



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E DO SUDESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL FERREIRA FARIAS

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg-Zn, MEDIANTE  
VARIAÇÃO DE Zn, UTILIZANDO O PROCESSO DE *SQUEEZE CASTING***

MARABÁ – PA  
2018

RAFAEL FERREIRA FARIAS

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg-Zn, MEDIANTE  
VARIAÇÃO DE Zn, UTILIZANDO O PROCESSO DE *SQUEEZE CASTING***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal do Sul e do Sudeste do Pará em cumprimento as  
exigências para obtenção do Grau de Bacharel em  
Engenharia de Materiais

Orientador:

Profº. Msc. Eng. Márcio Paulo de Araújo Mafra

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Farias, Rafael Ferreira

Avaliação da resistência à tração da liga Al-Mg-Zn, mediante variação de Zn, utilizando o processo de *Squeeze Casting* / Rafael Ferreira Farias ; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2018.

1. Fundição. 2. Ligas de alumínio. 3. Zinco. 4. Magnésio. 5. Resistência de materiais. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. III. Título.

CDD: 22. ed.: 671.2

RAFAEL FERREIRA FARIAS

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg-Zn, MEDIANTE  
VARIAÇÃO DE Zn, UTILIZANDO O PROCESSO DE SQUEEZE CASTING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal do Sul e do Sudeste do Pará em cumprimento as  
exigências para obtenção do Grau de Bacharel em  
Engenharia de Materiais

DATA DA AVALIAÇÃO: 16/03/2018

CONCEITO: EXCELENTE.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Msc. Márcio Paulo de Araújo Mafra  
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)



---

Prof. Msc. Tamiris Cristina de Lima Maues  
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Coorientadora)



---

Prof. Msc. Everaldo Afonso Fernandes  
(IFPA – Membro Externo)

Dedico esse trabalho a minha família, em especial, aos meus pais e aos meus irmãos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, onipotente, onipresente e onisciente, sobretudo, pelas oportunidades permitidas no decorrer dessa trajetória, por ofertar a luz em forma de conhecimento, de experiências, parcerias, ciência, etc.

Agradeço ao apoio incondicional da toda minha família, em especial aos meus pais e irmãos, cada um compondo e contribuindo a sua maneira, para essa jornada acadêmica.

Agradeço a turma de Engenharia de Materiais 2013, da Unifesspa, pelo apoio em momentos de equívocos, contornados mediante a partilha da ciência a qual lhes cabia; até mesmo pelos problemas que surgem para nos provar.

Agradeço à todas a pessoas que compartilharam suas experiências pessoais, em Marabá, com as quais morei. Na convivência as teorias se tornam práticas e a gratidão é imensa.

Agradeço à todos os amigos que fiz em marabá, reunidos pela sentimento de cumplicidade, companheirismo e fraternidade, cujo apoio sempre foi muito edificante e trouxe muita luz.

Agradeço ao meu Orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra, pelo apoio incondicional.

*“A gente é quem constrói o mundo que existe  
em nós mesmos”*

## RESUMO

O processo de *squeeze casting* aplicado à fabricação de ligas metálicas de alumínio, magnésio e zinco produz peças para revestimento e para proteção contra corrosão com excelente acabamento. Este trabalho vem para analisar a influência da variação do teor de Zn (1%, 2% e 3%) e da pressão (0 MPa e 100 MPa) em ligas Al-Mg-Zn sobre sua resistência à tração. Na metodologia foi realizado a confecção de lingotes de Al, com e sem pressão, tais lingotes foram utilizados para a confecção dos corpos de prova do ensaio de tração, assim como para as análises de espectroscopia de raio x por energia dispersiva, micrografia óptica, ensaio de tração e fractografia. A formulação processada sob pressão apresentou resistência média à tração de 130,13 MPa, enquanto que a sem pressão foi 140,46 MPa. Segundo a correlação do efeito do Zn entre as formulações, nos teores de 1% e 3%, a composição com pressão apresenta resistência mecânica maior, contudo para o teor de 2% Zn, a composição sem pressão se destaca com melhor resistência.

Palavras-Chave: *squeeze casting*, liga Al-Mg-Zn, resistência mecânica.



## **ABSTRACT**

The squeeze casting process applied to the manufacture of aluminum alloys; magnesium and zinc, produces parts for coating and corrosion protection with excellent finish. The influence of the Zn (1%, 2% and 3%) and pressure (0 MPa and 100 MPa) on Al-Mg-Zn alloys varies with the tensile strength. In the methodology, alloy ingots with and without pressure were made, such ingots were used for the preparation of test specimens of the tensile test, as well as for x-ray spectroscopy analyzes by dispersive energy, optical micrography, of traction and fractography. The formulation processed under pressure had a tensile strength of 130.13 MPa, while the pressure was 140.46 MPa. According to the correlation of the Zn effect between the formulations, at 1% and 3%, the composition with pressure has higher mechanical strength, however, for the 2% Zn content, the composition without pressure stands out with better resistance.

Keywords: squeeze casting, al-Mg-Zn alloy, mechanical strength.

## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Diagrama ternário da Liga Al-Mg-Zn representado pelas marcações a região na qual a liga trabalhada neste trabalho se encontra. ....	20
<b>Figura 2</b> - (a) Contração pode ocorrer entre os braços da dendrita. (b) Braços secundários menores resultam em distribuição mais uniforme da porosidade. (c) Braços primários podem evitar a ocorrência da contração. ....	23
<b>Figura 3</b> - Descrição do processo de Squeeze Casting. ....	24
<b>Figura 4</b> - (a) Empescoçamento inicial. (b) Formação de pequenas cavidades. (c) Coalescência de cavidades para formar uma trinca. (d) Propagação da trinca. (e) Fratura final por cisalhamento em um ângulo de 45° em relação à direção da tração. ....	26
<b>Figura 5</b> - (a) Fratura do tipo taça e cone no alumínio. (b) fratura frágil em um aço doce. ....	27
<b>Figura 6</b> - Percurso metodológico desenvolvido para análise de resistência à tração para a liga Al-Mg-Zn .....	28
<b>Figura 7</b> - Prensa “HIDRAUMAX PEH 100” com capacidade máxima de 100 toneladas ....	29
<b>Figura 8</b> - Especificações das dimensões da lingoteira utilizada. ....	30
<b>Figura 9</b> - Etapa de aquecimento da punção da prensa até 100° C com o maçarico. ....	31
<b>Figura 10</b> - Processo de vazamento da liga metálica diretamente na lingoteira. ....	31
<b>Figura 11</b> - Atividade de aplicação de pressão (100 MPa) sobre a liga fundida. ....	32
<b>Figura 12</b> - Norma para ensaio de tração. ....	33
<b>Figura 13</b> - Finalização da usinagem dos corpos de prova da liga Al-Mg-Zn. (SP) representa os corpos de prova formulados (sem pressão). (CP) representa os corpos de prova formulados (sob pressão). ....	34
<b>Figura 14</b> - Espectrômetro da liga Al-2%Mg-1%Zn. ....	35
<b>Figura 15</b> - Composição química da liga Al-2%Mg-1%Zn analisada pro EDX. ....	36
<b>Figura 16</b> - Espectrômetro da liga Al-2%Mg-2%Zn. ....	36
<b>Figura 17</b> - Composição química da liga Al-2%Mg-2%Zn analisada pro EDX. ....	37
<b>Figura 18</b> - Espectrômetro da liga Al-2%Mg-3%Zn. ....	37
<b>Figura 19</b> - Composição química da liga Al-2%Mg-3%Zn analisada pro EDX. ....	38
<b>Figura 20</b> - (a) Liga Al-2%Mg-1%Zn. (b) Liga Al-2%Mg-2%Zn. (c) Liga Al-2%Mg-3%Zn. Aumento de 50x. ....	38
<b>Figura 21</b> - (d) Liga Al-2%Mg-1%Zn. (e) Liga Al-2%Mg-2%Zn. (f) Liga Al-2%Mg-3%Zn. Aumento de 50x. ....	39

<b>Figura 22</b> – Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão, com 1% de Zn). .....	40
<b>Figura 23</b> - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão, com 2% de Zn). .....	41
<b>Figura 24</b> - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão, com 3% de Zn). .....	42
<b>Figura 25</b> - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão, com 1% de Zn). .....	43
<b>Figura 26</b> - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão, com 2% de Zn). .....	44
<b>Figura 27</b> - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão, com 3% de Zn). .....	45
<b>Figura 28</b> - Curvas representativas da resistência média à tração da liga Al-Mg-Zn (sob pressão; variando com 1%; 2% e 3% de Zn).....	46
<b>Figura 29</b> - Curvas representativas da resistência média à tração da liga Al-Mg-Zn (sem pressão; variando com 1%; 2% e 3% de Zn).....	47
<b>Figura 30</b> - Correlação entre as melhores resistências das composições das formulações com pressão (CP) e sem pressão (SP). .....	48
<b>Figura 31</b> - Característica da fratura tipo de fratura observada no corpo de prova. ....	49
<b>Figura 32</b> - Fractografia da formulação Al-2%Mg-1%Zn, processado sob pressão (100 MPa), aumento de 100x.....	50
<b>Figura 33</b> - Fractografia da formulação Al-2%Mg-2%Zn, processado sob pressão (100 MPa), aumento de 100x.....	50
<b>Figura 34</b> - Fractografia da formulação Al-2%Mg-3%Zn, processado sob pressão (100 MPa), aumento de 100X.....	51
<b>Figura 35</b> - Fractografia da formulação Al-2%Mg-1%Zn, processado sem pressão, aumento de 100x .....	51
<b>Figura 36</b> - Fractografia da formulação Al-2%Mg-2%Zn, processado sem pressão, aumento de 100x .....	52
<b>Figura 37</b> - Fractografia da formulação Al-2%Mg-3%Zn, processado sem pressão, aumento de 100x .....	52

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Resistência específica de ligas não ferrosas .....	19
<b>Tabela 2</b> - Classificação das ligas de Alumínio que são trabalháveis mecanicamente .....	19
<b>Tabela 3</b> - Classificação das ligas de Alumínio que são aplicadas em fundição .....	20
<b>Tabela 4</b> - Concentrações de cada formulação da liga Al-Mg-Zn.....	29
<b>Tabela 5</b> - Melhores resultados do ensaio de tração (sob pressão, com 1% de Zn). .....	40
<b>Tabela 6</b> - Melhores resultados do ensaio de tração (sob pressão, com 2% de Zn). .....	41
<b>Tabela 7</b> - Melhores resultados do ensaio de tração (sob pressão, com 3% de Zn). .....	42
<b>Tabela 8</b> - Melhores resultados do ensaio de tração (sem pressão, com 1% de Zn). .....	43
<b>Tabela 9</b> - Melhores resultados do ensaio de tração (sem pressão, com 2% de Zn). .....	44
<b>Tabela 10</b> - Melhores resultados do ensaio de tração (sem pressão, com 3% de Zn). .....	45
<b>Tabela 11</b> - Maior resistência à tração mensurada, para formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão).....	46
<b>Tabela 12</b> - Maior resistência à tração mensurada, para formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão).....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\sigma$	Tensão
$E$	Módulo de Elasticidade
$\varepsilon$	Deformação
$DL$	Alongamento
$L_0$	Comprimento útil
$^{\circ}C$	Grau Celsius
$g$	Grama
CP	Corpo de prova
(EDS)	Espectroscopia de raio x por energia dispersiva

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	18
2.1 OBJETIVO GERAL .....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
3.1 LIGAS DE ALUMÍNIO .....	19
<b>3.1.1 Características do magnésio</b> .....	21
<b>3.1.2 Características do zinco</b> .....	21
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	21
3.3 INFLUÊNCIA DA SOLIDIFICAÇÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	22
<b>3.3.1 Crescimento dos grãos</b> .....	22
<b>3.3.2 Estruturas dendríticas</b> .....	23
3.4 PROCESSO DE <i>SQUEEZE CASTING</i> .....	24
3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA .....	25
<b>3.5.1 Ataque químico para análise da micrografia</b> .....	25
3.6 ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS) .....	25
3.7 FALHA POR FRATURA DÚCTIL .....	26
<b>4 MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	28
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	28
4.2 PREPARAÇÃO DAS LIGAS .....	29
<b>4.2.1 Formulação de lingote vazado com pressão</b> .....	32
<b>4.2.2 Formulação de lingote vazado sem pressão</b> .....	32
4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO .....	33
4.4 REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA .....	34
4.5 PREPARAÇÃO DE AMOSTRA PARA MICROGRAFIA .....	34
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	35
5.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA Al-Mg-Zn .....	35

<b>5.1.1</b>	<b>Formulação da liga a 1% de Zn</b> .....	35
<b>5.1.2</b>	<b>Formulação da liga a 2% de Zn</b> .....	36
<b>5.1.3</b>	<b>Formulação da liga a 3% de Zn</b> .....	37
5.2	<b>MICROGRAFIA DAS LIGAS</b> .....	38
<b>5.2.3</b>	<b>Formulação processada sob pressão (100 MPa)</b> .....	38
<b>5.2.3</b>	<b>Formulação processada sem pressão</b> .....	39
5.3	<b>ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</b> .....	39
<b>5.3.1</b>	<b>Dados da liga (al-mg-zn) processada sob pressão</b> .....	39
<b>5.3.2</b>	<b>Dados da liga (Al-Mg-Zn) processada sem pressão</b> .....	42
<b>5.3.3</b>	<b>Representação dos melhores resultados de cada formulação (sob pressão) da liga (Al-Mg-Zn)</b> .....	45
<b>5.3.4</b>	<b>Representação dos melhores resultados de cada formulação (sem pressão) da liga (Al-Mg-Zn)</b> .....	46
<b>5.3.5</b>	<b>Efeito da variação de zinco entre as formulações</b> .....	48
<b>5.3.6</b>	<b>Dados da liga (Al-Mg-Zn)</b> .....	48
5.4	<b>ANÁLISE DA FRATURA</b> .....	49
<b>5.4.2</b>	<b>Fractografias - liga processada sob pressão</b> .....	49
<b>5.4.3</b>	<b>Fractografias - liga processada sem pressão</b> .....	51
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	54
6.1	<b>ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b> .....	54
6.2	<b>ANÁLISE DA MICROGRAFIA DA LIGA Al-Mg-Zn (SOB PRESSÃO)</b> .....	54
6.3	<b>ANÁLISE DA MICROGRAFIA DA LIGA AL-MG-ZN (SEM PRESSÃO)</b> .....	54
6.4	<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg-Zn</b> .....	54
6.5	<b>ANÁLISE DA FRACTOGRAFIA DA LIGA AL-MG-ZN</b> .....	55
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

A engenharia moderna caracteriza-se pela aplicação do conhecimento científico à solução de problemas. “Agora um projeto teórico baseado em conceitos científicos, em teorias formalmente estudadas e em experiências de laboratório metodologicamente controladas antecede a construção” [1]

Atualmente, componentes de ligas de alumínio, cobre, magnésio, ferrofundido, aços inoxidáveis e de superligas à base de níquel são facilmente fabricados por *squeeze casting* [2]. As aplicações incluem componentes automotivos, por exemplo, pistões; discos de freio; rodas e cubos, componentes de mísseis e engrenagens [3]. Recentemente, a técnica de *squeeze casting* tem sido muito estudada para o uso na fabricação de compósitos de matriz metálica, especialmente em ligas de magnésio, alumínio e cobre [4].

