



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
*CAMPUS* UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JULIANA DA MASCENA ARAUJO

**ESTUDO COMPARATIVO DAS LIGAS DE Al-2%Si OBTIDAS PELOS MÉTODOS  
TRADICIONAL E PÓ DE SILÍCIO, TRATADAS TERMICAMENTE E  
ANALISADAS POR ENSAIOS ELÉTRICOS E MECÂNICOS**

ANANINDEUA

2025

JULIANA DA MASCENA ARAUJO

**ESTUDO COMPARATIVO DAS LIGAS DE Al-2%Si OBTIDAS PELOS MÉTODOS  
TRADICIONAL E PÓ DE SILÍCIO, TRATADAS TERMICAMENTE E  
ANALISADAS POR ENSAIOS ELÉTRICOS E MECÂNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres.

ANANINDEUA

2025

JULIANA DA MASCENA ARAUJO


**ESTUDO COMPARATIVO DAS LIGAS DE Al-2%Si OBTIDAS PELOS MÉTODOS  
TRADICIONAL E PÓ DE SILÍCIO, TRATADAS TERMICAMENTE E  
ANALISADAS POR ENSAIOS ELÉTRICOS E MECÂNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.  
Orientador: Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres.


Data de aprovação: 19/12/2025  
Conceito: EXCELENTE

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **DEIBSON SILVA DA COSTA**  
Data: 29/01/2026 10:13:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
(FEMat - CANAN - UFPA - Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **EMERSON RODRIGUES PRAZERES**  
Data: 29/01/2026 12:52:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres  
(SEDUC/PA - ITEC - UFPA - Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **PEDRO PAULO GUIMARAES RIBEIRO**  
Data: 29/01/2026 14:07:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro  
(FEMat - CANAN - UFPA - Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente  
 **LUANE LUIZA PEREIRA MARQUES**  
Data: 29/01/2026 14:28:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Ma. Luane Luiza Pereira Marques  
(PPGEM - ITEC - UFPA - Examinadora Externa)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

A658e Araujo, Juliana da Mascena.  
Estudo comparativo das ligas de Al-2%Si obtidas pelos métodos tradicional e pó de silício, tratadas termicamente e analisadas por ensaios elétricos e mecânicos / Juliana da Mascena Araujo. — 2025.  
61 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
Coorientador(a): Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres  
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,  
Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de  
Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Alumínio. 2. Silício. 3. Ensaios. 4. Tratamento térmico.  
I. Título.

CDD 620.110287

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser o autor da minha vida e por nunca ter me abandonado nos momentos mais decisivos e agradeço a Nossa Senhora das Graças pela graça alcançada e pelo imenso amparo.

Aos meus avós Tereza e Basílio por me ensinarem desde cedo a importância da educação e por todo amparo e cuidado comigo desde a infância.

Aos meus pais Marli e Cláudio e meus irmãos Jailson, Cláudia e Matheus por serem os meus maiores incentivadores nessa caminhada e pelo incentivo diário.

Ao meu namorado Rodrigo Marinho por toda paciência, companheirismo e amor oferecido antes e durante a finalização desse trabalho.

As minhas amigas Ana Paula, Eloany e Tatiane por dividirem boas risadas e ombro amigo nesses anos de FEMat.

Ao professor Dr. Samuel do Rosário pelo incentivo, desde o período do ensino médio, para ingressar na área de exatas, em especial no curso de engenharia.

Aos meus colegas de trabalho Maciel, Emerson e Rogério Braga pela motivação e incentivo na conclusão deste curso.

Aos meus orientadores Professor Dr. Deibson Silva da Costa, primeiramente por não desistir do meu trabalho de conclusão, pela paciência, por toda motivação e conhecimento oferecidos nesses anos de curso. E, ao meu orientador Professor Dr. Emerson Rodrigues Prazeres, pelo conhecimento repassado e por todo suporte educacional e técnico.

*In memoriam* dos meus queridos  
avós, Tereza e Basilio Damasceno.

