16% da densidade em relação às amostras verdes desta mistura (Figura 14). Um valor de diminuição intermediário quando comparadas com as outras

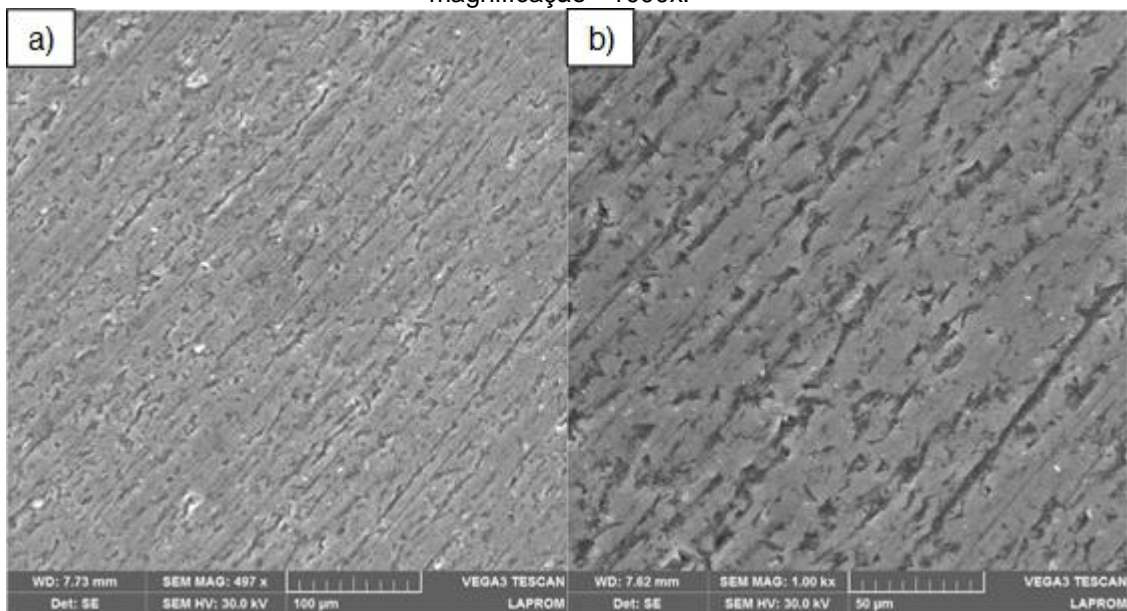
misturas em estudo. Ainda, a mistura Al-8%Zn-1%Mg apresentou uma diminuição de densificação de 10% nas amostras verdes e de 13,48% nas amostras sinterizadas, sabendo que a densidade teórica do material é 3,03 g/cm<sup>3</sup>, conforme Figura 15.

Observa-se que todas as densidades diminuem quando comparadas com as suas densidades teóricas assim como quando comparadas às densidades verdes.

### 5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As Figuras 16, 17, 18 e 19 mostram as imagens obtidas a partir de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com detector de elétrons secundários nas amostras sinterizadas em pontos aleatórios das superfícies transversais.

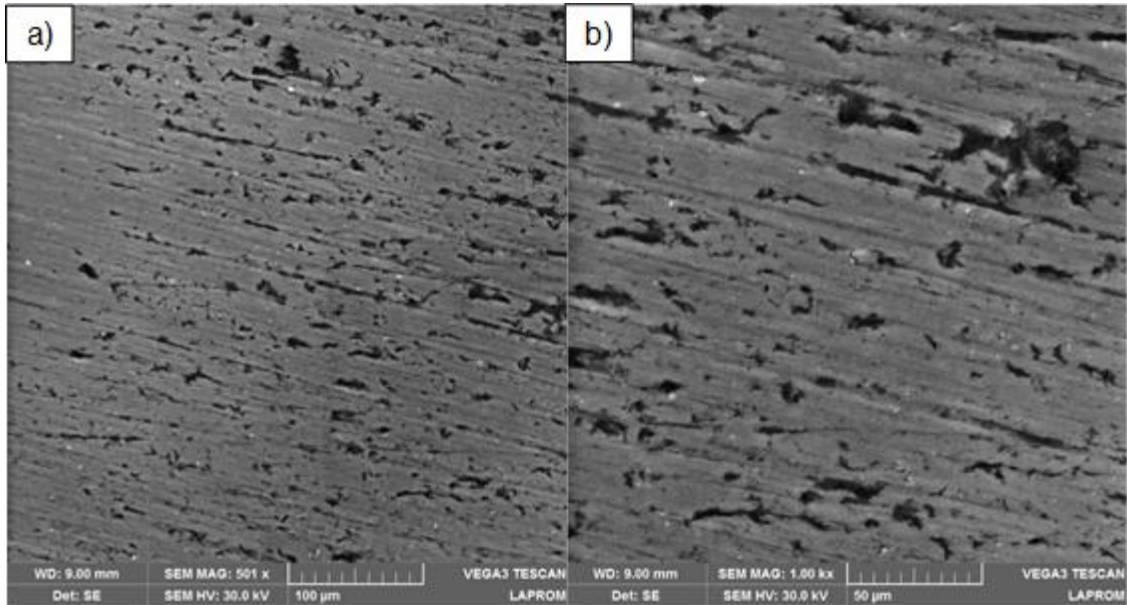
Figura 16 – Al – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x.