O uso do zinco ligado a outros elementos metálicos está geralmente associado a características de revestimento, de proteção à corrosão. Ligado ao alumínio, ele atribui também melhoramento das propriedades mecânicas. O que lhe permite ser aplicado sob a forma: chapas lisas ou onduladas; para coberturas e revestimentos em calhas e tubos condutores de fluidos; composto (alvaiade, pinturas). [5]

Tendo ligas de alumínio, fabricadas por métodos de fundição, com variação de percentual de 0,5% a 3% de Zinco e combinadas com Magnésio, produzirem alta resistência ao impacto, alta resistência à tração e excelente ductilidade [6]. O uso dos benefícios do método de solidificação por pressão (*squeeze casting*) como forma de obtenção desta liga foi inevitável. O intuito da utilização deste método é de minimizar os defeitos obtendo assim maior eficiência e confiabilidade nos resultados.

Em geral, componentes fabricados por “*Squeeze Casting*” apresentam granulação fina, excelente acabamento superficial e quase livre de porosidade, eles podem ser de variados tamanhos e geometrias, as propriedades mecânicas são aumentadas significativamente, em comparação aos métodos tradicionais de fundição e, além disso, peças fabricadas por esse tipo de processo apresentam soldabilidade superior e são também capacitadas a receberem tratamentos térmicos, e ainda assim, comparado com a atividade de fundição convencional, as peças que são fabricadas por *Squeeze Casting*, formam-se em uma só operação, necessitando ainda de menor consumo de energia. [7]

*Squeeze casting* é um processo econômico, simples e conveniente. Ele encontrou aplicação extensiva na indústria automotiva na produção de juntas de direção dianteira de



alumínio, quadros de chassi, suportes ou nós. Projeto de hélices de alta capacidade para motor de barco. [8]

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como meta analisar a resistência a tração da liga Al-Mg-Zn, mediante variação da composição de Zn, a qual foi obtida pelo processo de “*squeeze casting*”, a partir de formulações com pressão e sem pressão.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver a liga de Al-Mg-Zn a partir do processo de solidificação processada por “*Squeeze Casting*”;
- Analisar a influência da variação de Zn na composição da liga correlacionado com a resistência à tração
- Avaliar a conformidade química de cada liga estudada;
- Avaliar a microestrutura das ligas de Al-Mg-Zn e correlacionar com a resistência a tração obtida;
- Descrever a microestrutura das ligas Al-Mg-Zn de forma qualitativa;
- Analisar o aspecto de fratura ocorrida nos corpos de prova de ensaio a tração e correlacionar os resultados;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 LIGAS DE ALUMÍNIO

**Tabela 1** - Resistência específica de ligas não ferrosas

METAL	PESO ESPECÍFICO (g/cm <sup>3</sup> )	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)
Alumínio	2,70	572
Magnésio	1,74	379
Zinco	7,13	517

**Fonte:** [9]

O alumínio apresenta um terço da massa específica do aço, possui menor propriedade de tração comparada a ele, além disso, apresentam excelentes resistência específica (resistência mecânica/densidade).

Mediante as propriedades físicas notáveis do alumínio, infere-se ao comportamento ferromagnético e a boa resistência a corrosão e oxidação. Responde muito bem a mecanismos de endurecimento, podendo ser utilizado em vários mecanismos de endurecimento por esse motivo.

A adição de grandes concentrações de Magnésio (Mg) ao Alumínio, permite a formação de um liga, a qual pode ser utilizada para a fabricação de automóveis. As ligas de alumínio são classificadas em dois grupos principais: Ligas trabalhadas e ligas para fundição.

**Tabela 2** - Classificação das ligas de Alumínio que são trabalháveis mecanicamente

5xxx	Al-Mg	Não endurecível por envelhecimento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecível por envelhecimento

**Fonte:**[9]

A liga 7xxx é endurecível por envelhecimento, elas apresentam excelentes resistências específicas e o precipitado que pode ser formado é limitado. Assim que atinjam a condição de envelhecida, não é recomendado a essa liga ser trabalhada acima de 175°C.

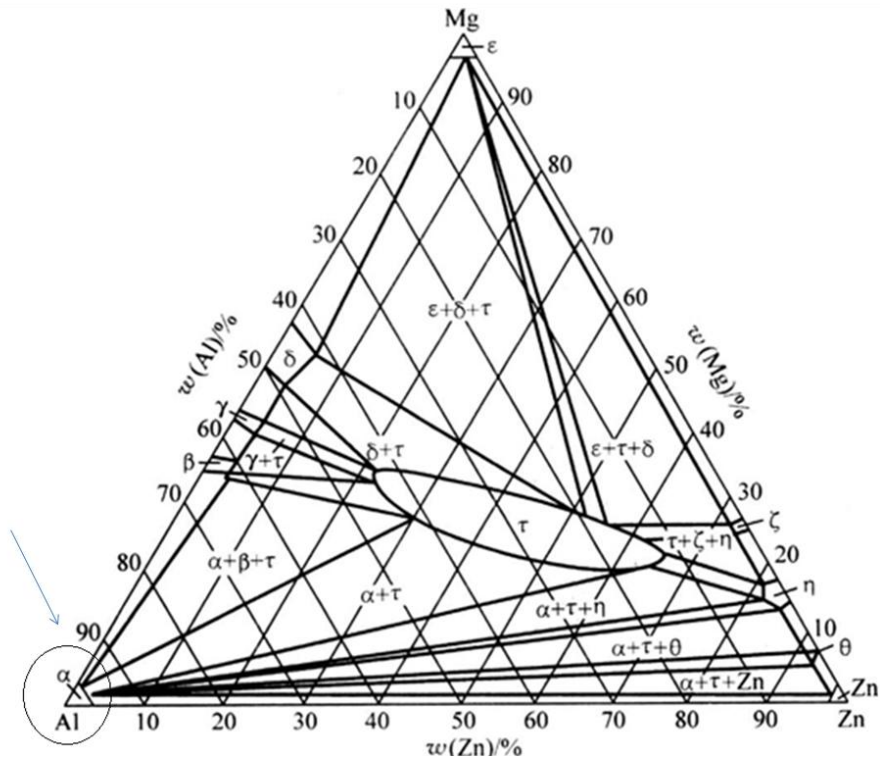
**Tabela 3** - Classificação das ligas de Alumínio que são aplicadas em fundição

5xx.x.	Al-Mg	Não endurecível por envelhecimento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecível por envelhecimento

Fonte: [9]

Na Figura 1, na região que foi circutada, identifica-se como sendo nesta área que se encontram as composições para Al-2%Mg-1%Zn, Al-2%Mg-2%Zn e Al-2%Mg-3%Zn.

**Figura 1** - Diagrama ternário da Liga Al-Mg-Zn representado pelas marcações a região na qual a liga trabalhada neste trabalho se encontra.



Fonte: [10]

A resistência mecânica do alumínio pode ser aumentada a partir da formação de ligas, contudo, esse processo tende a diminuir a resistência à corrosão desse elemento. Dentre os principais elementos de ligas, capazes de gerar esse efeito, está o cobre, magnésio, silício, manganês e zinco.[11]

Existem ligas de alumínio que são termicamente tratáveis, logo podem desenvolver “endurecimento por precipitação”, isso ocorre devido à adição de elementos de liga. Esse

fenômeno explica o aumento da resistência mecânica da liga de alumínio e, deve-se ao fato de que é precipitado no alumínio, geralmente um composto formado por dois elementos, como o (MgZn<sub>2</sub>).[11]

Quanto mais puro é o alumínio, maior será sua resistência à corrosão, dessa forma menor sua resistência a corrosão. A adição de magnésio melhora a resistência mecânica, contudo a resistência a corrosão, continua baixa. Quando este elemento é ligado ao zinco-magnésio, é possível conseguir-se boa resistência mecânica, assim como torna-se mais resistente a corrosão.[5]

### **3.1.1 Características do magnésio**

Assim como o alumínio, o magnésio apresenta baixo ponto de fusão, o qual está na faixa de 651°C; a resistência corrosão é considerada razoável, mas isso deve-se às impurezas, as quais este é relacionado; o Zinco (Zn) e o manganês (Mn) também estão incluídos como seus principais elementos de liga.[11]

As ligas de magnésio, por apresentar a mais baixa massa específica dos materiais estruturais, faz com que ele seja aplicado diretamente à indústria aeronáutica, assim como para produtos como mísseis e bagagens em geral. Materiais a base deste componente, são considerados rígidos; são recicláveis, baratos de serem produzidos. A diversidade da sua aplicação abrange dispositivos portáteis; automóveis e seus utensílios, equipamentos de áudio-vídeo-computação-comunicação.[11]

### **3.1.2 Características do zinco**

Apresenta baixa temperatura de fusão, por volta de 400-420° C, baixa dureza (quando considerado isoladamente em relação a outros componentes). Reativo, logo considerado pouco resistente à corrosão, contudo, aplicado como metal de sacrifício. Aplicações mais usuais a ele, contam com emprego na produção de cadeados, acessórios para encanamento hidráulico, peças automotivas e equipamentos de escritório em geral.[11]

O contato com a atmosfera faz com que ele se cubra facilmente por uma camada de óxido, a qual é capaz de protegê-lo contra a corrosão. Considerado até mais pesado do que o ferro, e quatro vezes mais tenaz também. Apresenta resistência a tração aproximadamente a (16 Kg/mm<sup>2</sup>); condutibilidade térmica razoável e grande coeficiente de dilatação.[5]

## **3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO**

A etapa inicial deste ensaio ocorre pela aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico, até que este sofra a ruptura. Com a posse

mensurações feitas neste procedimento é possível medir a variação no comprimento (L), dos corpos de prova, em função da carga aplicada (F).

Após tratamento adequado matemático e estatístico dos resultados, é obtido um gráfico com uma curva tensão ( $\sigma$ ) versus a deformação ( $\epsilon$ ) para cada corpo-de-prova. É de um ensaio bastante utilizado como método do controle das especificações da entrada de matéria-prima e controle de procedimentos com materiais metálicos, principalmente.

Os resultados gerados pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais.

Se as diferentes curvas de carga aplicada versus o comprimento forem transformadas em curvas de tensão (com a convenção da área inicial) versus a deformação relativa, espera-se que os corpos de prova de diferentes dimensões, mas produzidos com o mesmo material tenham curvas iguais ou pelo menos equivalentes.

Segundo a lei de Hooke, pode-se afirmar que a “a tensão resultante da aplicação de uma força em um material é diretamente proporcional à sua deformação”. Definida de acordo com a equação:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\text{Equação 01})$$

$$\epsilon = \frac{DL}{L_0} \quad (\text{Equação 02})$$

### 3.3 INFLUÊNCIA DA SOLIDIFICAÇÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA

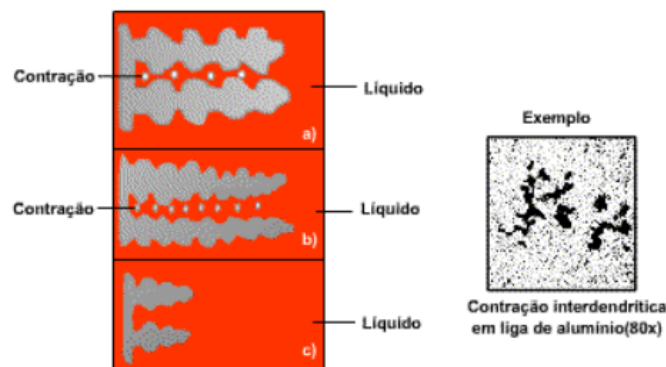
#### 3.3.1 Crescimento dos grãos

A temperatura ambiente, as propriedades mecânicas de um metal com granulação fina, são consideradas superiores em termos de resistência e tenacidade, comparando-se com as quais são mais grosseiras [9]. A nucleação homogênea, que caracteriza o crescimento de grãos estáveis no seio da fase líquida é controlada, o fenômeno de super-resfriamento ajuda nesse processo; contudo quando um metal líquido se solidifica, as impurezas que o material conte, assim como as paredes do molde, servem como agentes propagadores da nucleação heterogênea, a qual reduz a resistência mecânica [9].

### 3.3.2 Estruturas dendríticas

Reconhece-se atualmente que os espaçamentos provenientes das ramificações dendríticas, apresentam uma correlação direta e muito mais imediata com as propriedades mecânicas do que o próprio crescimento de grão cristalino [12]. Em geral, o crescimento dendrítico é importante porque pode levar a já que este pode levar a defeitos de fundição, como por exemplo a porosidade e contração [13]. Menores espaçamentos dendríticos secundários (EDS) se caracterizam por elevar a resistência mecânica e aumentar a ductilidade das ligas metálicas. [9]

**Figura 2** - (a) Contração pode ocorrer entre os braços da dendrita. (b) Braços secundários menores resultam em distribuição mais uniforme da porosidade. (c) Braços primários podem evitar a ocorrência da contração.