## RESUMO

O alumínio é um material extremamente versátil e muito utilizado no cotidiano, porém sozinho não apresenta resistência suficiente para a maioria das aplicações, por esse motivo, é necessário adicionar elementos de liga para aprimorar ou introduzir propriedades específicas: dureza, resistência a tração, ductilidade, entre outros. As ligas de alumínio são versáteis e muito utilizadas no meio industrial. Dentre as ligas de Al, destaca-se a liga alumínio-silício que por sua vez são bastante utilizadas no setor automobilístico e aeronáutico e representam mais de 50% da aplicação nas indústrias. Nesse sentido o objetivo do presente trabalho foi avaliar por meio das análises metalográficas, ensaios elétricos e ensaios mecânicos a influência da granulometria do silício ao ser inserido como elemento de liga no alumínio. O teor de silício utilizado foi de 2% e os métodos avaliados foram: manusear o silício em pequenos pedaços e aplicar o silício na forma de pó, com granulometria de 200 *mesh*. Além da diferença dos tamanhos do elemento ligante, a maneira como foram inseridos ao metal principal (alumínio), também foi distinto. No primeiro método denominado: Método Tradicional (MT), todos os constituintes da liga foram fundidos juntos e depois vazado. No segundo método, Método Adição Pó de Silício (MAPS) o alumínio foi fundido e posteriormente o silício peneirado foi inserido, homogeneizado e vazado no molde. Após a fabricação das ligas, realizou-se análises macroestruturais, ensaios de resistência elétrica, microdureza e tração com e sem tratamento térmico. A liga obtida com o MT (sem tratamento térmico), comparada as demais apresentou macrografia com grãos mais refinados, e dureza 48,52 HV. Para as ligas do MAPS (sem tratamento térmico) os resultados de limite de resistência a tração foi de 228,74 MPa e o percentual de deformação de aproximadamente 5%. Quanto às ligas tratadas (envelhecimento artificial), o MAPS apresentou maior condutividade elétrica (67,38% IACS) e redução no limite de resistência a tração (185,36 MPa). Os resultados segundo os métodos estudados não apresentaram valores discrepantes, exceto as ligas que sofreram tratamento térmico, sugerindo que qualquer método utilizado seria relevante, dependendo da aplicação da liga.

**Palavras-chaves:** Alumínio, Silício, Ensaios, Tratamento Térmico.

## ABSTRACT

Aluminum is an extremely versatile material that is widely used in everyday life, but on its own it does not have sufficient strength for most applications. For this reason, it is necessary to add alloying elements to improve or introduce specific properties: hardness, tensile strength, ductility, among others. Aluminum alloys are versatile and widely used in industry. Among the Al alloys, the aluminum-silicon alloy stands out, which in turn is widely used in the automotive and aeronautical sectors and represents more than 50% of industrial applications. In this sense, the objective of this study was to evaluate, through metallographic analyses and mechanical tests, the influence of silicon particle size when inserted as an alloying element in aluminum. The silicon content used was 2%, and the methods evaluated were: handling the silicon in small pieces and applying the silicon in powder form, with a particle size of 200 mesh. In addition to the difference in the sizes of the alloying element, the way in which they were added to the main metal (aluminum) was also different. In the first method, called the Traditional Method (TM), all the alloy constituents were melted together and then cast. In the second method, Silicon Powder Addition Method (MAPS), the aluminum was melted and then the sieved silicon was added, homogenized, and poured into the mold. After the alloys were manufactured, macrostructural analyses, electrical resistance, microhardness, and tensile strength tests were performed with and without heat treatment. The alloy obtained with MT (without heat treatment), compared to the others, presented a macrograph with more refined grains and a hardness of 48.52 HV. For the MAPS alloys (without heat treatment), the tensile strength limit results were 228.74 MPa and the deformation percentage was approximately 5%. As for the treated (annealed) alloys, MAPS showed higher electrical conductivity (67.38% IACS) and a reduction in tensile strength (185.36 MPa). The results according to the methods studied did not show discrepant values, except for the alloys that underwent heat treatment, suggesting that any method used would be relevant, depending on the application of the alloy.