Fonte: O autor.

A Figura 16 apresenta a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da mistura de alumínio contendo somente Acrawax-C. É possível observar a presença de inúmeros poros com diversos tamanhos e formas irregulares dispersos em toda estrutura da amostra.

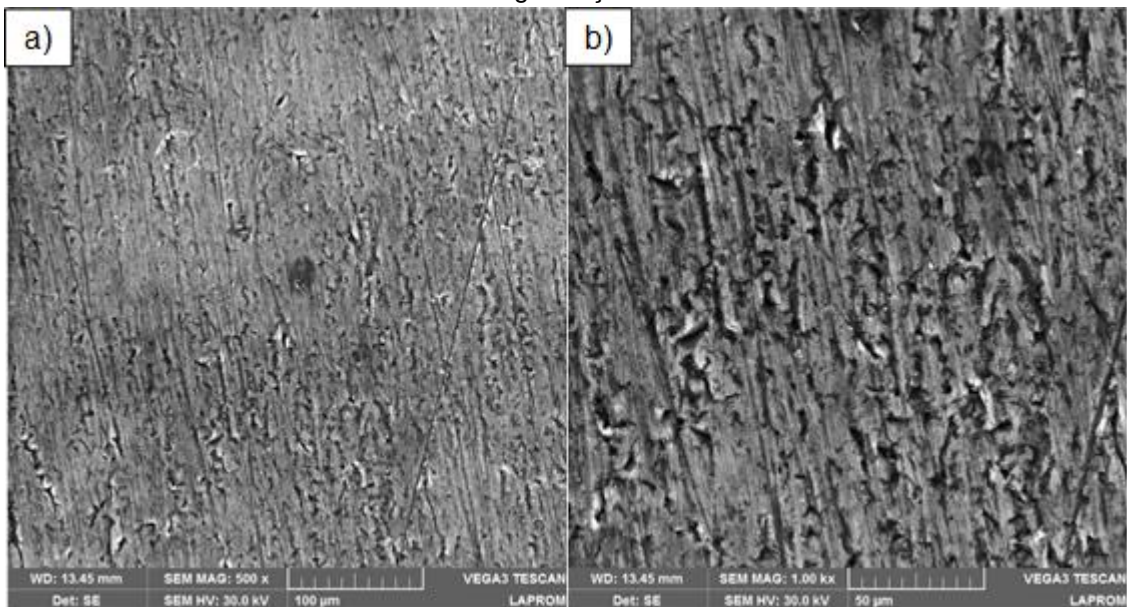
Figura 17 – Mistura Al-1%Mg – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x.



Fonte: O autor.

Em comparação com a imagem anterior, na Figura 17 é possível observar a presença de poros com características mais refinadas, menores profundidades e menor distribuição entre a superfície. Tal resultado pode ser explicado em decorrência da presença do magnésio, pois na análise de densidade, esta mistura apresentou a maior densificação quando comparada às outras.

Figura 18 – Mistura Al-8%Zn – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x.

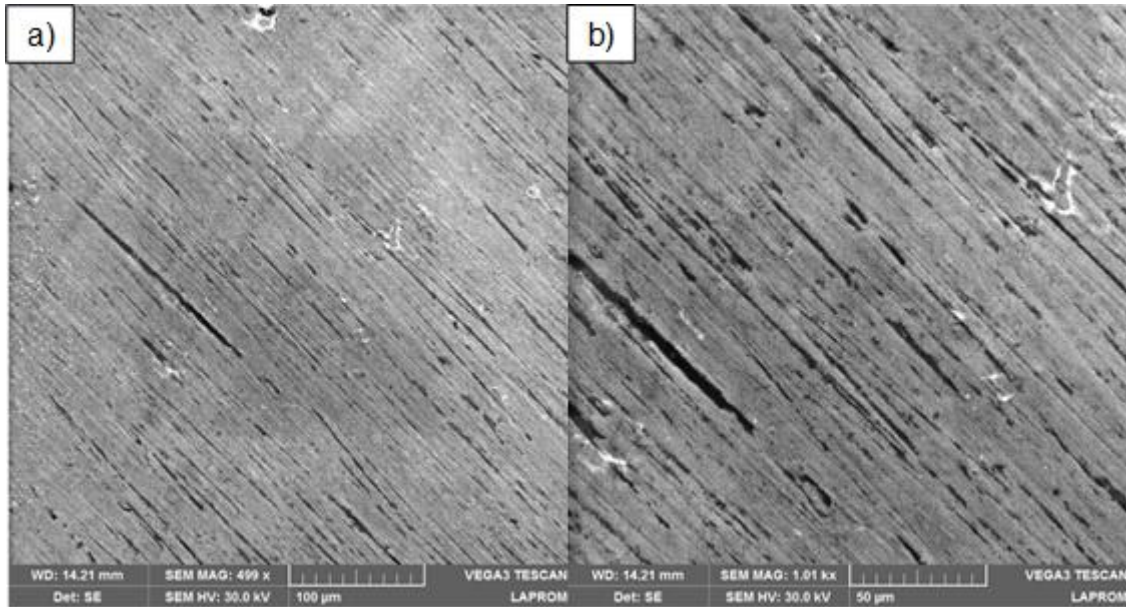


Fonte: O autor.