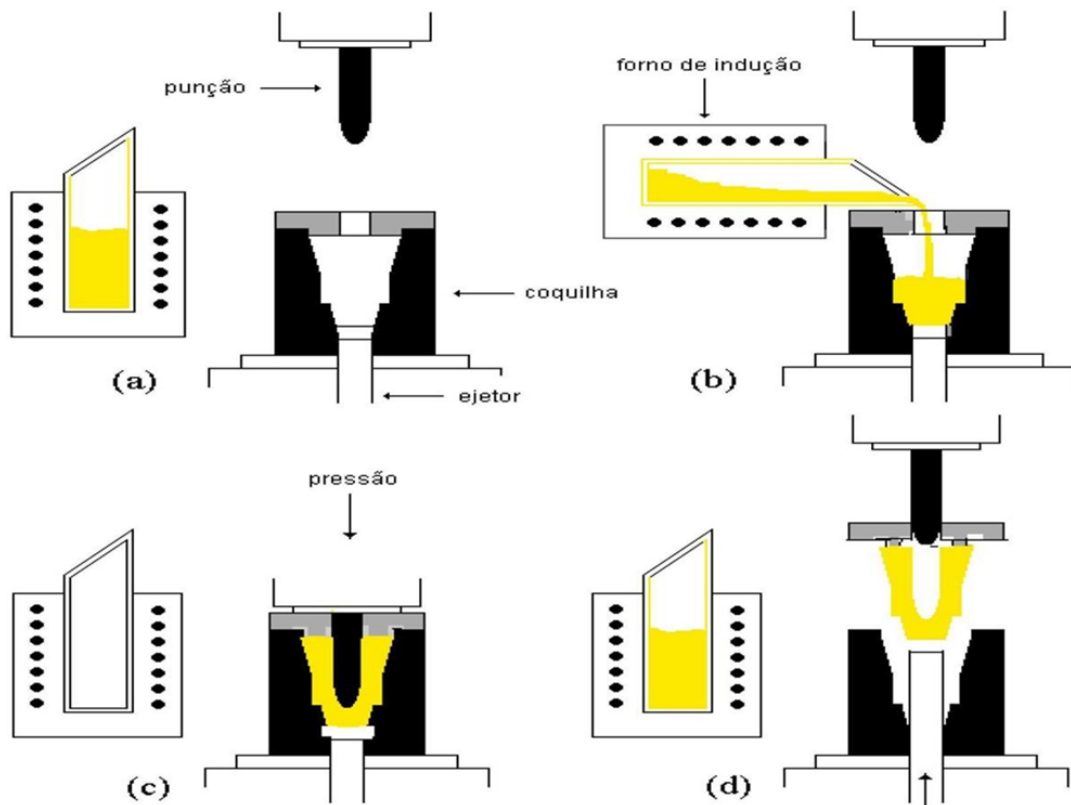


**Fonte:** [14]

A concentração máxima das microsegregações (que são defeitos originados do crescimento das dendritas), ocorrem no centro das regiões interdendríticas, e a mínima no centro das ramificações interdendríticas, de acordo com a região da Figura 2.(a), na qual observa-se essa região de espaçamento dendrítico. Sabe-se que quanto menos for o espaçamento dendrítico, menores defeitos de macrosegregação, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas. [15]

### 3.4 PROCESSO DE *SQUEEZE CASTING*

**Figura 3** - Descrição do processo de Squeeze Casting.



Fonte:[16]

A fundição é o processo de fabricação mais econômico para se transformar material bruto em ferramentas úteis, porém assim como os outros processos ela apresenta falhas. Uma das maiores falhas para a fundição convencional, ou mesmo para técnicas avançadas de fundição, consiste na formação de defeitos tais como porosidades e defeitos de segregação.

Por esse motivo novas técnicas de fundição foram desenvolvidas para compensar tais problemas, entre essas técnicas esta o *Squeeze Casting*, o qual possui grande potencial para criar componentes fundidos com menos defeitos. [17].

De acordo com a Figura 3.(a) inicia-se o processo de vazamento do metal no lingote; 3.(b) A etapa de vazamento se efetiva; 3.(c) A pressão sobre a liga é aplicada e por fim, em 3.(d) a peça produzida sob pressão, com redução de defeitos de contração.



### 3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA

O método de análise da micrografia por microscopia óptica é mais uma das diversas técnicas de observação da microestrutura para metais em geral, aços e ferros fundidos. Sendo assim, emprega-se luz visível, que incide sobre a amostra, a qual é refletida até o observador. Para a resolução que pode ser obtida em uma Figura, esse fator depende do comprimento de onda da radiação empregada.[18]

Para a luz visível de cor preferencialmente verde, resulta em uma resolução de aproximadamente 220 a 250 nm, que corresponde a um aumento máximo da ordem de 1.400 vezes. Ainda que existam microscópios ópticos capazes de fornecer aumentos superiores a este valor, tais aumentos são considerados como possuindo resolução inútil, por não fornecerem informação adicional àquela obtida com o aumento máximo de cerca de 1400X. Usa-se em média aumentos de 500x à 1000x de aumento, o que facilita observação dos grãos, dos contornos, defeitos e outras características.[18]

#### 3.5.1 Ataque químico para análise da micrografia

Os materiais metálicos, geralmente, precisam ser atacados para revelar suas respectivas microestruturas. O ataque é um processo de corrosão controlado em que ocorre a dissolução seletiva da estrutura para a produção de uma superfície topográfica que reflete diferencialmente a luz e forma, assim, a figura. [17]. Para a micrografia da liga alumínio é indicado o uso do reagente Keller.

A duração do ataque depende da concentração do reativo e da natureza e estrutura do material a ser examinado. O tempo médio para aços comuns e ferros fundidos, empregando-se reativos usuais, é da ordem de 5 a 15 segundos. Terminado o ataque, lava-se imediatamente a superfície com álcool, em seguida, procede-se à secagem com chumaço de algodão. [18]

### 3.6 ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

O (EDS) é um tipo de espectrômetro que é normalmente utilizado em associação ao MEV ou microscópio eletrônico de varredura. Este equipamento realiza a análise da amostra de um componente químico a partir dos raios x que são gerados da interação feixe-amostra de elétrons. Dessa forma, os espectros obtidos, são convertidos em diagramas da intensidade do sinal, recebidos das amostras, em função das suas respectivas energias. Proporciona a composição elementar do material, dessa forma componentes individuais podem ser identificados. [19]

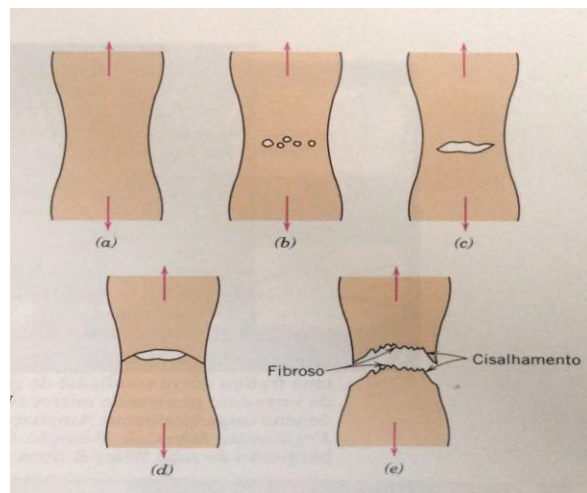
A análise pode ser feita pontualmente, utilizando-se feixe de elétrons, o que permite o manuseio do equipamento a fim de que este realize análise uma zona superficial específica, ponto a ponto (isso ocorre em ordem de micrometros). É possível conseguir mapas ou perfis de concentração, realizados a partir da distribuição dos elementos químicos, os quais se espalham sobre a mostra. Então, esta ferramenta permite estudar o aspecto assumido pela morfologia dos materiais; várias formas assumidas pelos compostos ou constituintes da amostra analisada; simultaneamente realizar análise química. [20]

### 3.7 FALHA POR FRATURA DÚCTIL

Materiais considerados altamente dúcteis tem a característica de formar um pescoço até uma fratura pontual, fato que colabora para a redução virtual da área de 100%. O perfil de ruptura mais comum encontrada em ensaios de tração é aquele no qual a fratura é precedida por quantidade moderada de empescoçamento. É observado, nesses casos, que após o início do empescoçamento, pequenas cavidades ou microvazios, vão se formando na secção transversal do corpo de prova. [11]

À medida que a deformação vai seguindo seu percurso, os microvazios aumentam o seu tamanho, aproximando-se uns dos outros mutuamente e coalescem, formando assim, trincas em forma de elipse. A direção de crescimento dessas trincas ocorre na direção perpendicular, comparada com a orientação de aplicação da tensão ao corpo de prova. [11]

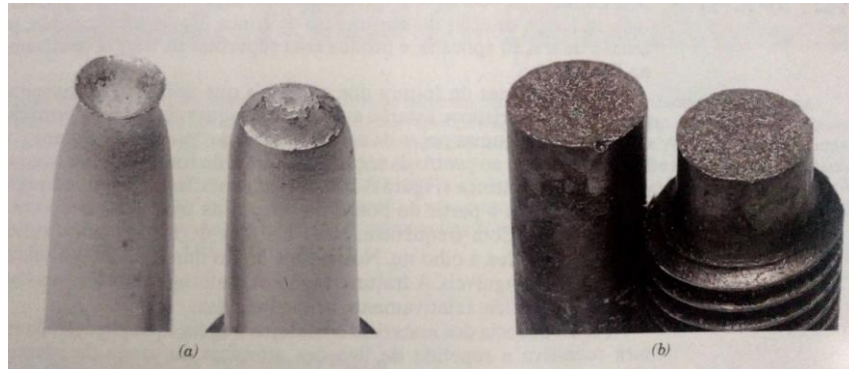
**Figura 4** - (a) Empescoçamento inicial. (b) Formação de pequenas cavidades. (c) Coalescência de cavidades para formar uma trinca. (d) Propagação da trinca. (e) Fratura final por cisalhamento em um ângulo de 45° em relação à direção da tração.



Fonte: [11]

A trinca propaga-se rapidamente, ao redor da região do perímetro externo ao pescoço. Ela é desenvolvida por uma tensão cisalhante que ocorre em um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$ , comparando isso ao eixo de tração do corpo de prova. Aos  $45^\circ$  a tensão cisalhante evidente é máxima. [11]

**Figura 5** - (a) Fratura do tipo taça e cone no alumínio. (b) fratura frágil em um aço doce.

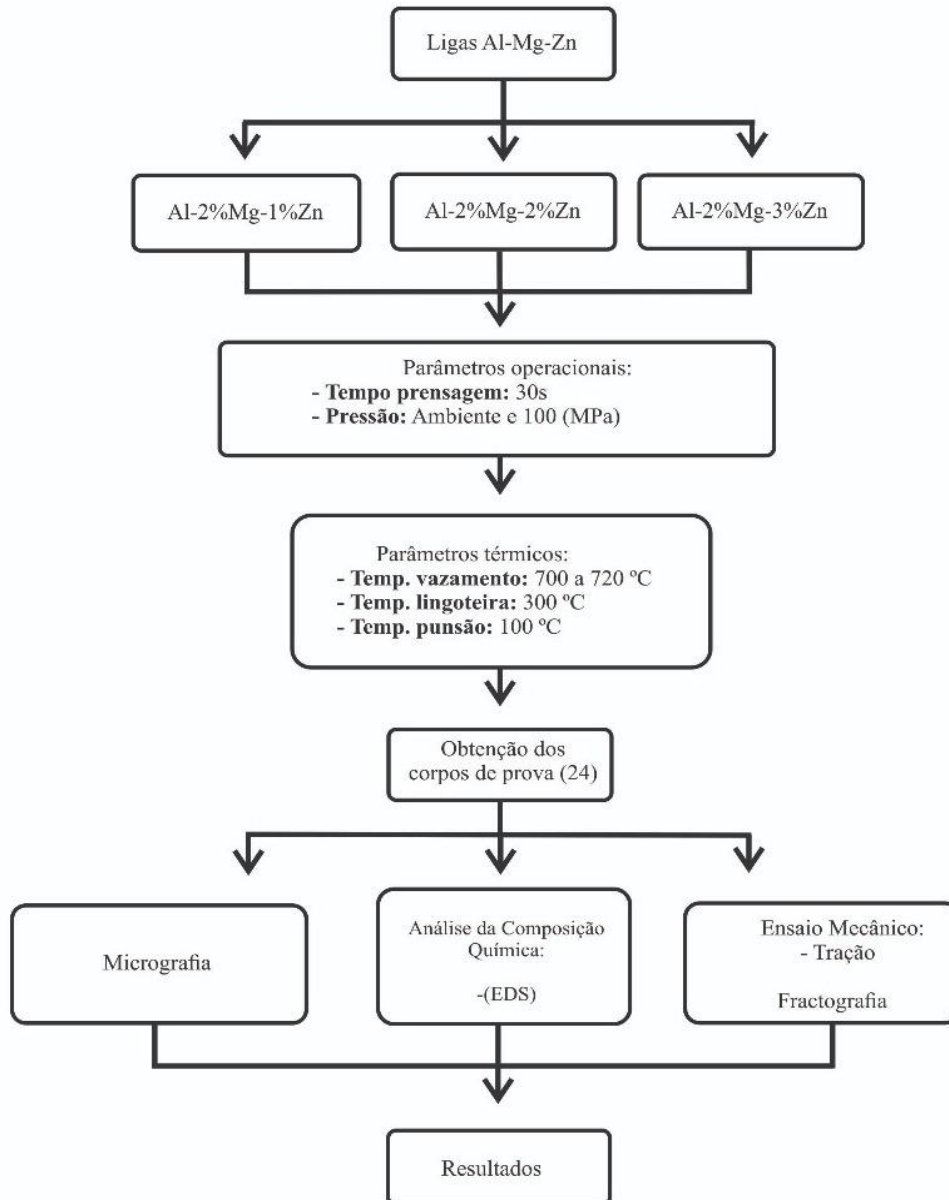


**Fonte:** [11]

Na região externa assim como na central, da superfície da fratura desse tipo de amostra, desenvolve-se geralmente sob a forma de uma aparência irregular e fibrosa.

#### 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

**Figura 6** - Percurso metodológico desenvolvido para análise de resistência à tração para a liga Al-Mg-Zn



**Fonte:** Autor, 2018.

##### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A princípio considerou-se utilizar metais com maior pureza comercial possível, levando em consideração que concentrações de outros elementos químicos, não pudessem vir

a influenciar no procedimento. Dessa forma foi selecionado Alumínio, Magnésio e Zinco, para a realização da atividade, como demonstra a Figura 6.