**Keywords:** Aluminum, silicon, tests, heat treatment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Minério bauxita .....	17
Figura 2 – Fluxograma simplificado do processo de obtenção do alumínio pelo processo Baayer .....	18
Figura 3 – Gráfico da distribuição alumínio e silício na crosta terrestre .....	19
Figura 4 – Estrutura cristalina do alumínio .....	19
Figura 5 – Silício grau metalúrgico.....	23
Figura 6 – A influência do Si nas propriedades das ligas de Al. ....	24
Força de rendimento e resistência à tração final (MN/m <sup>2</sup> ).....	24
Figura 7 – diagrama de equilíbrio Al-Si.....	25
Figura 8 – Microestrutura das ligas Al-Si (a) hipoeutética com aumento de 150x, (b) eutética com aumento de 400x e (c) hipereutética com aumento de 150x.....	26
Figura 10 – Possíveis zonas macroestruturais de uma liga.....	29
Figura 11 – Transição colunar/equiaxial.....	30
Figura 12 – Efeito do encruamento nos metais.....	31
Figura 13 – Aparatos utilizados no processo (a) cadinho (b) espátula (c) molde.....	34
Figura 14 – Forno da marca Grefortec ®.....	35
Figura 15 – (a) Balança analítica, (b) pesagem do alumínio (c) pesagem do silício. ....	35
Figura 16 – Vazamento da liga Al- Si no molde coquilha.....	36
Figura 17 – Silício com granulometria de 200 <i>mesh</i> . ....	36
Figura 18 – Fluxograma do método adição silício em pó.....	37
Figura 19 – Amostra retirada para realizar macrografia e ensaio de microdureza .....	38
Figura 20 – Politriz utilizada para lixar e polir as peças.....	38
Figura 21 – Laminadores utilizados para laminação a frio.....	39
Figura 22 – Fios laminados para ensaio de resistência elétrica .....	40
Figura 23 – Microhmímetro MEGABRÁS modelo MPK – 2000.....	40
Figura 24 – (a) Amostras inseridas no molde de PVC, (b) amostras embutidas. ....	42
Figura 25 – (a) Microdurômetro modelo HV, (b) amostra ensaiada, (c) indentações realizadas nas amostras.....	42
Figura 26 – Máquina de ensaio de tração. ....	43
Figura 27 – Estufa NEVONI ® .....	44

Figura 28 – Macroestrutura Al- 2% Si (a) método tradicional; (b) método com silício na forma de pó.....	45
Figura 29 – Gráfico da condutividade elétrica das ligas de Al-2% Si.....	46
Figura 30 – Microdureza realizada nas amostras sem deformação plástica .....	47
Figura 31 – Microdureza realizada nos fios com deformação plástica.....	48
Figura 32 – LRT das ligas de Al-2%Si.....	49
Figura 33 – Curvas tensão vs deformação das ligas de Al-2% Si.....	50

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Séries e seus respectivos elementos de liga. ....	22
Tabela 2 – Dígitos correspondente a cada série e a forma como a liga foi adquirida .....	22

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Aluminum Association
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Corpo de Face Centrada
HC	Hexagonal Compacta
HV	Dureza Vickers
IACS	International Annealed Copper Standard
IAI	International Aluminium Institute
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
LRT	Limite de Resistência a Tração
MT	Método Tradicional
MAPS	Método Adição Pó de Silício
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PVC	Policloreto de Vinila
Si-GM	Silício Grau Metalúrgico
TT	Tratamento Térmico

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>14</b>
1.2.1	Objetivo geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Materiais metálicos.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Alumínio.....</b>	<b>16</b>
2.2.1	Características do alumínio.....	18
2.2.1.1	Estrutura cristalina.....	19
2.2.1.2	Condutividade elétrica.....	20
2.2.1.3	Resistência à corrosão.....	20
2.2.1.4	Resistência mecânica.....	20
2.2.2	Ligas de alumínio.....	21
2.2.3	Classificação das ligas de alumínio.....	21
<b>2.3</b>	<b>Silício.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Liga alumínio-silício.....</b>	<b>23</b>
2.4.1	Diagrama de equilíbrio Alumínio-Silício.....	25
2.4.2	Aplicações das ligas alumínio-silício.....	27
<b>2.5</b>	<b>Processos de fundição e solidificação.....</b>	<b>27</b>
2.5.1	Estruturas obtidas a partir da solidificação.....	29
<b>2.6</b>	<b>Endurecimento por solução sólida.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7</b>	<b>Conformação plástica dos metais.....</b>	<b>31</b>
<b>2.8</b>	<b>Tratamento térmico para as ligas de alumínio.....</b>	<b>32</b>
2.8.1	Envelhecimento artificial.....	32
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais utilizados no processo de fundição e/ou solidificação.....</b>	<b>34</b>