A Figura 18 evidencia que a mistura Al-8%Zn apresenta uma quantidade maior de poros em relação às misturas Al-1%Mg e Al-8%Zn-1%Mg. Tal resultado pode explicar a menor densificação do material.

Figura 19 – Mistura-Al-8%Zn-1%Mg – Imagem obtida por MEV com (a) menor magnificação - 500x (b) e maior magnificação - 1000x.



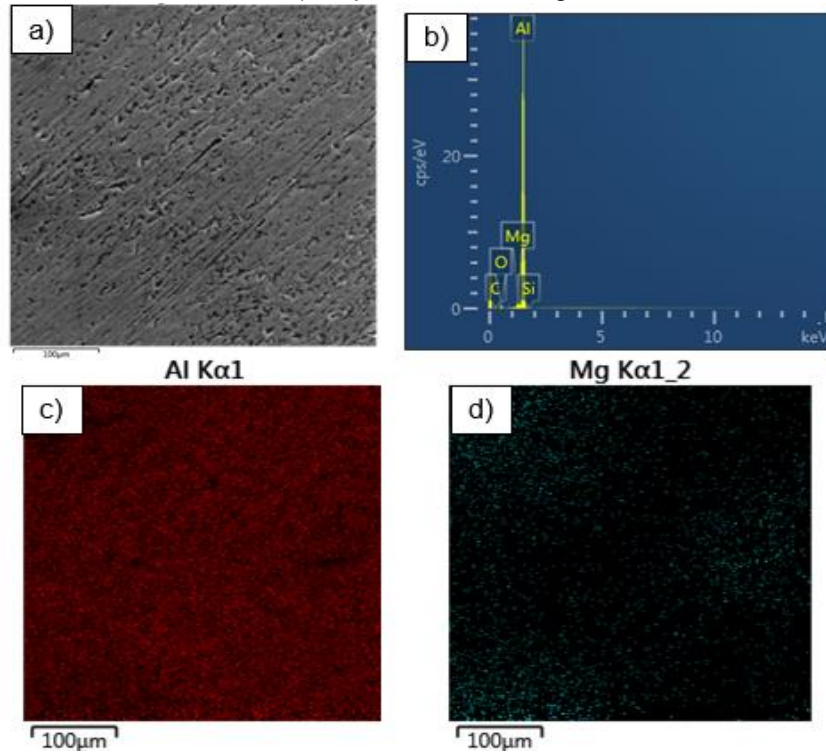
Fonte: O autor.

A Figura 19 apresenta a menor porosidade entre as imagens, evidenciando poros mais regulares. Através da análise via EDS é possível confirmar uma distribuição mais homogênea dos aditivos zinco e magnésio nas amostras desta mistura, o que pode explicar sua menor porosidade.

#### 5.4 ANÁLISE QUÍMICA DAS AMOSTRAS VIA EDS

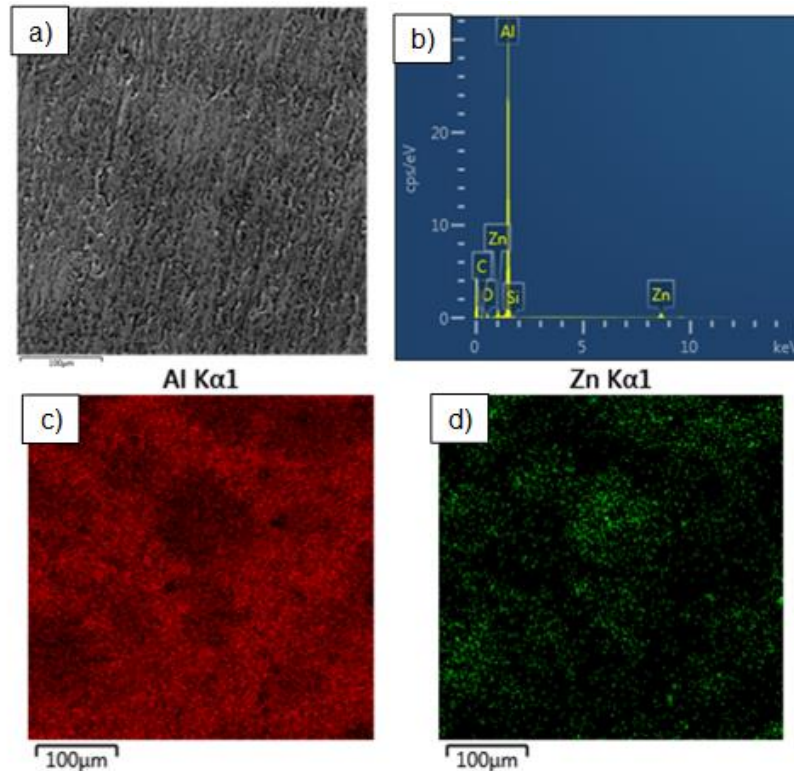
Nas Figuras 20, 21 e 22 observou-se com clareza os componentes das misturas Al-1%Mg, Al-8%Zn e Al-8%Zn-1%Mg respectivamente, sendo os outros componentes restantes considerados impurezas. Todas as amostras apresentaram certa quantidade de carbono, oxigênio e silício, podendo ser por conta do lubrificante utilizado nas peças e das impurezas encontradas na atmosfera do forno, porém no presente estudo estas análises não serão adotadas. As Figuras 20 (c) e (d), 21 (c) e (d) e 22 (c), (d) e (e) apresentam os mapeamentos das distribuições dos elementos presentes em cada mistura.