O parâmetro usado como proporção, para obter a mistura dos solutos respectivos a cada elemento químico, foi o peso, em gramas, de cada componente, da seguinte forma:

**Tabela 4** - Concentrações de cada formulação da liga Al-Mg-Zn.

Al (g)	Mg (g)	Zn (g)	Al (% em peso)	Mg (% em peso)	Zn (% em peso)	Formulação (N°)
1940	40	20	97	2	1	1
1920	40	40	96	2	2	2
1900	40	60	95	2	3	3

**Fonte:** Autor, 2018.

#### 4.2 PREPARAÇÃO DAS LIGAS

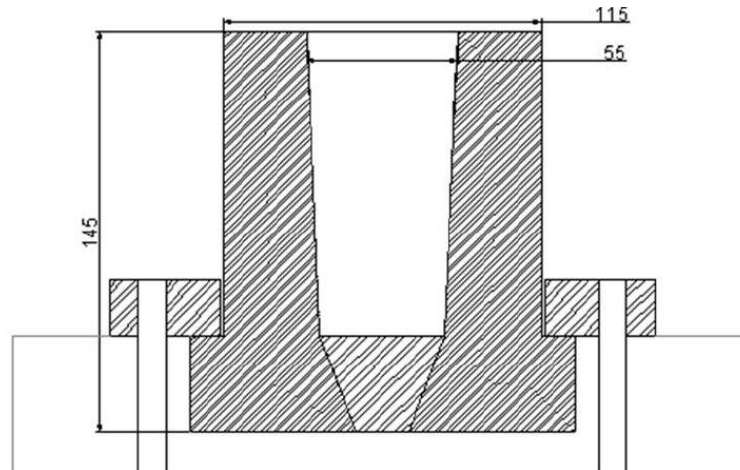
Os componentes da liga foram pesados em balança analítica, levando em conta sua precisão de pesagem, cuja marca é HIDRAUMAX PEH 100 (Figura 7) Em seguida, adicionou-se ao cadinho modelo Salamander SiC AS8, o alumínio pesado, o qual era fundido no forno tipo Jung (modelo 9812), no estado de fusão desse elemento, adicionou-se magnésio e zinco, na proporção condizente com cada formulação.

**Figura 7** - Prensa “HIDRAUMAX PEH 100” com capacidade máxima de 100 toneladas



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 8** - Especificações das dimensões da lingoteira utilizada.



**Fonte:** [7]

O cadinho contendo a liga foi devolvido ao forno Jung, para fins de refusão e para que os componentes tivessem condições para difundir, de forma, mais homogênea possível entre si. Para isso, a liga foi mantida por tempo médio de (1 hora e 30 minutos), sob a temperatura de aproximadamente 850° C.

No momento em que o cadinho era retirado do forno, foi usado o termopar (Ni-Cr tipo K) para realizar a medição da temperatura de fusão, para a qual, estipulou-se uma faixa de vazamento entre 700° a 720° C. Ao passo que o termopar acusasse essa faixa de temperatura, o material era usado para se realizar o vazamento.

Utilizou-se como suporte à realização da fundição, para a liga Al-Mg-Zn, uma lingoteira, cujo material é composto por aço 1045 de acordo com ASTM e tem dimensões específicas (Figura 8).

**Figura 9** - Etapa de aquecimento da punção da prensa até 100° C com o maçarico.



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 10** - Processo de vazamento da liga metálica diretamente na lingoteira.



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 11** - Atividade de aplicação de pressão (100 MPa) sobre a liga fundida.



**Fonte:** Autor, 2018.

#### **4.2.1 Formulação de lingote vazado com pressão**

O procedimento para obtenção da formulação com pressão, contou com a prensa hidráulica HIDRAUMAX PEH 100 com capacidade máxima de 100 toneladas, a qual teve sua região de punção também aquecida (Figura 9), a temperatura mínima de 100° C. Contando com a lingoteira já aquecida, o material era vazado diretamente na lingoteira, em seguida, a prensa foi manuseada a aplicar pressão ao material fundido, com aproximadamente 100 MPa, por um período de 30 segundos (Figura 11), em média.

#### **4.2.2 Formulação de lingote vazado sem pressão**

Em paralelo a medição de temperatura, da liga fundida, a lingoteira era aquecida até uma temperatura entre 100° a 300° C, em seguida o material, foi vazado diretamente na lingoteira (Figura 10), compondo assim, as formulações sem pressão.

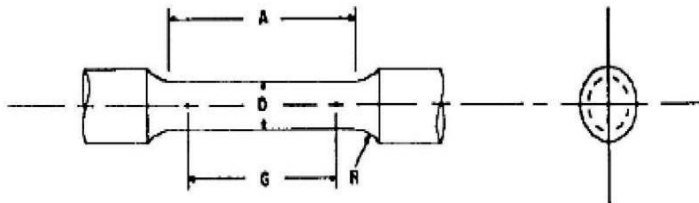


### 4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

Aplicou-se a Norma ASTM E 8M – 03 (Figura 12) para se obter os corpos de provas nas dimensões adequadas para ensaio de tração, os quais foram dispostos de acordo com a Figura 13, em SP ou sem pressão, representado pela coluna esquerda e CP, com pressão, representado pela coluna direita

Os corpos de prova para ensaio de tração foram confeccionados por usinagem (torneamento) por empresa externa. Como critério de velocidade de ensaio, utilizou-se 10 mm/min, aplicados aos corpos de prova, a fim de testar à resistência a tração deles.

**Figura 12** - Norma para ensaio de tração.

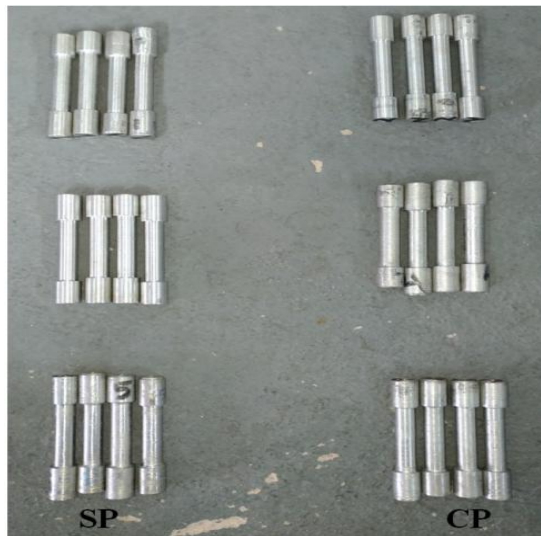


Dimensão mm

	Espécime padrão		Espécime proporcional ao padrão		
	12,5	9	6	4	2,5
G - Comprimento útil	62,5 ± 0,1	45,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	12,5 ± 0,1
D - Diâmetro	12,5 ± 0,2	9,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1
R - Raio do contorno	10	8	6	4	2
A - Comprimento da secção de redução	75	54	36	24	20

Fonte: [21]

**Figura 13** - Finalização da usinagem dos corpos de prova da liga Al-Mg-Zn. (SP) representa os corpos de prova formulados (sem pressão). (CP) representa os corpos de prova formulados (sob pressão).



Fonte: Autor, 2018.

#### 4.4 REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA

Esta etapa consistiu em basicamente, separa-se 3 amostras de composições diferentes de zinco, para que elas fossem analisadas pelo método de espectroscopia de raio x por energia dispersiva, (EDS), a afim de identificar se a composição química da liga que fora fundida, estava de acordo com os parâmetros de composição.

#### 4.5 PREPARAÇÃO DE AMOSTRA PARA MICROGRAFIA

Separou-se uma amostra de cada liga e suas respectivas composições, em seguida foi necessário promover o embutimento das amostras, que foram retiradas dos lingotes, realizando nelas um pequeno corte, sem comprometer a estrutura.

Foi obtido seis amostras, três delas provenientes da formulação com pressão de acordo com a composição: Al-2%Mg-1%Zn; Al-2%Mg-2%Zn e Al-2%Mg-3%Zn, respectivamente. Da mesma forma, foram obtidas mais três amostras da formulação sem pressão. Elas foram lixadas para refinar a sua microestrutura, para isso usou-se as lixas 80x, 100x, 120x, 220x, 320x, 400x, 600x, 800x e, por fim, realizou-se polimento com a lixa 1200x adicionando-se alumina, a partir do auxílio de uma politriz.

A etapa de ataque das amostras contou com a solução Keller, por um período de 20 a 30 segundos, em seguida removeu-se o reagente com algodão e álcool; esse reagente é indicado para revelação de textura da variação de zinco e para tratamento do grão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

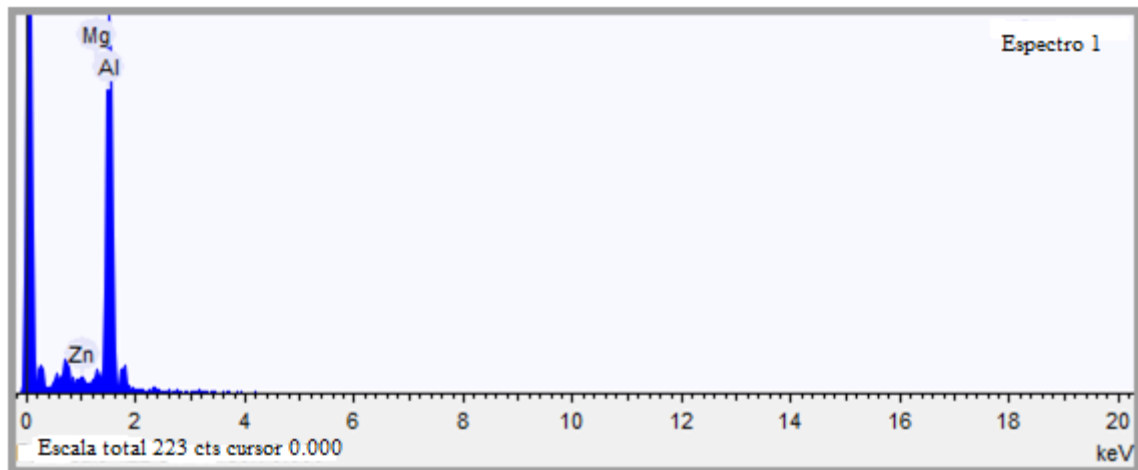
### 5.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA Al-Mg-Zn

De acordo com a análise realizada pelo EDS, confirma-se a presença dos componentes químicos na liga em questão de acordo com as Figuras 14; 16 e 18, as quais representam o espectrômetro realizado em diferentes amostras de composições distintas.

As respectivas proporções dos componentes químicos mencionados no estudo da liga em questão, podem ser confirmados a partir das Figuras 15; 17 e 19, as quais representam a composição química da liga.

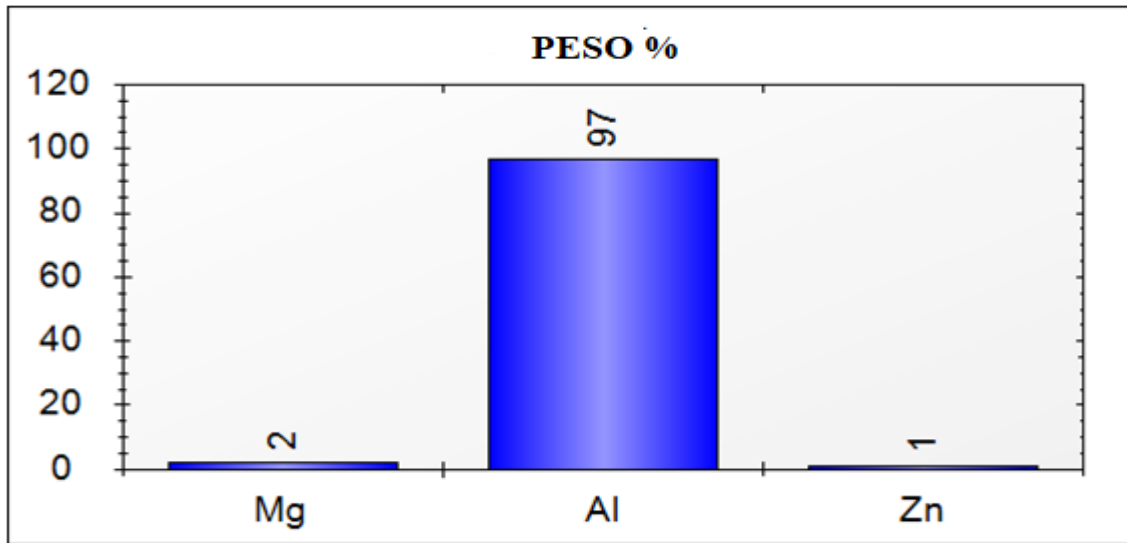
#### 5.1.1 Formulação da liga a 1% de Zn

**Figura 14** - Espectrômetro da liga Al-2%Mg-1%Zn



**Fonte:** Autor, 2018.

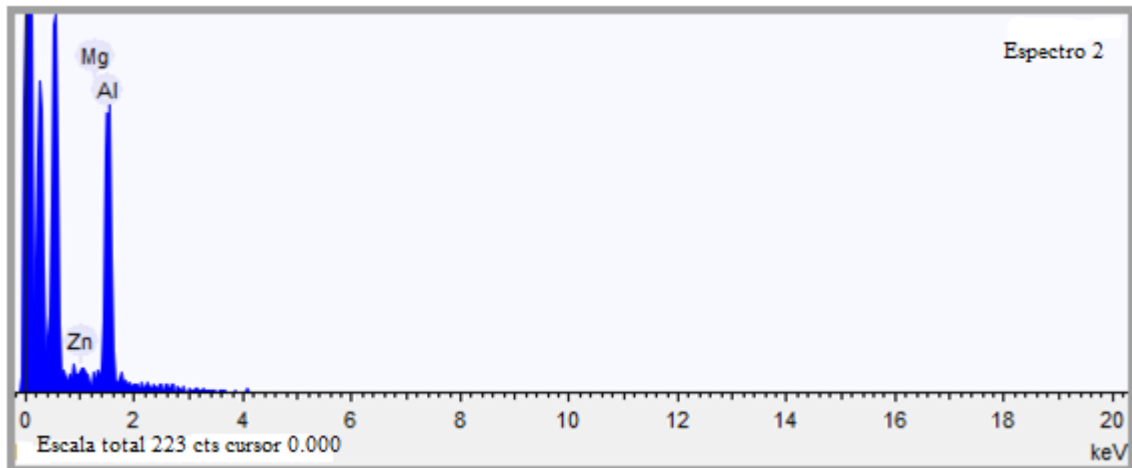
**Figura 15** - Composição química da liga Al-2%Mg-1%Zn analisada pro EDX