<b>3.2 Fundição .....</b>	<b>34</b>
3.2.1 Ligas obtidas pelo método tradicional (MT).....	35
3.2.2 Ligas obtidas pelo método adição pó de silício(MAPS) .....	36
<b>3.3 Corpos de prova .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4 Metalografia .....</b>	<b>38</b>
<b>3.5 Usinagem e laminação .....</b>	<b>39</b>
<b>3.6 Caracterização elétrica.....</b>	<b>39</b>
<b>3.7 Caracterização mecânica .....</b>	<b>41</b>
3.7.1 Ensaio de microdureza Vickers .....	41
3.7.2 Ensaio de tração.....	43
<b>3.8 Tratamento térmico.....</b>	<b>43</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Macroestrutura da liga.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2 Caracterização elétrica.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 Caracterização mecânica .....</b>	<b>47</b>
4.3.1 Ensaio de microdureza.....	47
4.3.2 Ensaio de tração.....	49
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1 Conclusões.....</b>	<b>52</b>
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente tem se tornado imprescindível a busca por novos métodos e melhoria na fabricação das ligas metálicas que possam oferecer excelentes propriedades de acordo com sua finalidade, para atuar na transmissão de energia elétrica, setor automobilístico, naval, entre outras aplicações.

De acordo com a Associação Brasileira de Alumínio – ABAL (2011) o alumínio é apresentado como um excelente material, pois tem sido um dos metais essenciais para a transmissão de energia elétrica, bem como na produção de peças no setor automobilístico, aeronáutico e objetos mais simples como utensílios domésticos. Devido sua baixa densidade e baixo ponto de fusão que o torna um excelente candidato na produção de ligas metálicas. É devido à relevância que este metal e suas ligas têm sido bastante requisitados no âmbito industrial.

O alumínio por si só não apresenta alta resistência mecânica, com isso, é necessário que se adicione elementos de liga de acordo com o tipo do material do projeto. Esses elementos de liga têm como finalidade aprimorar ou introduzir propriedades específicas ao material, sem comprometer ou ocultar as características intrínsecas que o metal já apresenta. Dentre vários tipos de elementos utilizados, tem-se o silício (Si) que fornece excelentes características à liga e contribui para o sucesso da liga Al-Si e outras ligas que possuem mais de um elemento de liga, além do Si (Bresciane Filho, 1997; Casanova, 2016).

A liga Al-Si é considerada da série 4XXX, a qual possui como elemento de liga principal o silício, é conhecida por ser uma das principais ligas utilizadas na indústria e por possuir diversas aplicações. Além disso, é caracterizada por apresentar: elevada fluidez (permitindo a completa alimentação do molde), boa resistência a corrosão, excelente fundibilidade e propriedades mecânicas consideradas relativamente alta (Coluci, 2011; Fuocco, 2018).

Para a obtenção das ligas é costume fundir o elemento de liga com o metal principal e posteriormente vaziar no molde. No entanto, o objetivo deste trabalho é comparar, por meio de análises metalográficas e ensaios destrutivos e não destrutivos, as ligas de Al-2% Si obtidas pelo método nomeado Método Tradicional (que consiste em fundir o elemento de liga com o metal) e Método Adição Pó de Silício que sucedeu em fundir o metal principal e adicionar o elemento de liga Si antes de homogeneizar e vaziar o metal fundido.

## 1.1 Justificativa

A presença dos metais no cotidiano é indispensável, uma vez que a aplicação abrange desde os meios de transporte utilizados até viadutos, pontes e edificações. De fato, os materiais metálicos desempenham um papel fundamental na vida humana. Contudo, para garantir sua adequação e desempenho nas diversas aplicações, é essencial o desenvolvimento de pesquisas e ensaios que avaliem a resistência e a compatibilidade dos metais e suas ligas com as condições específicas de uso.

Segundo Corrêa (2019), a indústria moderna busca por materiais que possam apresentar propriedades mais elevadas e específicas. Um dos fatores que influenciam diretamente nas propriedades do material é a morfologia macro e microestrutural que são formadas imediatamente após a solidificação, além disso, a realização de tratamento térmico também ocasionam mudanças na microestrutura e auxiliam na retirada de tensões (Canté, 2009).