Figura 20 – a) Fotomicrografia obtida através de MEV mostrando a região da amostra Al-1%Mg onde foram realizadas as análises; b) Espectros dos elementos via EDS da mistura; c) Mapeamento do alumínio via EDS; d) Mapeamento do magnésio via EDS.



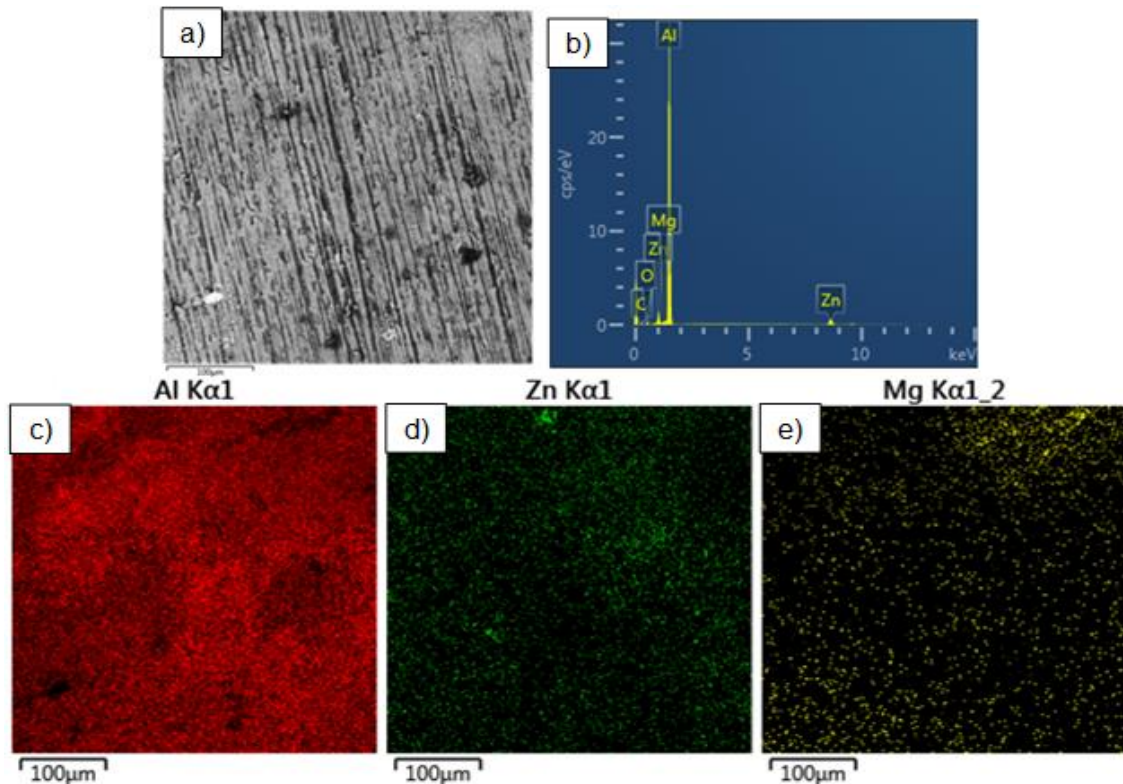
Fonte: O autor.

Figura 21 – a) Fotomicrografia obtida através de MEV mostrando a região da amostra Al-8%Zn onde foram realizadas as análises; b) Espectros dos elementos via EDS da mistura; c) Mapeamento do alumínio via EDS; d) Mapeamento do zinco via EDS.



Fonte: O autor.

Figura 22 - a) Fotomicrografia obtida através de MEV mostrando a região da amostra Al-8%Zn-1%Mg onde foram realizadas as análises; b) Espectros dos elementos via EDS da mistura; c) Mapeamento do alumínio via EDS; d) Mapeamento do zinco via EDS. e) Mapeamento do magnésio via EDS.



Fonte: O autor

O elemento base alumínio encontra-se bem distribuído em todas as amostras, enquanto o aditivo zinco apresenta-se mais concentrado em determinadas regiões da Figura 21 (d). A distribuição não homogênea deste elemento de liga pode explicar a diminuição de densificação observado e a maior porosidade da mistura Al-8%Zn, como detalhado nos itens 5.2 e 5.3 respectivamente. Já a distribuição pouco mais homogênea do aditivo zinco na Figura 22 (d), e do magnésio na Figura 22 (e), possivelmente explica a menor porosidade para a mistura Al-8%Zn-1%Mg.