Fonte: Autor, 2018

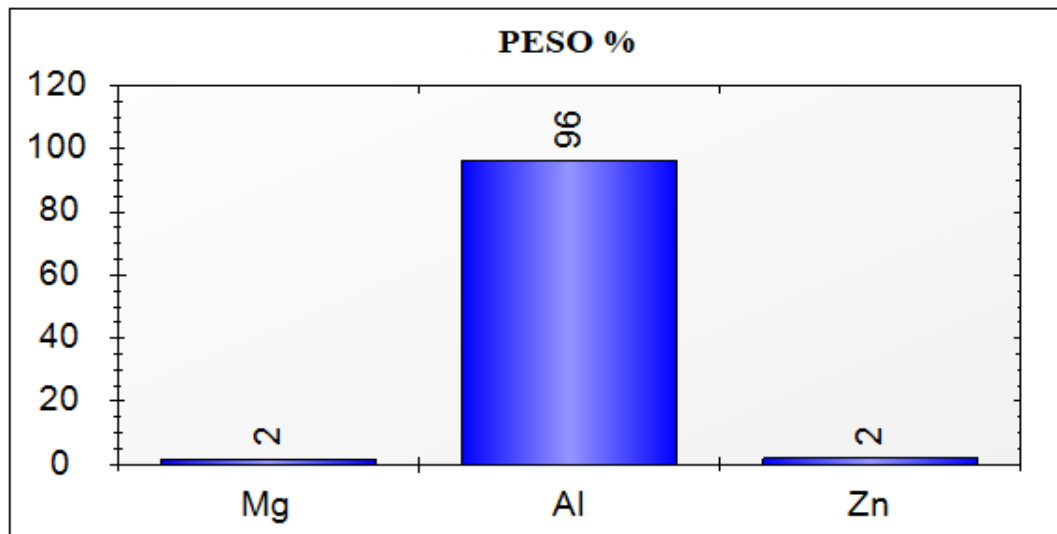
### 5.1.2 Formulação da liga a 2% de Zn

**Figura 16** - Espectrômetro da liga Al-2%Mg-2%Zn



Fonte: Autor, 2018.

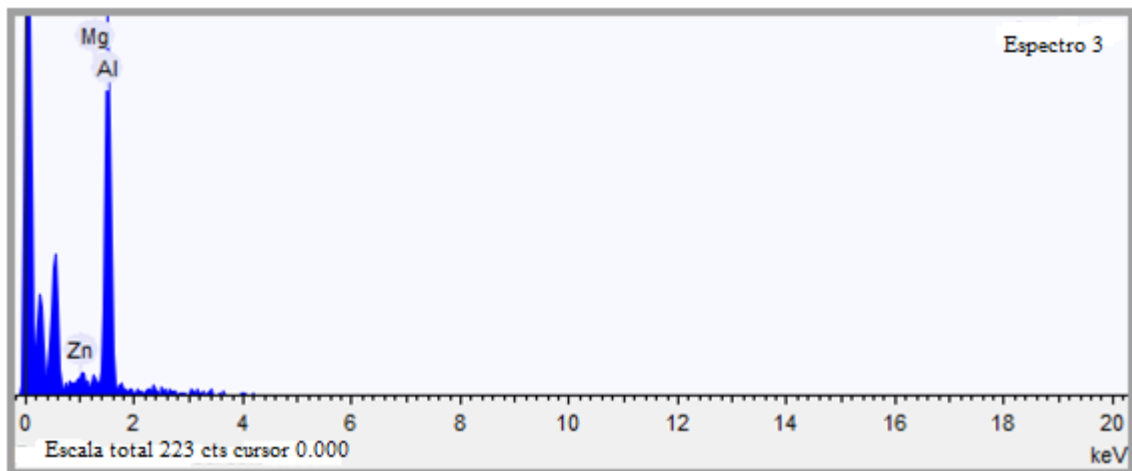
**Figura 17** - Composição química da liga Al-2%Mg-2%Zn analisada pro EDX



Fonte: Autor, 2018

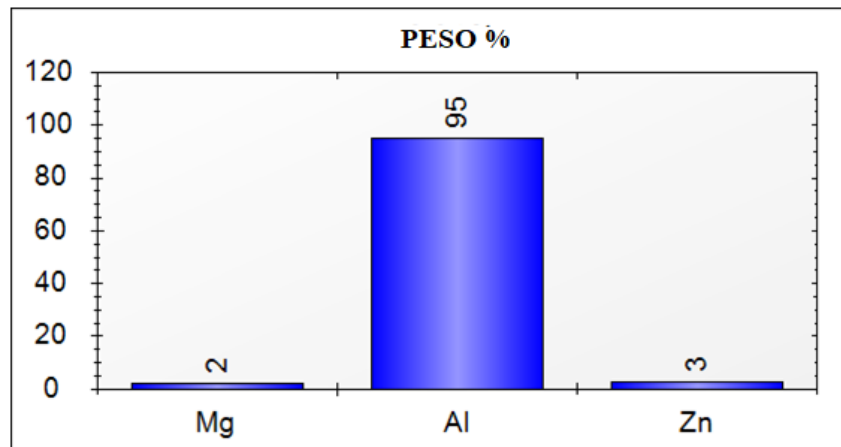
### 5.1.3 Formulação da liga a 3% de Zn

**Figura 18** - Espectrômetro da liga Al-2%Mg-3%Zn



Fonte: Autor, 2018.

**Figura 19** - Composição química da liga Al-2%Mg-3%Zn analisada pro EDX

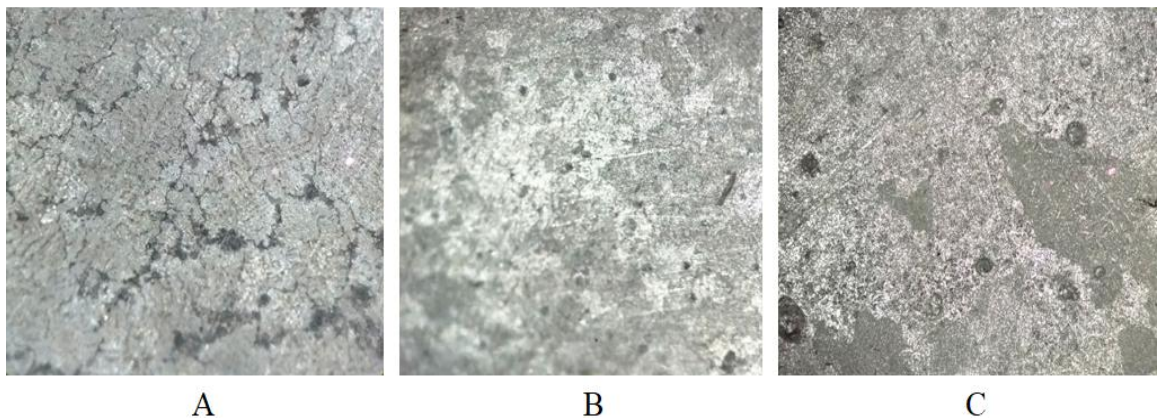


Fonte: Autor, 2018

## 5.2 MICROGRAFIA DAS LIGAS

### 5.2.3 Formulação processada sob pressão (100 MPa)

**Figura 20** - (a) Liga Al-2%Mg-1%Zn. (b) Liga Al-2%Mg-2%Zn. (a) Liga Al-2%Mg-3%Zn. Aumento de 50x.

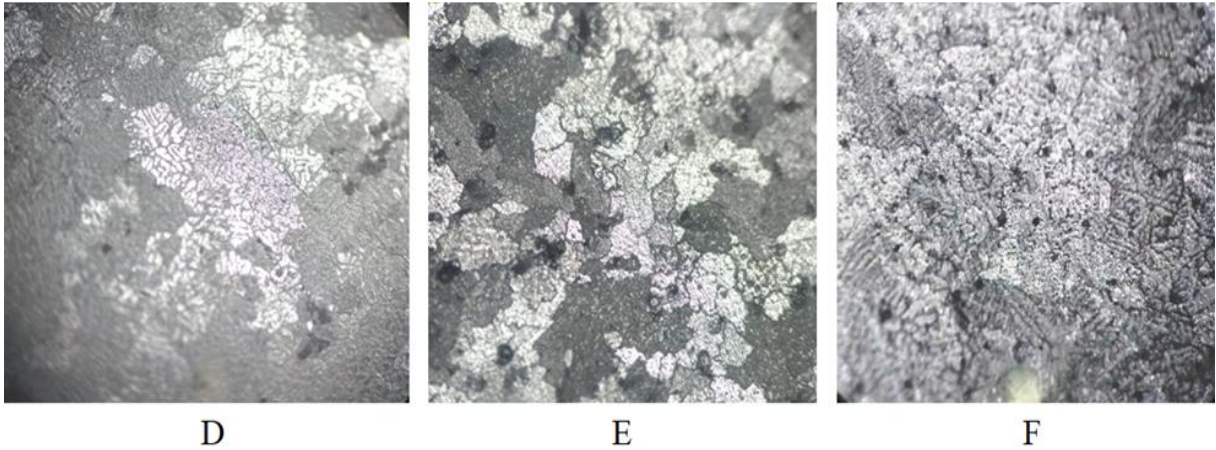


Fonte: Autor, 2018.

Identificou-se (Figura 20), desde a primeira composição sob pressão, a refino dos grãos, o qual torna-se mais evidente na Figura (c) que representa composição de 3% do Zn. No item (a) foi notado uma estrutura dendrítica não muito evidente, fato que não pode ser contatado nos demais itens (b) e (c). No item (a) também fica evidente a presença de microsegregação, representados pelas regiões pequenas, irregulares e escurecidas da Figura.

### 5.2.3 Formulação processada sem pressão

**Figura 21** - (d) Liga Al-2%Mg-1%Zn. (e) Liga Al-2%Mg-2%Zn. (f) Liga Al-2%Mg-3%Zn. Aumento de 50x.



Fonte: Autor, 2018.

As formulações em pressão apresentaram em suas microestruturas muitas evidências da presença das regiões dendríticas, as quais localizam-se preferencialmente na região do grão; o tamanho médio do grão identificado foi mais elevado em relação a formulação produzida sob pressão, contudo, a medida em que vai aumentando a composição de zinco ao composto, o tamanho médio de grão vai sendo reduzido, isso fica evidente na Figura 21.(F) que representa a maior composição de zinco.

A Figura 2, faz uma representação das características morfológicas da forma que as dendritas se apresentam, comparando com a Figura 21.(E), pode-se identificar a presença de pontos escurecidos, espalhados por toda a microestrutura, uma evidência, possivelmente de microsegregações, que são defeitos ocorridos a partir da contração desenvolvida nas regiões de espaçamento dendrítico.[20]

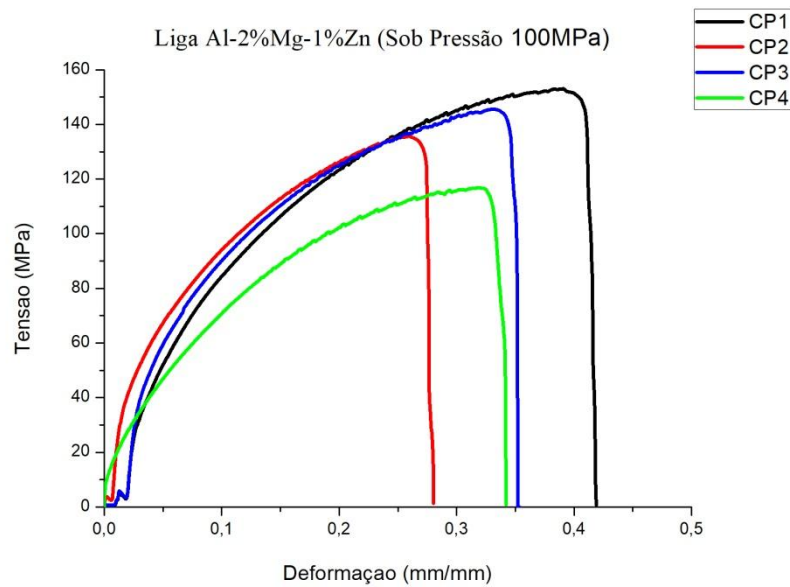
## 5.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

### 5.3.1 Dados da liga (al-mg-zn) processada sob pressão

As Figuras 22; 23 e 24 representam o comportamento de resistência à tração da formulação com pressão. As curvas reunidas representam o comportamento de cada corpo de prova ensaiado, de acordo com suas respectivas composições da formulação em estudo.

As Tabelas 05; 06 e 07 representam a seleção dos melhores resultados obtidos, das formulações com 1%; 2% e 3% de Zn, respectivamente. Em seguida calculou-se a média das resistências à tração mais significativas. A partir do valor médio de resistência a tração obtido, selecionou-se às curvas CP 2 da Figura 22; CP 3 da Figura 23 e CP4 da Figura 24, como representante do comportamento tensão/deformação, para suas respectivas formulações.

**Figura 22** – Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão, com 1% de Zn).



**Fonte:** Autor, 2018

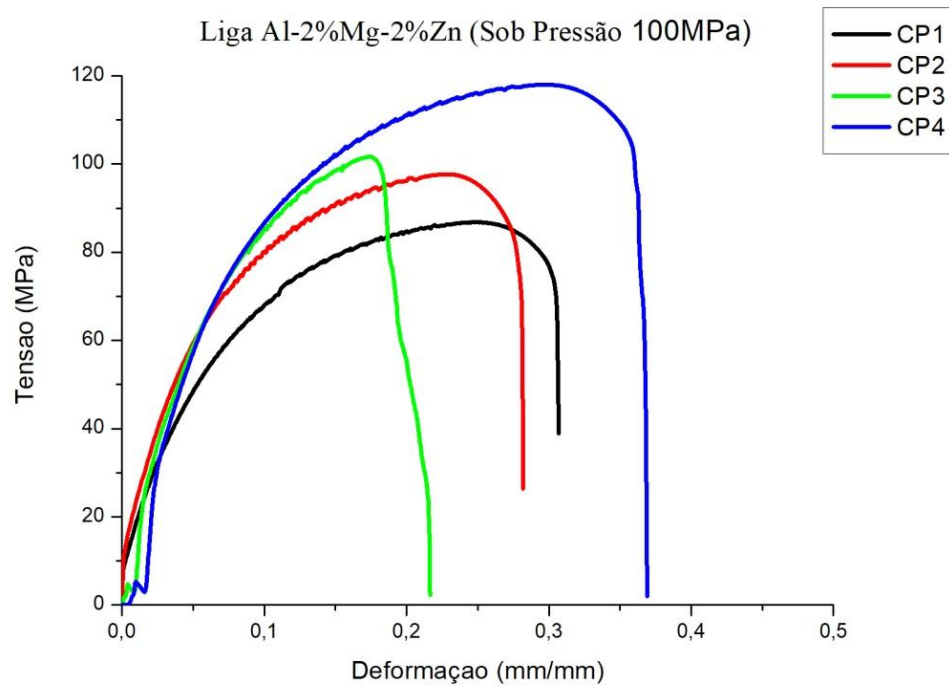
**Tabela 5** - Melhores resultados do ensaio de tração (sob pressão, com 1% de Zn).