As ligas metálicas são muito utilizadas no meio industrial, pois apresentam propriedades que o metal por si só não apresentaria. A utilização dos elementos de liga varia de acordo com a propriedade que se deseja alcançar, o silício, por exemplo, tem o caráter de oferecer boa fluidez ao metal fundido. A maneira como o elemento de liga é inserida ao metal principal também pode ser um fator que influencia nas propriedades finais do material.

Dessa forma, este trabalho, justifica-se pelo estudo de novos métodos de utilização do elemento de liga, silício, com baixa granulometria (200 *mesh*) e da utilização do silício em tamanho de 10 a 30 mm.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar comparativamente através de ensaios elétrico e mecânicos as ligas de Al-2% Si tratadas (tempo de 1h e temperatura de 280°C) e não tratadas termicamente obtidas por diferentes metodologias de adição de silício.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Obter ligas de Al com 2% de Si com diferentes metodologias de adição do silício;
- Analisar os grãos e realizar caracterização metalográfica;
- Identificar através de ensaio a condutividade elétrica de cada liga;
- Analisar por meio de microdureza e tração a resistência mecânica das ligas;
- Analisar a influência do tratamento térmico (tempo de 1h e temperatura de 280°C) no ensaio de resistência elétrica e mecânicos;
- Analisar comparativamente os resultados obtidos.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Na Seção 1 são abordadas as considerações gerais sobre o alumínio, liga da série 4XXX, suas aplicações e a proposta de avaliar o método (método tradicional e método utilizando pó de silício) das ligas a serem estudadas e na sequência, objetivos gerais, específicos e justificativa do trabalho.

A Seção 2 mostra a revisão bibliográfica, com destaque para o metal alumínio, suas características, propriedades e ligas; abordando o silício e sua influência como elemento liga; aplicação da liga da série 4XXX; tratamentos térmicos, processo de fundição e solidificação. A

Seção 3 descreve a metodologia utilizada mostrando a metodologia como as ligas Al-2% Si foram obtidas, tratamento térmico, caracterizações das ligas e ensaios realizados.

Na Seção 4 são analisados os resultados dos ensaios realizados (análise macroestrutural, resistência elétrica, microdureza e tração), comentários e discussões feitas baseadas em literaturas. Nesta seção é mostrado de forma comparativa os valores das propriedades e dos métodos utilizados para as ligas estudadas com e sem tratamento térmico.

Finalizando, na Seção 5 apresenta as considerações finais, conclusão, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Materiais metálicos**

De acordo com Callister e Rethwisch (2020), os materiais metálicos são materiais bastante requisitados no setor da engenharia e em outros setores, essa aquisição se deve ao fato desses materiais apresentarem propriedades convenientes em diversas aplicações. Os metais e suas ligas apresentam estrutura ordenada, são relativamente densos (comparado as cerâmicas e polímeros), são materiais rígidos, resistentes e ainda assim conseguem se deformar sem se romper, por essas características possuem grande demanda em aplicações estruturais. Além disso, há metais que apresentam muitos elétrons livres, e devido a isso são excelentes condutores de eletricidade e condutores térmicos. Quando polidos possuem aparência brilhosa e alguns deles apresentam propriedades magnéticas.

Callister e Rethwisch (2020) ainda mencionam em sua literatura que as ligas metálicas são divididas em: ligas ferrosas e não ferrosas. Sendo as ligas ferrosas caracterizadas por apresentarem como principal constituinte, o ferro. Por outro lado, as ligas não ferrosas, costumam não apresentar este constituinte ou quando apresentam, possuem percentual muito baixo, podendo ser desconsiderado. De acordo com a Revista Alumínio (2025), apesar das ligas ferrosas serem mais utilizadas no setor industrial, as ligas não ferrosas estão se tornando cada vez mais destaque e desempenhando papéis fundamentais na tecnologia e inovação atual. Dentre essas ligas não ferrosas está incluso o alumínio, um metal promissor e versátil que pode ser protagonista no meio mais sustentável.

### **2.2 Alumínio**

Maranhão (2019) comenta que o alumínio é um dos metais não ferrosos mais consumido do mundo, é caracterizado por ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, ficando atrás do oxigênio e silício, além disso, possui alto caráter para reciclagem sem perder suas propriedades. Este metal se encontra na natureza na forma de óxido de alumínio, sendo a bauxita o principal minério, mostrado na Figura 1, utilizado para a obtenção deste metal.