## 5.5 MICRODUREZA VICKERS

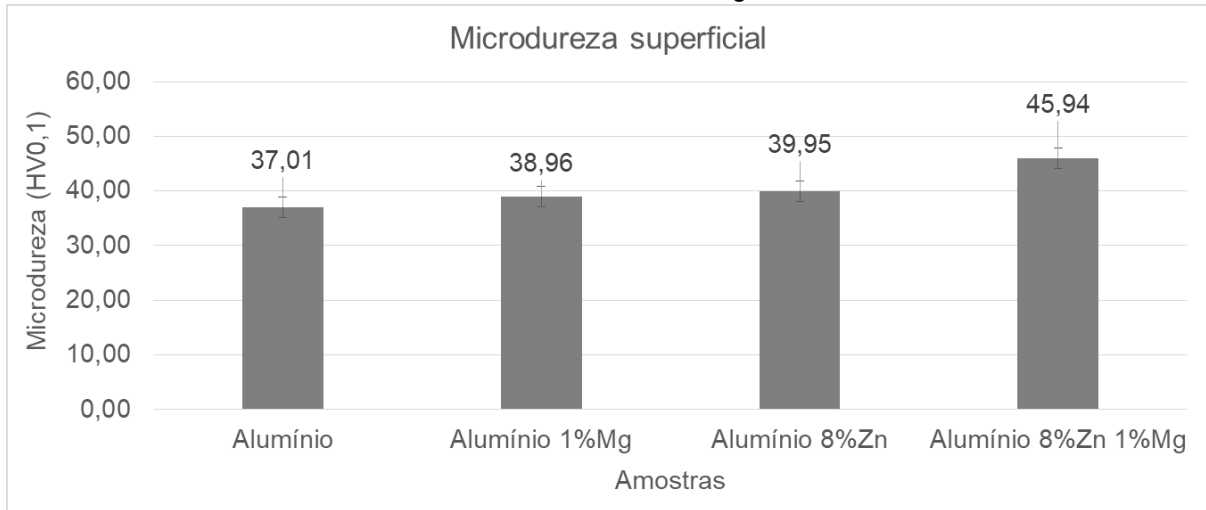
A Figura 23 apresenta a média das microdurezas Vickers superficiais dos materiais estudados após a sinterização.

A mistura (Al-8%Zn-1%Mg) contendo os dois componentes aditivos propiciou os melhores resultados de microdureza, chegando em aproximadamente 46 HV0,1.

Fica evidenciado a partir da Figura 23 que a combinação dos elementos zinco e magnésio propiciam um ganho de microdureza superficial maior do que quando

estes mesmos elementos são adicionados individualmente. Este ganho de microdureza também pode ser em decorrência de uma melhor distribuição dos aditivos na mistura Al-8%Zn-1%Mg, como mostrado na análise química via EDS.

Figura 23 – Gráfico das médias das microdurezas para as amostras de alumínio puro, Al-1%Mg, Al-8%Zn e Al-8%Zn-1%Mg.



Fonte: O autor.

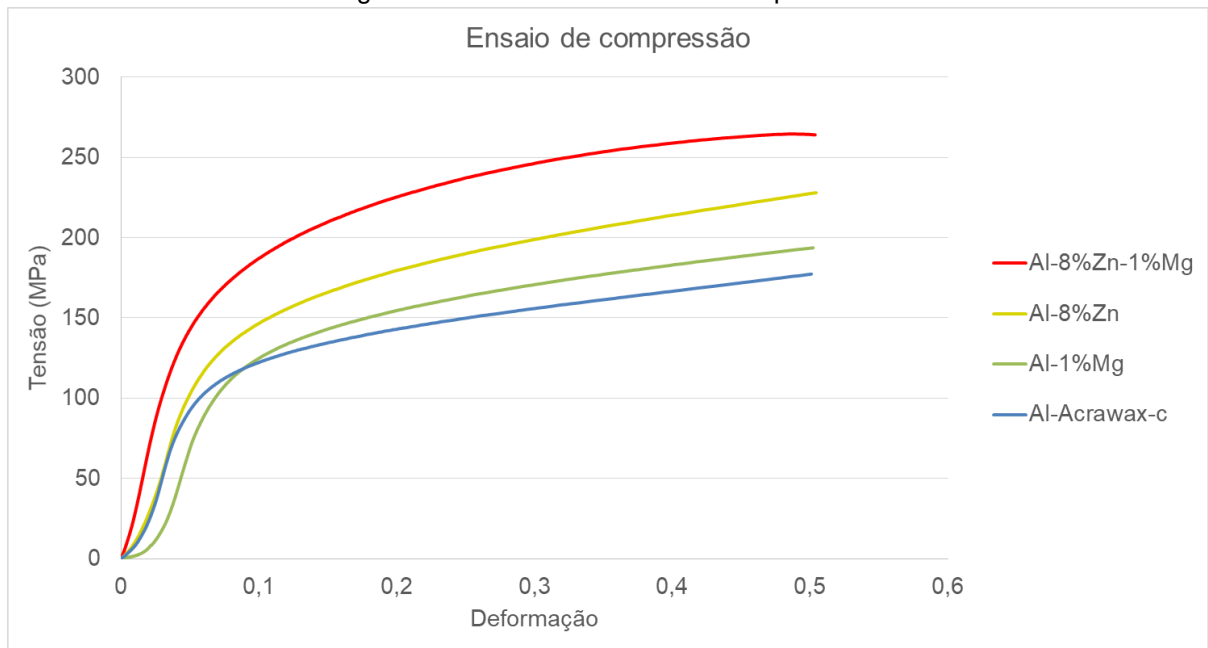
## 5.6 ANÁLISE DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

A Figura 24 apresenta os resultados do ensaio de compressão das misturas estudadas após a sinterização.