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	MÉDIA
Limite de Resistência a Tração (MPa)	153.03	136.18	145.55	116.76	137.88
Deformação até a força máxima (%)	38.98	25.99	32.97	31.88	32.46

**Fonte:** Autor, 2018.



**Figura 23** - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão, com 2% de Zn).



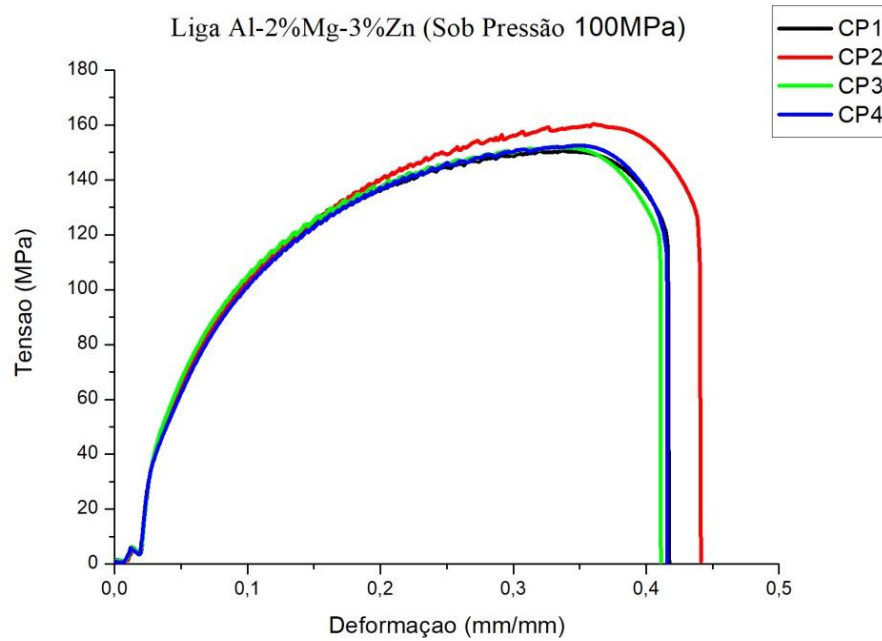
**Fonte:** Autor, 2018

**Tabela 6** - Melhores resultados do ensaio de tração (sob pressão, com 2% de Zn).

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	MÉDIA
Limite de Resistência a Tração	86.80	97.67	101.63	117.98	101.02
Deformação até a força máxima (%)	24.74	22.55	17.38	28.58	23.31

**Fonte:** Autor, 2018

**Figura 24** - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão, com 3% de Zn).



**Fonte:** Autor, 2018

**Tabela 7** - Melhores resultados do ensaio de tração (sob pressão, com 3% de Zn).

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	MÉDIA
Limite de Resistência a Tração (MPa)	150.64	160.26	152.15	152.53	153.99
Deformação até a força máxima (%)	33.753	36.00	33.04	34.95	34.43

**Fonte:** Autor, 2018

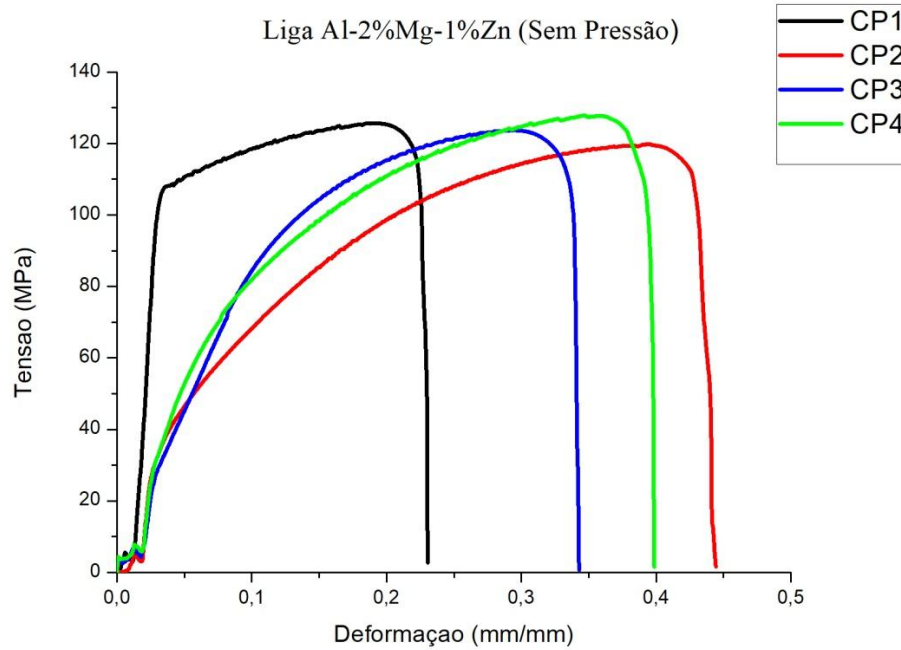
### 5.3.2 Dados da liga (Al-Mg-Zn) processada sem pressão

As Figuras 25; 26 e 27 representam o comportamento de resistência à tração da formulação sem pressão. As curvas reunidas representam o comportamento de cada corpo de prova ensaiado, de acordo com suas respectivas composições, da formulação em questão.

As Tabelas 08; 09 e 10 representam a seleção dos melhores resultados obtidos, das formulações com 1%; 2% e 3% de Zn, respectivamente. Em seguida calculou-se a média das resistências à tração mais significativas. A partir do valor médio de resistência a tração obtido,

selecionou-se as curvas CP 3 da Figura 25; CP 3 da Figura 26 e CP4 da Figura 27, como representante do comportamento tensão/deformação, para suas respectivas formulações.

**Figura 25** - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão, com 1% de Zn).



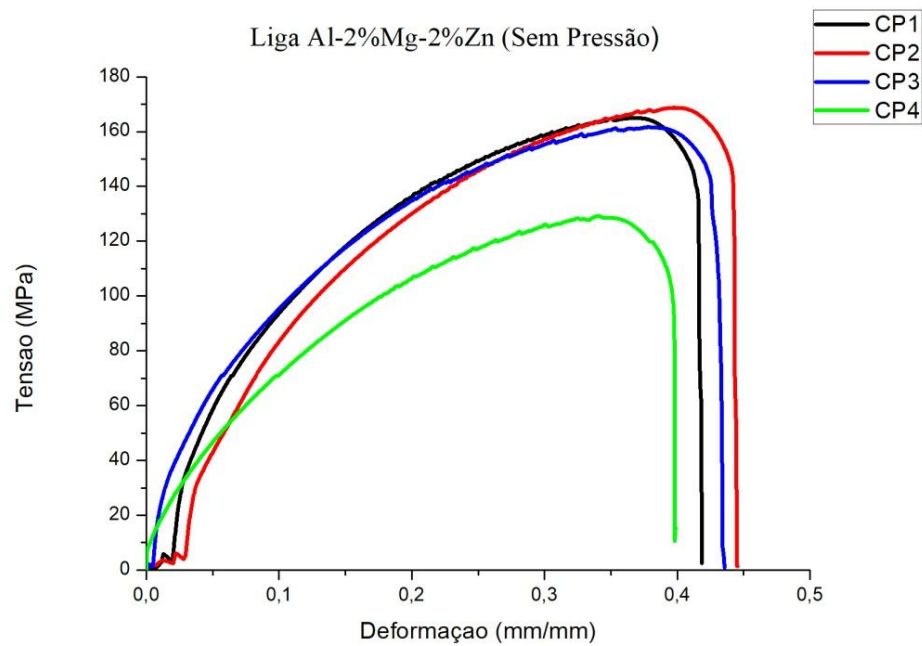
**Fonte:** Autor, 2018.

**Tabela 8** - Melhores resultados do ensaio de tração (sem pressão, com 1% de Zn).

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	MÉDIA
Limite de Resistência a Tração (MPa)	125.68	119.84	123.67	127.85	124.26
Deformação até a força máxima (%)	18.60	39.46	29.18	34.69	30.48

**Fonte:** Autor, 2018

**Figura 26** - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão, com 2% de Zn).



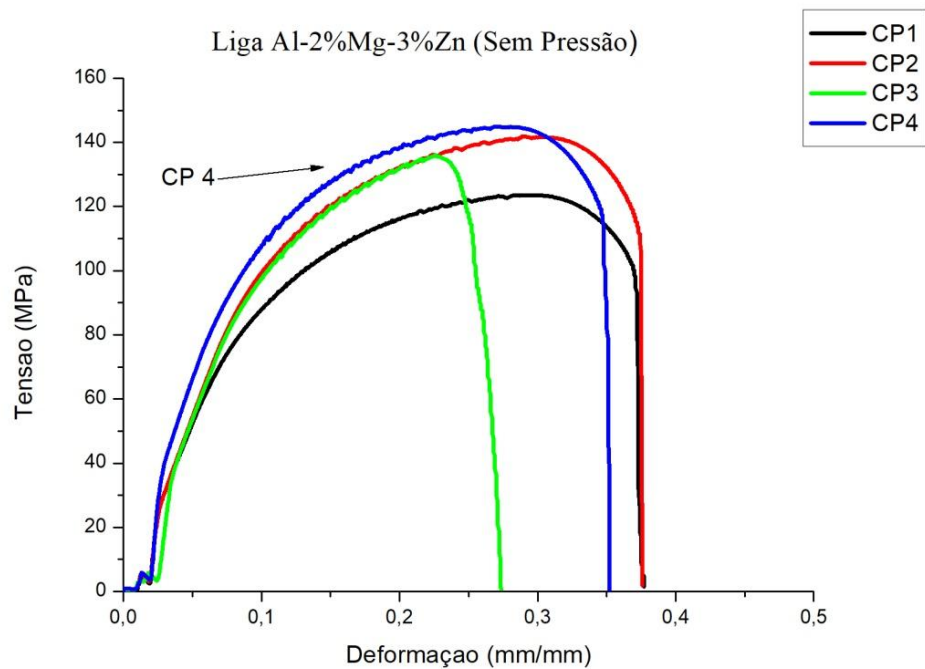
**Fonte:** Autor, 2018

**Tabela 9** - Melhores resultados do ensaio de tração (sem pressão, com 2% de Zn).

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	MÉDIA
Limite de Resistência a Tração (MPa)	165.04	168.75	161.55	129.11	156.11
Deformação até a força máxima (%)	36.54	39.72	37.76	34.01	37.01

**Fonte:** Autor, 2018

**Figura 27** - Representação da resistência à tração da formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão, com 3% de Zn).



**Fonte:** Autor, 2018

**Tabela 10** - Melhores resultados do ensaio de tração (sem pressão, com 3% de Zn).

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	MÉDIA
Limite de Resistência a Tração (MPa)	123.58	142.03	136.06	144.92	136.65
Deformação até a força máxima (%)	28.31	28.86	22.64	27.02	26.71

**Fonte:** Autor, 2018

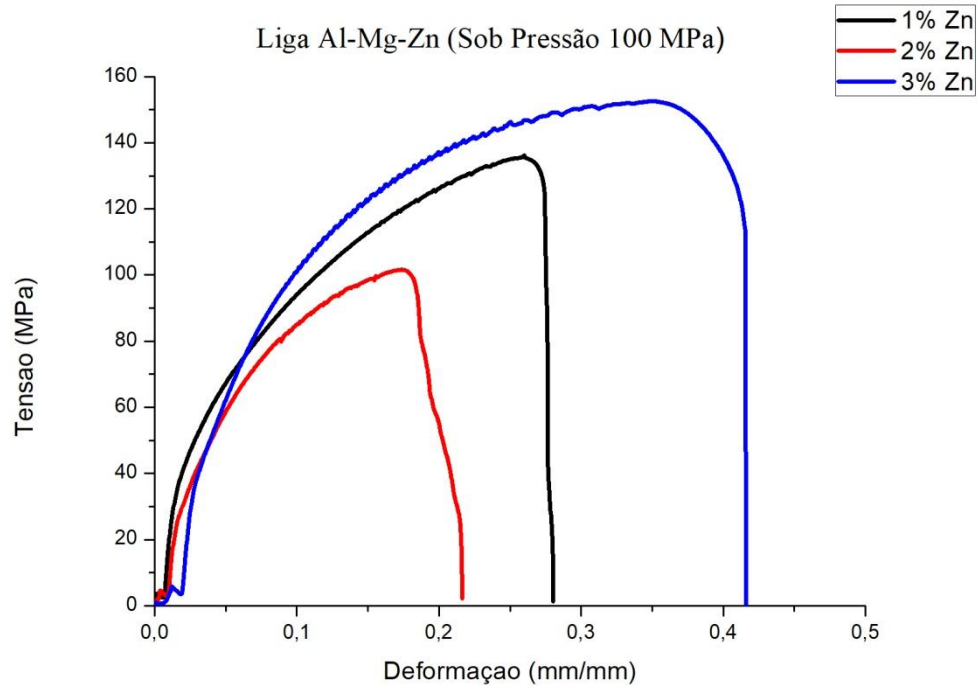
### 5.3.3 Representação dos melhores resultados de cada formulação (sob pressão) da liga (Al-Mg-Zn)

A Figura 28 representa o comportamento médio de resistência à tração das formulações, processada sob pressão.