**Figura 1** - Minério bauxita.



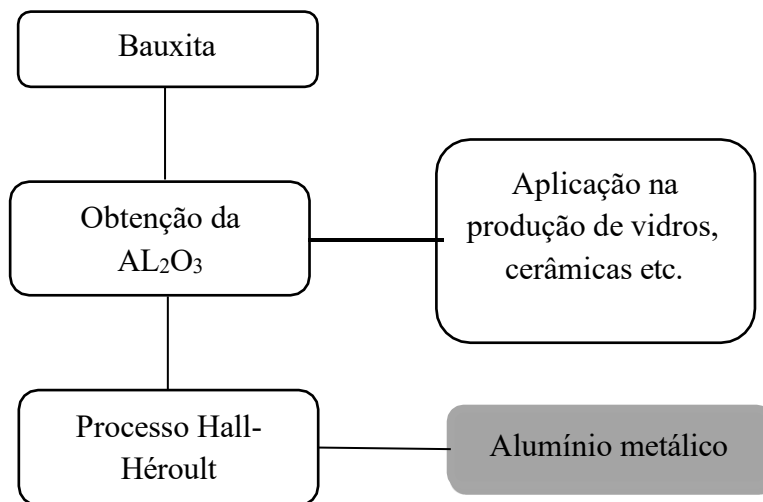
**Fonte:** Hydro.com (2025).

Nos estudos de Oliveira (2017) ao apresentar a cronologia da descoberta do Alumínio (Al), é mencionado que foi descoberto no ano de 1809 por Sir Humphrey Davy, porém, somente em 1825 o químico dinamarquês conseguiu isolar pela primeira vez e apenas em 1886 foi produzido um processo industrial para adquiri-lo.

Segundo Silva (2015) e Souza (2017), o Brasil é considerado um dos maiores produtores de alumínio primário, isso se deve ao fato de possuir grandes reservas de extração do minério bauxita nos estados do Pará e Minas Gerais. Para a obtenção deste metal são necessárias basicamente três etapas: mineração, refinaria e redução.

De acordo com Constantino (2002), para se obter o alumínio primário são necessários três componentes básicos: alumina, eletricidade e carbono, sendo este último componente utilizado para a fabricação dos ânodos e cátodos, onde estes são responsáveis por conduzir eletricidade. Com a alumina refinada ( $Al_2O_3$ ), este óxido de alumínio é transferido para cubas eletrolíticas e sofre redução por meio do processo de eletrólise, Hall-Héroult, obtendo dessa forma o alumínio primário. Na Figura 2, tem-se o fluxograma, baseado em Constantino (2002) e Schneider (2002), apresentando a obtenção do alumínio.

**Figura 2** – Fluxograma simplificado do processo de obtenção do alumínio pelo processo Baayer



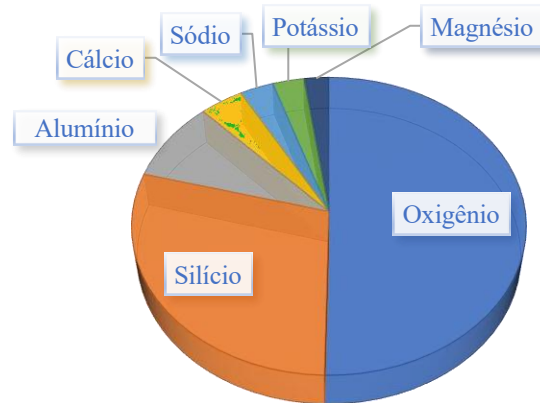
**Fonte:** Adaptado de Constantino (2002); Schneider (2012).

O portal Revista Alumínio (2023) revela que no ano de 2022 o IAI (International Aluminium Institute) mostrou um levantamento de que a produção de alumínio primário deve crescer em até 40% até o final de 2030. Essa busca constante se deve ao fato deste metal apresentar diversos diferenciais, sendo um deles a sustentabilidade da cadeia produtiva, outro fator para este aumento são os quatro principais consumidores (setor elétrico, transporte, construção civil e embalagens) que correspondem a 75% do aumento.

### 2.2.1 Características do alumínio

Como é visto em várias literaturas, o alumínio é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, conforme mostra a Figura 3. O alumínio é o metal mais consumido no cotidiano das pessoas devido suas características que serão listadas a seguir.