Nota-se a partir dos resultados que a mistura (Al-8%Zn-1%Mg) contendo os dois componentes aditivos atingiu a maior tensão de escoamento chegando aproximadamente a 119 MPa, valor aproximadamente duas vezes maior do que as misturas Al-8%Zn e Al-1%Mg, que foram de 62 e 59 MPa respectivamente, este resultado se dá possivelmente pelo endurecimento por solução sólida. A amostra de alumínio puro obteve o pior resultado apresentando 35 MPa de tensão de escoamento.

Os resultados do ensaio de compressão corroboram com a análise de microdureza Vickers, evidenciando também que a combinação dos dois aditivos gera uma melhora significativa nas propriedades mecânicas em comparação com o alumínio puro e as misturas binárias (Al-8%Zn e Al-1%Mg).

Figura 24 - Gráfico do ensaio de compressão.



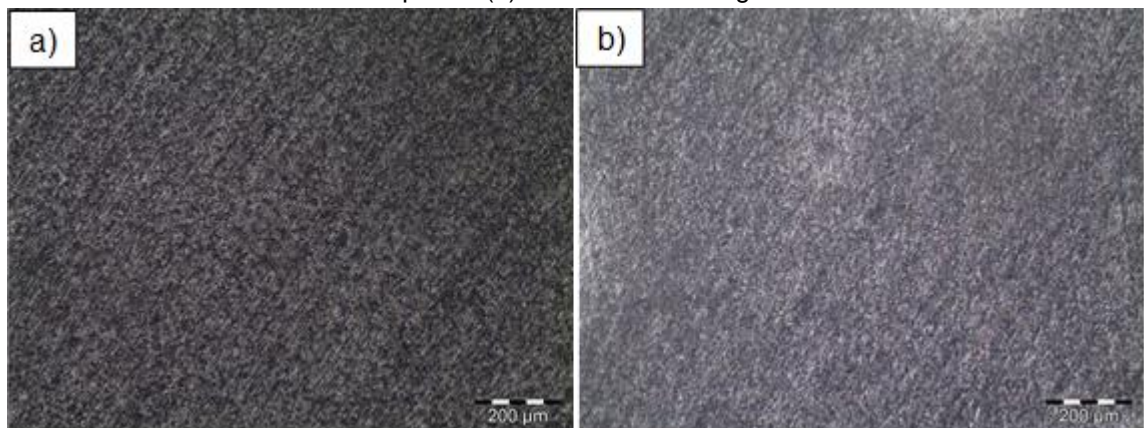
Fonte: O autor.

## 5.7 ANÁLISE METALOGRÁFICA

As Figuras 25 e 26 apresentam as análises metalográficas realizadas nas amostras.

A partir da Figura 25 é possível observar que, após o ataque realizado, as microestruturas das amostras de alumínio puro (a) e Al-1%Mg (b) não apresentaram grandes diferenças entre si, possivelmente pela baixa quantidade de magnésio utilizada.

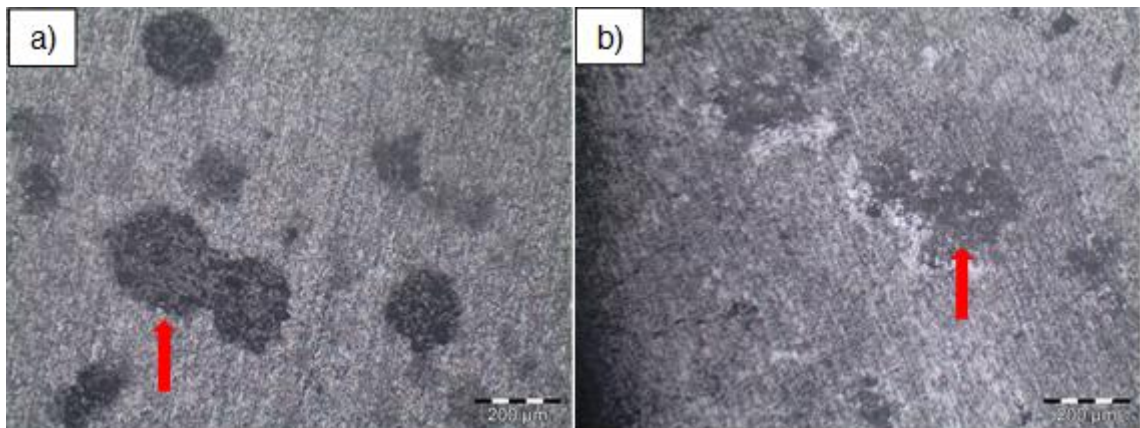
Figura 25 - Imagem obtida através de microscopia óptica, com aumento de 100x, mostrando o (a) alumínio puro e (b) a mistura Al-1%Mg.