A Tabela 11 representa a seleção dos melhores resultados obtidos da composição de cada formulação, variando de (1%; 2% e 3% de Zn). Em seguida calculou-se a média das resistências à tração mais significativas, para cada composição representativa. A partir do

valor médio de resistência à tração entre as composições de cada formulação, obteve-se o valor representativo da resistividade da liga processada sob pressão.

**Figura 28** - Curvas representativas da resistência média à tração da liga Al-Mg-Zn (sob pressão; variando com 1%; 2% e 3% de Zn).



**Fonte:** Autor, 2018

**Tabela 11** - Maior resistência à tração mensurada, para formulação da liga Al-Mg-Zn (sob pressão).

Al-Mg-Zn	CP 2 (1% Zn)	CP 3 (2% Zn)	CP 4 (3% Zn)	Média
Limite de Resistência a Tração (MPa)	136.18	101.63	152,53	130.13
Deformação até a força máxima (%)	25.99	17.38	34.96	26,11

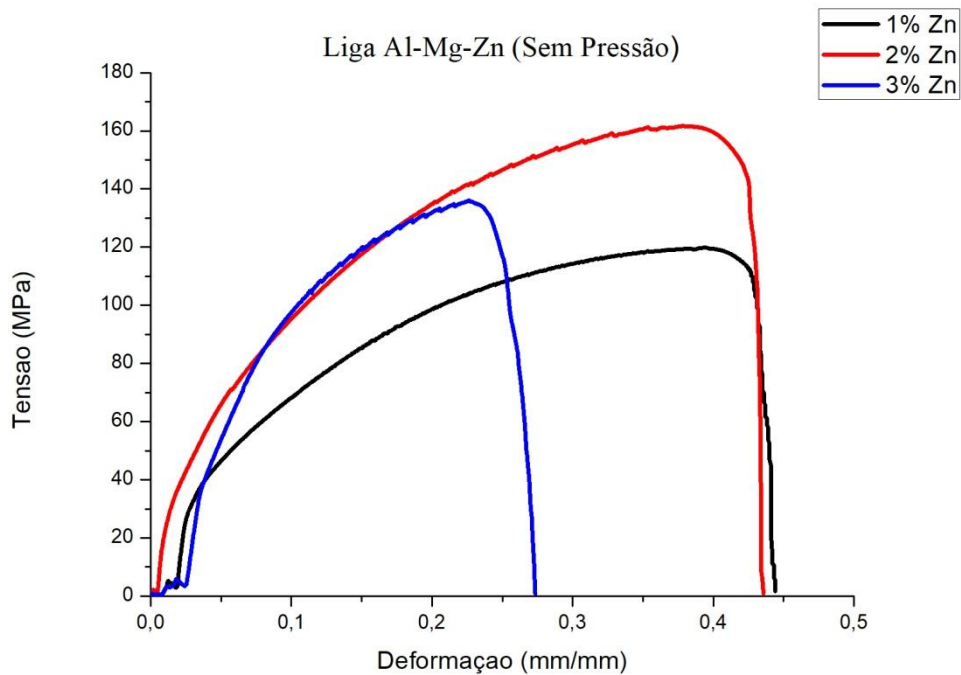
**Fonte:** Autor, 2018

### 5.3.4 Representação dos melhores resultados de cada formulação (sem pressão) da liga (Al-Mg-Zn)

A Figura 29 representa o comportamento médio de resistência à tração das formulações, processada sem pressão.

A Tabela 12 representa a seleção dos melhores resultados obtidos da composição de cada formulação, variando de (1%; 2% e 3% de Zn). Em seguida calculou-se a média das resistências à tração mais significativas, para cada composição representativa. A partir do valor médio de resistência à tração entre as composições de cada formulação, obteve-se o valor representativo da resistividade da liga processada sem pressão.

**Figura 29** - Curvas representativas da resistência média à tração da liga Al-Mg-Zn (sem pressão; variando com 1%; 2% e 3% de Zn).



**Fonte:** Autor, 2018.

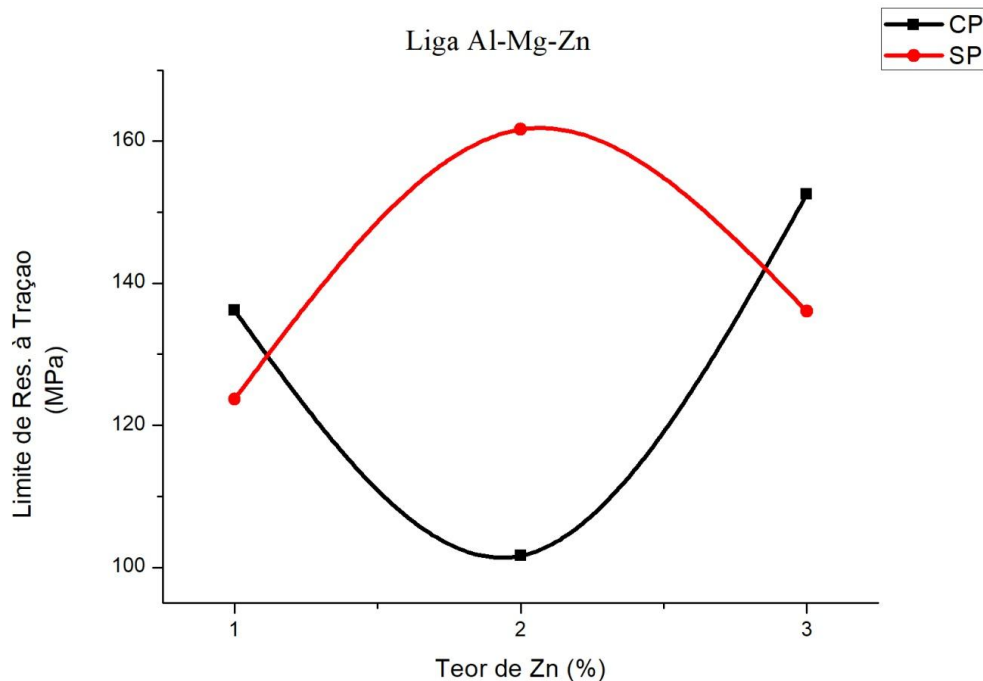
**Tabela 12** - Maior resistência à tração mensurada, para formulação da liga Al-Mg-Zn (sem pressão).

Al-Mg-Zn	CP 3 (1% Zn)	CP 3 (2% Zn)	CP 3 (3% Zn)	Média
Limite de Resistência a Tração (MPa)	123.67	161.55	136.06	140.46
Deformação até a força máxima (%)	29.18	37.76	22.64	29.86

**Fonte:** Autor, 2018

### 5.3.5 Efeito da variação de zinco entre as formulações

**Figura 30** - Correlação entre as melhores resistências das composições das formulações com pressão (CP) e sem pressão (SP).



**Fonte:** Autor, 2018.

### 5.3.6 Dados da liga (Al-Mg-Zn)

A liga Al-2%Mg-Zn (variando a composição de Zn em 1%; 2% e 3%), processada por “squeeze casting” sem pressão, apresentou maior resistência à tração, com média de 140,46 MPa, comparado com a mesma formulação processada sob, a qual apresentou a média de 130, 113 MPa. O resultado de porcentagem de deformação para a formulação sem pressão, também foi maior, comparado ao processado com pressão.

A exceção observada na liga Al-2%Mg-3%Zn processada sob pressão, foi que esta apresentou o resultado de resistência à tração maior do que a mesma liga, processada sem pressão. De acordo com a Figura 28, CP3 (sob pressão) apresenta 152,53 Mpa, enquanto que na Figura 29, CP3(sem pressão) apresenta 136,06 MPa).

Na Figura 30 percebe-se a incidência da variação de resistência à tração, mediante a variação da composição de Zinco. Segundo (VILAR, 2015) para a liga Al-Zn, a pressão exercida reduz as ramificações dendríticas, fato que colabora para sua menor resistência mecânica.



O comportamento discrepante da resistência à tração nas ligas de 2% de Zn processada sem pressão, segundo as análises micrográficas está relacionado ao refino de grãos e às regiões dendríticas (assim como suas ramificações) perceptíveis na liga processada sem pressão.

#### 5.4 ANÁLISE DA FRATURA

**Figura 31** - Característica da fratura tipo de fratura observada no corpo de prova.



**Fonte:** Autor, 2018.

Na fratura observada nas Figuras 31, observa-se o contorno superficial característico o qual é denominado fratura taça e cone, já que uma das superfícies apresenta-se sob a forma de uma taça, enquanto que a outra lembra um cone de acordo com a Figura 5.(a); dessa forma diferenciando-se da Figura 5.(b), a qual caracteriza fratura frágil.

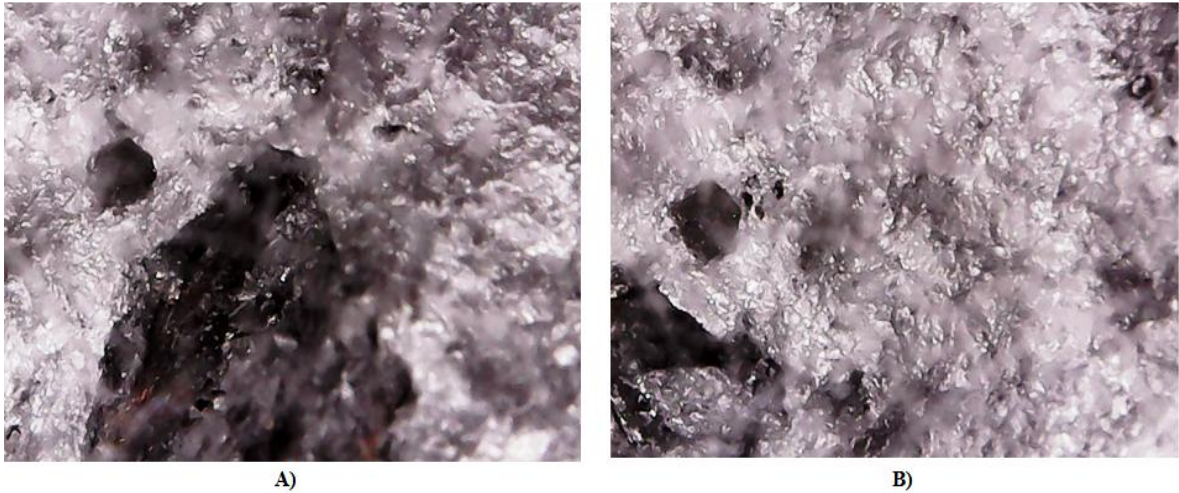
##### 5.4.2 Fractografias - liga processada sob pressão

É possível identificar nas Figuras 32, 33 e 34 o aspecto de brilho opaco.

Observa-se nas Figuras 32 e 33, grande incidência de microporos concentradores de tensão; nas regiões mais escuras nota-se poucas evidências de microsegregação.

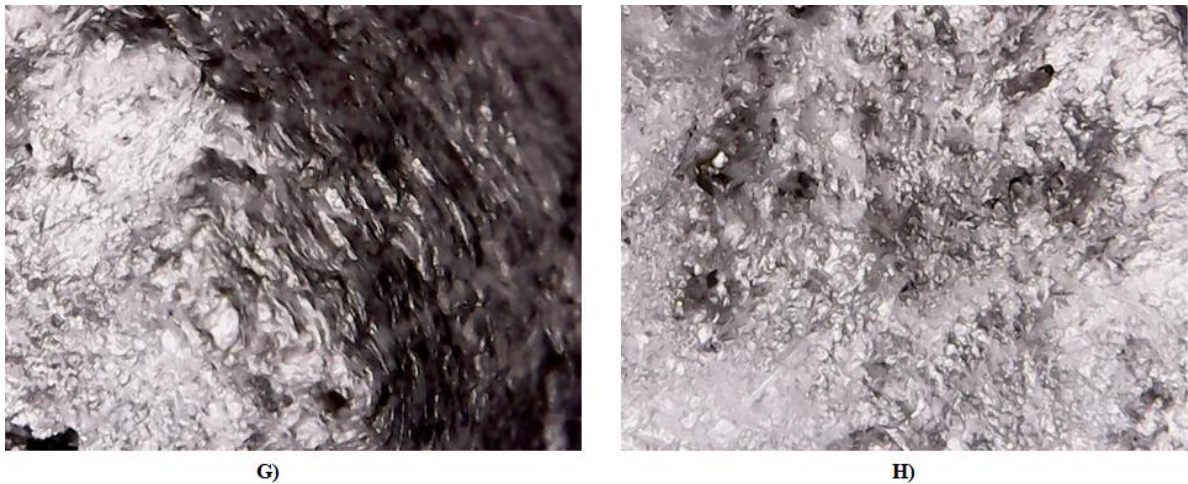
Na Figura 34, nota-se a presença de pequenas regiões de microsegregação, microtrincas, contudo não é evidente a incidência de microporos como observado nas Figuras 32 e 33.

**Figura 32** - Fractografia da formulação Al-2%Mg-1%Zn, processado sob pressão (100 MPa), aumento de 100x.



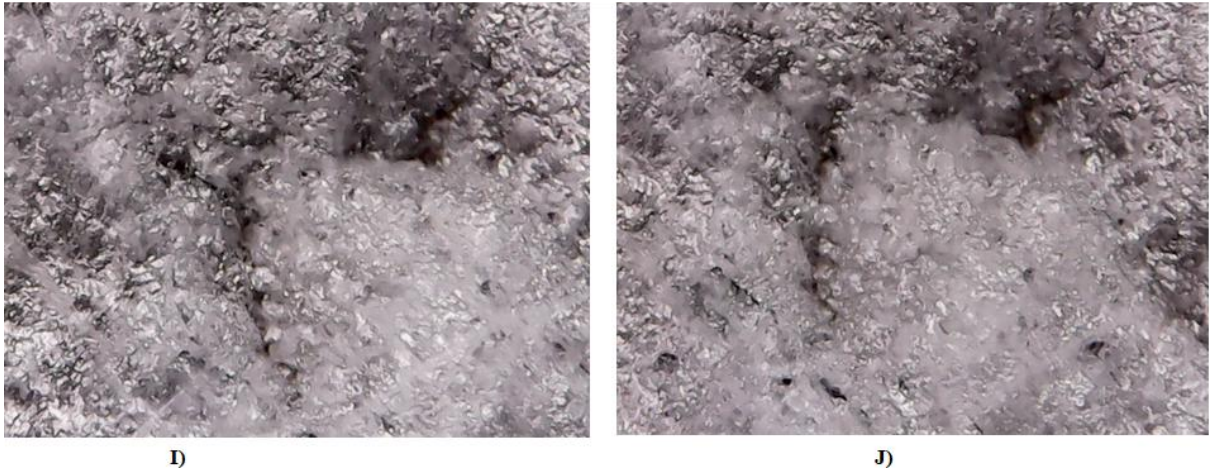
**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 33** - Fractografia da formulação Al-2%Mg-2%Zn, processado sob pressão (100 MPa), aumento de 100x.