**Figura 3** – Gráfico da distribuição alumínio e silício na crosta terrestre.

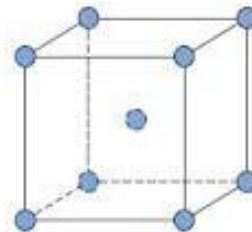


**Fonte:** Adaptado de Duarte (2019).

### 2.2.1.1 Estrutura cristalina

De acordo com Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2011), abaixo da temperatura de 660 °C o alumínio se encontra no estado sólido caracterizado por um arranjo atômico organizado e compactado que se repete nas três dimensões do espaço indefinidamente, esse arranjo atômico é denominado célula unitária, podendo ser cúbica de face centrada (CFC), cúbica de corpo centrado (CCC) e hexagonal compacta (HC). Van Vlack (2007), menciona em sua literatura que os metais são caracterizados por possuir estes arranjos, e mostra que o alumínio possui estrutura cúbica de face centrada (CFC), conforme mostra a Figura 4, nessa estrutura cristalina 8 átomos formam as extremidades de um cubo e 6 átomos se dividem, ficando um átomo em cada face da célula. É importante ressaltar que quando a temperatura ultrapassar 660 °C (ponto de fusão), ou seja, quando o alumínio estiver na forma líquida, esse arranjo continuará ordenado, mas não será repetitivo nas três dimensões do espaço.

**Figura 4** – Estrutura cristalina do alumínio



**Fonte:** Callister e Rethwisch (2020).

### 2.2.1.2 Condutividade elétrica

Ao se tratar da condutividade elétrica desse material, Machado (2012) fala que a condutividade é o inverso da resistividade, sendo uma das propriedades mais sensível do alumínio, pois qualquer inserção de elemento de liga e mudança brusca na estrutura pode alterá-la bastante. Ressaltando que essa modificação pode ser obtida também a partir da realização de tratamentos térmicos.

Ademais, este metal tem sido considerado um excelente substituto do cobre na transmissão de energia elétrica por meio de cabos e fios. Segundo a norma da *International Annealed Copper Standard* (IACS), quando o alumínio está com o teor de 99,99 % de pureza na temperatura de 20 °C, sua resistividade é de 2,69  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  e a capacidade de conduzir eletricidade é de 64,94 % IACS (Nascimento 2007).

A ABAL (2019), diz que além de ser um excelente condutor de eletricidade (ficando atrás somente do cobre), o alumínio oferece outras características, além da condutividade elétrica, sendo elas: leveza, menor custo, dúctil e resistência à corrosão, favorecendo-o como um substituto do cobre na produção de cabos de transmissão de energia elétrica.

### 2.2.1.3 Resistência à corrosão

Além de possuir excelente propriedade em conduzir eletricidade, esse elemento possui a peculiaridade de ser muito resistente à corrosão, isso se deve ao fato de que quando exposto a água, oxigênio ou outro meio oxidante, haja a formação de uma camada superficial ou película de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), por ser bastante reativo sua resistência a corrosão irá depender do alcance da película de óxido que se formará, impedindo o contato do meio com o metal (ABAL, 2019).

### 2.2.1.4 Resistência mecânica

O alumínio apresenta módulo de Young de 69 GPa. Conforme mencionado por Duarte (2017), este metal em seu estado puro não possui elevada resistência mecânica, sendo necessário a adição de elementos ligantes para adquirir ligas com propriedades sob medida para aplicações específicas. Além disso, de acordo com Callister e Rethwisch (2020), esse valor

pode ser melhorado com encruamento das peças e tratamento térmico, podendo obter dessa forma, um limite de resistência a tração de 124 MPa.

### 2.2.2 Ligas de alumínio

Segundo Casanova (2016), o alumínio no seu estado puro possui baixa densidade, é macio e sua resistência mecânica não é elevada, surgindo a necessidade de se adicionar intencionalmente componentes que ofereçam propriedades específicas, esses componentes são denominados elementos de liga. Quando adicionados em proporções distintas, esses elementos tendem a conferir ao metal puro características distintas e específicas, como, elevada dureza, resistência à tração, resistência ao impacto etc. Os elementos de liga mais comuns para formar ligas de alumínio são: silício, zinco, cobre, magnésio, titânio, estanho, manganês e níquel.