Fonte: O autor.

Nas amostras contendo o aditivo zinco é possível observar que nas misturas Al-8%Zn e Al-8%Zn-1%Mg este elemento aditivo distribuiu-se sobre a matriz de alumínio. Tal análise possivelmente auxilia nos melhores resultados apresentados na mistura ternária. A Figura 26 mostra o elemento zinco distribuído nas misturas Al-8%Zn (a) e Al-8%Zn-1%Mg (b) indicado pelas setas de cor vermelha.

Figura 26 – Imagem obtida através de microscopia óptica, com aumento de 100x, mostrando o elemento Zn distribuído indicado pela seta vermelha nas misturas (a) Al-8%Zn e (b) Al-8%Zn-1%Mg.



Fonte: O autor.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados pode-se concluir que a adição dos elementos de liga zinco e magnésio na matriz de alumínio puro foi vantajosa para todas as análises realizadas.

Observou-se que a densidade de todas as amostras diminuem quando comparadas com às suas densidades teóricas e quando comparadas às densidades verdes. A mistura Al-1%Mg apresentou a menor diminuição de densificação (4% para amostras verdes e 10% para amostras sinterizadas) em comparação com as outras amostras. De acordo com a análise de MEV, a mistura Al-8%Zn-1%Mg foi a que apresentou a menor porosidade entre as misturas e, ao correlacionar com a análise de EDS, esta foi a que teve os elementos aditivos mais bem distribuídos pela superfície.

A partir da análise de microdureza Vickers ficou evidenciado que a combinação dos elementos zinco e magnésio propiciam um ganho de microdureza superficial maior (46 HV<sub>0,1</sub>) do que quando estes mesmos elementos são adicionados individualmente.

Os resultados do ensaio de compressão corroboraram com a análise de microdureza. Evidenciando também, que a combinação dos dois elementos de liga gera uma melhora significativa nas propriedades mecânicas das amostras, chegando à tensão de escoamento de 119 MPa para a mistura Al-8%Zn-1%Mg.

A partir da análise metalográfica foi possível observar que as microestruturas das amostras de alumínio puro e Al-1%Mg não apresentaram grandes diferenças entre si. Observou-se que, nas amostras contendo o elemento de liga zinco, este encontrou-se distribuído na matriz de alumínio, possivelmente colaborando, juntamente com as propriedades do elemento magnésio, para os melhores resultados da mistura Al-8%Zn-1%Mg.

Por fim, concluiu-se que a adição combinada dos elementos zinco e magnésio propiciaram os melhores resultados, pois apesar de um resultado não tão favorável na análise de densidade, apresentou os melhores resultados para as análises de microestrutura (menor porosidade e melhor distribuição dos materiais), microdureza Vickers (microdureza superficial) e para os ensaios de compressão (tensão de escoamento), propriedades importantes que atendem às necessidades das aplicações destes materiais na metalurgia. Tal conclusão sugere que as propriedades

individuais de cada um destes elementos aditivos, quando combinadas às propriedades do alumínio, propiciam melhores resultados do que quando adicionadas separadamente.



## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Investigar outros parâmetros nos processos de sinterização, como tempo e temperatura.

Aumentar o teor do elemento de liga magnésio nas misturas.

Explorar a realização de tratamentos térmicos superficiais, após a sinterização, para obtenção de melhores propriedades mecânicas.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABAL. Fundamentos e Aplicações. **Associação Brasileira do Alumínio**, 2013. Disponível em: <[www.abal.org.br/site/pdf/fundamentos-do-aluminio/001.pdf](http://www.abal.org.br/site/pdf/fundamentos-do-aluminio/001.pdf)>. Acesso em: 18 maio 2019.
- ASM HANDBOOK. **Powder metal technologies and applications**. [S.l.]: ASM International, v. 7, 1998.
- ASM HANDBOOK. **Aluminum Powder Metallurgy materials and processes**. [S.l.]: ASM International, 2018.
- BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. Um estudo teórico sobre a sinterização na Metalurgia do Pó. **Redalyc**, HOLOS, p. 204-211, maio 2007. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481549274019>>. Acesso em: 05 maio 2019.
- BRUNATTO, S. F. **Estudo e desenvolvimento do processo de sinterização de compactados de ferro com enriquecimento superficial simultâneo de elementos de liga em descarga elétrica de cátodo oco**. UFSC. Florianópolis, p. 208. 2000.
- CARDOSO, G. D. S. **Desenvolvimento de um processo de sinterização a plasma para o alumínio com avaliação da influência da atmosfera gasosa**. UFRGS. PORTO ALEGRE, p. 75. 2016.
- CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó: técnica e produtos**. 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, 1992.
- DA COSTA, C. E.; VARGAS, M.; PARUCKER, M. L. Estudo das condições de tratamentos térmicos de ligas de alumínio e compósitos obtida via Metalurgia do Pó. **Jornadas SAM**, 2001. 235-242.
- EPMA. **European Powder Metallurgy Association.**, 2019. Disponível em: <<https://www.epma.com/powder-metallurgy-conventional-processing>>. Acesso em: 02 jun. 2019.
- F. THUMMLER, R. OBERACKER. **An introduction to Powder Metallurgy**. [S.l.]: The Institute of Materials, 1993.
- FERNANDES, M. R. D. P. **Compósitos de matriz metálica à base níquel com adição de TaC e NbC produzidos via Metalurgia do Pó**. UFRN. NATAL, p. 1-113. 2014.