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 34** - Fractografia da formulação Al-2%Mg-3%Zn, processado sob pressão (100 MPa), aumento de 100X



**Fonte:** Autor, 2018.

A identificação de microporos espalhados pela região de fratura da liga, nas composições de 1% e 2% de Zn nas formulações, pode ter favorecido a fragilidade dessas formulações mediante ensaio mecânico.

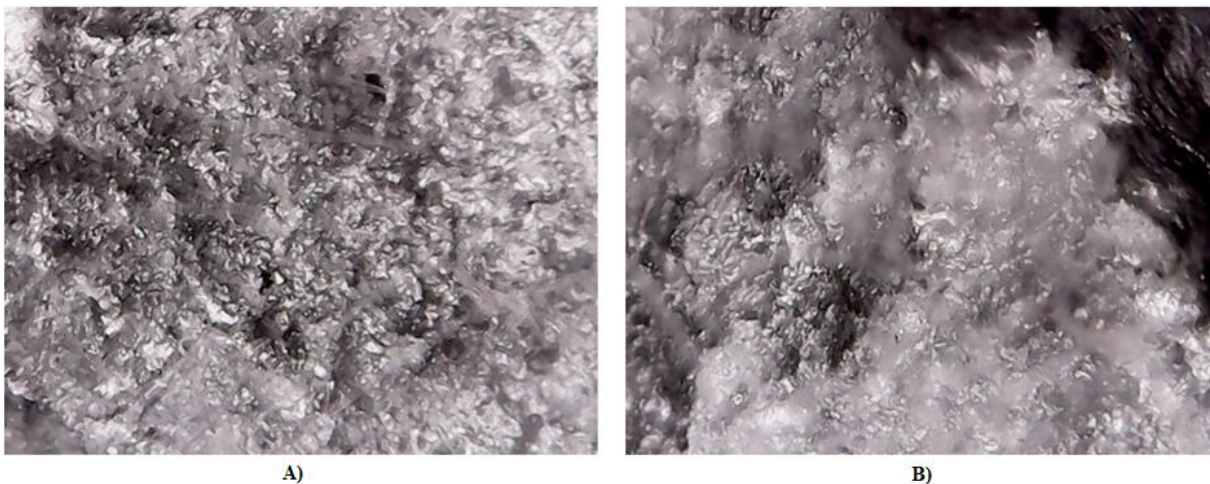
#### **5.4.3 Fractografias - liga processada sem pressão**

É possível identificar na Figura 35, 36 e 37 o aspecto de brilho opaco.

Observa-se nas Figuras 35 e 36, incidência de microsegregações nas regiões mais escuras e grãos grosseiros.

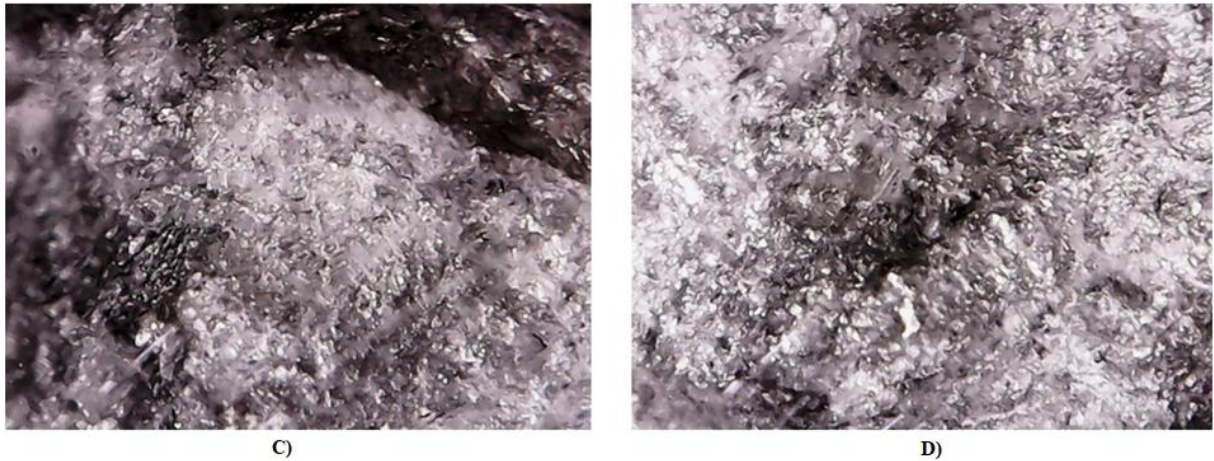
Na Figura 37, notou-se a presença de pequenas regiões de microtrincas e refinamento dos grãos.

**Figura 35** - Fractografia da formulação Al-2%Mg-1%Zn, processado sem pressão, aumento de 100x



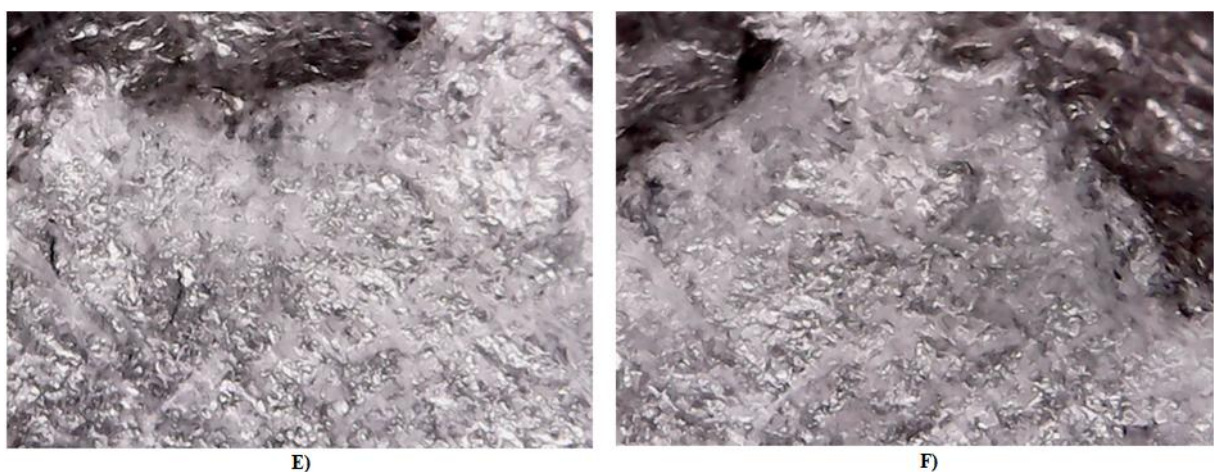
**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 36** - Fractografia da formulação Al-2%Mg-2%Zn, processado sem pressão, aumento de 100x



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 37** - Fractografia da formulação Al-2%Mg-3%Zn, processado sem pressão, aumento de 100x



**Fonte:** Autor, 2018.

A menor incidência de microporosidade na composição contendo 3% de Zn favorece sua resistência mecânica.

Não foi identificado grande incidência de microporos na composição de 1% e 2% de Zn (Figura 35 e 36), contudo, a presença de microsegregação é evidente. Foi observado a presença de grãos grosseiros na composição de 1% de Zn, enquanto que na composição de 2% eles apresentaram menor tamanho médio.

Foi identificado na Figura 37, incidência de microtrincas na composição de 3% de Zn, assim como o melhor refino de grão, comparado com as Figuras 32 e 33. Então, observa-se o efeito refinador de grão, realizado a partir da adição de Zn.

## 6 CONCLUSÃO

### 6.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Segundo os resultados da análise da composição química, realizada pelo método de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), confirma-se a composição química sugerida para as ligas Al-2%Mg-1%Zn; Al-2%Mg-2%Zn; Al-2%Mg-3%Zn, sugeridas no escopo do trabalho como foco da análise.

### 6.2 ANÁLISE DA MICROGRAFIA DA LIGA Al-Mg-Zn (SOB PRESSÃO)

O tamanho médio dos grãos desde a composição com menor teor de zinco, apresentou-se pouco evidente, no entanto, foram se refinando a medida que a composição de zinco foi sendo elevada.

O refino dos grãos observado na liga Al-2%Mg-3%Zn, favoreceu o aumento resistência à tração da formulação.

A ação da pressão refletiu na microestrutura sob a forma de grãos melhor refinados, em comparação com os resultados da composição sem pressão, efetivando assim a redução da porosidade residual.

A refinação dos grãos, na formulação sob pressão, não favoreceu a visualização das dentritas.

### 6.3 ANÁLISE DA MICROGRAFIA DA LIGA AL-MG-ZN (SEM PRESSÃO)

À medida que se aumentou o teor do elemento zinco à composição, o refinamento dos grãos foi tornando-se mais evidente.

A formulação de Al-2%Mg-2%Zn, apresentou desenvolvimento de tamanho médio dos grãos, o que sugere uma boa combinação entre resistência a tração e ductilidade.

Houve a identificação estruturas dendríticas, nas microestruturas das três composições, evidenciando melhora da resistência mecânica e da deformação atribuída à liga.

Observou-se a existência de microsegregações evidentes na composição contendo 2% de Zn, com menor incidência na composição de 3% de Zn.

### 6.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg-Zn

A pressão de 100 MPa aplicada para processamento das ligas Al-2%Mg-1%Zn e Al-2%Mg-2%Zn, não obteve o melhora na resistência mecânica, contudo para a liga Al-2%Mg-3%Zn, essa melhora foi significativa, em comparação com os resultados da mesma composição da liga processada sem pressão.

Nota-se que o aumento da composição de Zn, acima do Mg, apresenta a melhora na formulação processada sob pressão, observado na Liga Al-2%Mg-%3Zn, o qual apresentou uma queda de resistência quando processada sem pressão

A média das resistências à tração das formulações processadas sem pressão, superaram os valores atingidos por aquelas que foram processadas por pressão e 100 MPa.

A partir dos teores de 1% e 3%, a formulação processada sob pressão apresenta resistência à tração maior, contudo para o teor de 2% Zn, a formulação processada sem pressão se destaca com melhor resistência.

#### 6.5 ANÁLISE DA FRACTOGRAFIA DA LIGA AL-MG-ZN

Devido à região da superfície da fratura caracterizar-se como irregular e fibrosa, admite-se esse fator como indicativo de deformação plástica, como fratura predominantemente dúctil.

A identificação de microporos espalhados pela região de fratura da liga, nas composições de 1% e 2% de Zn nas formulações, pode ter favorecido a fragilidade dessas formulações mediante ensaio mecânico.

A menor incidência de microporosidade na formulação contendo 3% de Zn, favorece resistência à tração.

### **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar a resistência a tenacidade da liga Al-Mg-Zn, mediante variação da composição do Zn;
- Estudar a influência da pressão no crescimento dendrítico da liga Al-Mg-Zn;
- Estudar a influência do endurecimento por precipitação na resistência mecânica da liga; Al-Mg-Zn;
- Estudar as zonas de solidificação da liga Al-2%Mg-Zn, variando a composição de Zn entre 1% a 2%.



## 7 REFERÊNCIAS

- [1] BAZZO, Walter Antônio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale (Autor). Introdução à engenharia: conceitos, ferramentas e comportamentos. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2009. 270 p.
- [2] HU, H., *Squeeze Casting of Magnesium Alloys and their Composites*, J. Mater. Sci. 33, pp. 1579-1589, 1998.
- [3] DORCIC, J. L. and VERMA, S. K., *Squeeze Casting*, IN.: American Society for Metals:
- [4] Rohatgi, P., *Cast Metal-Matrix Composites – squeeze casting*, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, “Casting”, 9<sup>a</sup> edition, pp. 845-847, 1988.
- [5] FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ltda., 5. Ed., V. 1 e 2, 1997, 603;608 p.;
- [6] ALUMÍNIO E SUAS LIGAS, Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aluminio%5B1%5D.pdf>>; Acessado em: 11/03/2018
- [7] MULLER, Arno. Solidificação e Análise dos Metais. Editora da UFRGS, Porto Alegre, RS.2002.
- [8] *SQUEEZE CASTING*, Disponível em: <<http://www.themetalcasting.com/squeeze-casting.html>> Acessado em 11/03/2018
- [9] ASKELAND, Donald R ; WELRIGHT, Wendelin J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3.Ed.
- [10] DIAGRAMA TERNÁRIO Al-Mg-Zn, Disponível em: <<http://111.207.167.154/index.php?doc-view-109617.html>>; Acessado em 22/03/2018
- [11] CALLISTER, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.
- [12] GARCIA, Amauri. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Campinas: UNICAMP-Universidade Estadual de Campinas, 2001. 305 p.
- [13] SHACKELFORD, James F. Ciência dos materiais. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008
- [14] DEFEITOS DE SOLIDIFICAÇÃO, Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao](https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao)>; Acessado em: 14/03/2018
- [15] COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicas Comuns** – 4 ed. Editora Blucher, 2008.

- [16] MAGALHÃES, F. D. *Influência do Processo Squeeze Casting na Formação Macro e Microestrutural, e nas Propriedades Mecânicas da Liga Al-Cu.4.*
- [17] GHOMASHCHI MR and VIKHROV A. *Squeeze casting: an overview*. J Mater Process Technology 2000; 101:1–9. ASM Handbook, vol 15, “Casting”, 9<sup>a</sup> edition, pp. 323-327, 1988.
- [18] MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos Materiais – Uma Introdução**. Rio de Janeiro. Editora e-papers, 2002.
- [19] ESPECTROSCOPIA DE RAIO X, Disponível em: <<https://www.tescan.com/br/technology/detectors/x-ray-spectrometry>>; Acessado em: 11/03/2018
- [20] BERTOLINI, L. *Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção*. Leda. M.M.D. Beck (tradução). São Paulo: Oficina de textos, 2010, 271p.
- [21] VILAR, D. S.; *Influência de parâmetros operacionais na microestrutura e propriedades mecânicas de ligas diluídas do sistema Al-Zn solidificadas através do processo “Squeeze Casting”*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.