- FERREIRA, J. M. G. C. **Tecnologia da pulverometalurgia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 344 p.
- FILHO, P. X. A. **Obtenção via Metalurgia do Pó e caracterização da dureza do compósito de liga de alumínio aa 6061 reforçado com diferentes teores de escória de alto forno a carvão vegetal**. UnB. Brasília, p. 89. 2016.
- FREDEI, M.C.; ALARCON, E.E.; KLEIN, A.N. **Componentes de Al sinterizado: tecnologia de fabricação e caracterização mecânico-microestrutural**. CBECIMAT. Aguas de São Pedro-SP. 2010.
- GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy science**. [S.l.]: Metal Powder Industries Federation, 1984.
- GERMAN, R. M. **Liquid phase sintering**. [S.l.]: [s.n.], 1985.
- GERMAN, R. M. **Sintering theory and practice**. Princeton: Metal Powder Industries, 1996.
- GÖKÇE, A.; FINDIK, F. Mechanical and physical properties of Sintered Aluminum Powders. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Sakarya, v. 30, n. 2, p. 8, 1 out. 2008.
- GOMES, J. D. O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be**. UFSC. [S.l.]. 2001.
- INFOMET. **INFOMET**, 2019. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=55>>. Acesso em: 05 jun. 2019.
- KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Engineering & Technology**. 4. ed. [S.l.]: Addison Wesley, 2000.
- KLEIN, A. N. et al. A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental. **Grupo Setorial de Metalurgia do Pó**, São Paulo, 2009. Acesso em: 02 jun. 2019.
- KWON, Y. S.; SAVITSKII, A. Soli-State sintering of Metal Powder mixtures. **Journal of Materials Synthesis and Processing**, v. 9, n. 6, p. 1-19, Novembro 2001.
- LIU J.; KUHN, H. A. Innovative approach to sintering aluminium and aluminium alloy powders for rapid manufacturing applications, v. 7, p. 246, 2006.
- LUMLEY, R. **Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications**. 1ª. ed. [S.l.]: Oxford:Woodhead Publishing Limited, 2011.

- LUMLEY, R. N.; SCHAFFER, G. B. The effect of solubility and particle size on liquid phase sintering. **Scripta Materialia**, v. 35, n. 5, p. 589-595, Setembro 1996.
- LUMLEY, R. N.; SERCOMBE, T. B.; SCHAFFER, G. B. Surface oxide and the role of magnesium during the sintering of aluminum. **Metallurgical and materials transactions a**, v. 30A, p. 457-465, FEVEREIRO 1999.
- MARTIN, J. M.; F., C. Liquid phase sintering of P/M aluminum alloys: effect of processing conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, San Sebastian, v. 143-144, p. 814-821, 2003.
- PEASE, L.; WILLIAN, G. W. **Fundamentals of Powder Metallurgy**. New Jersey: Metal Powder Industry Federation, v. 1, 2002. 451 p.
- REIS, B. P. **Endurecimento por precipitação em função das condições de solidificação em ligas leves de Al-Zn-Mg com variações no teor de zinco**. PUCRS. Porto Alegre. p 218.2018
- SAVITSKII, A. P.; BURTSEV, N. N.; MARTSUNOVA, L. S. Volume changes experienced by al-zn compacts during liquid-phase sintering. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, n. 10, p. 11-16, outubro 1982.
- SCHAFFER, G. B.; SERCOMBE, T. B.; LUMLEY, R. N. Liquid phase sintering of aluminium alloys. **Materials Chemistry and Physics**, v. 67, p. 85-91, 2001.
- SCHAFFER, G.B. & HALL, B.J. The influence of the atmosphere on the sintering of aluminum. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 33, n. 8, p. 3279–3284, Outubro 2002.
- SILVA, L. V. **Estudos dos mecanismos envolvidos em processos de endurecimento superficial a laser de ligas a de alumínio**. INEP. São Paulo. 2011.
- SILVA, M. M. D. **Avaliação da influência da adição de diferentes elementos ao alumínio no processamento por Metalurgia do Pó convencional e assistido a plasma**. UFRGS. Porto Alegre. 2017. (1-81).
- UPADHYAYA, G. S. **Powder Metallurgy Technology**. [S.I.]: Cambridge International Science Publishing, 2002.
- ZANATTA, A. M. **Influência do tratamento térmico e do tipo de reforço nas propriedades de compostos a base de ligas de alumínio obtidos via Metalurgia do Pó**. UDESC. Joinville, p. 107. 2007.

ZHANG, J. et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: processing, microstructure, property and developing trends. **Journal of Materials Science & Technology**, Wuhan, v. 35, p. 270-284, fevereiro 2019.