Além do alumínio ser bastante atrativo devido ser muito abundante, este metal possui a capacidade de combinar-se com diversos elementos de liga. Devido a isso, essas ligas são capazes de oferecer à indústria uma vasta variedade de produtos resistentes a corrosão e a ataques químicos, bons condutores de eletricidade, ligas com boa usinabilidade, ductilidade etc. (ABAL, 2011).

Como menciona Haskel (2009), as ligas de alumínio são divididas e agrupadas de acordo com o seu principal elemento de liga e da maneira que foram processadas, sendo suas propriedades físicas ligadas à composição química e suas propriedades mecânicas influenciadas pela composição químicas e microestrutura.

### 2.2.3 Classificação das ligas de alumínio

Para a classificação do alumínio e suas ligas são utilizadas normas, seja no ambiente institucional ou industrial. No Brasil, a norma seguida é a NBR ISO 209 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

De acordo com a NBR ISO 209 (ABNT 2010) as ligas de alumínio para fundição são descritas por meio de normas internacionais e apresentadas pela *Aluminum Association* (AA), possuindo nomenclatura constituída por quatro dígitos, sendo o primeiro dígito indicador da série e o último dígito indica a forma que o material foi fornecido, este último dígito costuma ser separado dos primeiros por um ponto (Parreiras, 2014). Na Tabela 1 são apontadas as séries das ligas de alumínio e seus respectivos elemento de liga principal.

**Tabela 1** – Séries e seus respectivos elementos de liga.

<b>Série</b>	<b>Elemento de liga principal</b>
1XX.X	Alumínio puro (99 %)
2XX.X	Cobre (Cu)
3XX.X	Manganês (Mn)
4XX.X	Silício (Si)
5XX.X	Magnésio (Mg)
6XX.X	Magnésio (Mg) e Silício (Si)
7XX.X	Magnésio (Mg) e Zinco (Zn)

**Fonte:** Adaptado de ABNT (2010); Sousa, (2013).

Na Tabela 2, tem-se as séries e suas respectivas tipos de fornecimento que são determinadas a partir do último dígito da série.

**Tabela 2** – Dígitos correspondente a cada série e a forma como a liga foi adquirida.

<b>Dígitos</b>	<b>Forma de fornecimento</b>
XXX.0	Peças fundidas
XXX.1	Lingotes fundidos
XXX.2	Lingotes fabricados a partir de alumínio primário

**Fonte:** Adaptado de Parreiras (2014).

### 2.3 Silício

Schleier et. al (2014) menciona que o silício foi descoberto em 1823 pelo químico sueco Jons Jacob Berzelius. É utilizado como elemento de liga e em seu estado puro é um sólido duro, com densidade de aproximadamente  $2,33 \text{ g/cm}^3$ , cor cinza escuro, apresenta brilho metálico, como mostra a Figura 5. Possui estrutura semelhante à do diamante.

**Figura 5** – Silício grau metalúrgico.



**Fonte:** Metha (2025).

A crosta terrestre é composta por 27,7 % de silício que é encontrado na natureza na forma de óxido ( $\text{SiO}_2$ ). De acordo com Gomes *et al.* (2018) o Si é obtido por meio de um processo carbotérmico. Para Isbaex (2014) é possível complementar que ao final do processo se obtém o silício utilizado para diversas aplicações, dentre elas, na produção de ligas metálicas, sendo manuseado o silício de grau metalúrgico (Si-GM). Mordor Intelligence (2023) afirma que o mercado é segmentado por silício de grau metalúrgico e grau químico, todavia o de grau metalúrgico domina o mercado, pois é voltado para a aplicação de ligas de alumínio, semicondutores, painéis solares e outras aplicações.

Para Cunha (2012), o silício é um dos elementos mais utilizados nas ligas fundidas de alumínio, isso ocorre porque esse elemento possui a capacidade de aumentar a fluidez, reduzir o coeficiente de expansão, contribuir com a redução da porosidade no produto fundido, etc. Além dessas características, Cobden (1994) diz que esse elemento possui uma particularidade que muitos outros não detém, isto é, enquanto alguns elementos de liga possuem tendência a afetar a condutividade elétrica, diminuindo-a, o silício não afeta de forma negativa e oferece um aumento (considerado médio) de  $1,02 \mu\Omega.\text{cm}$ .

## **2.4 Liga alumínio-silício**

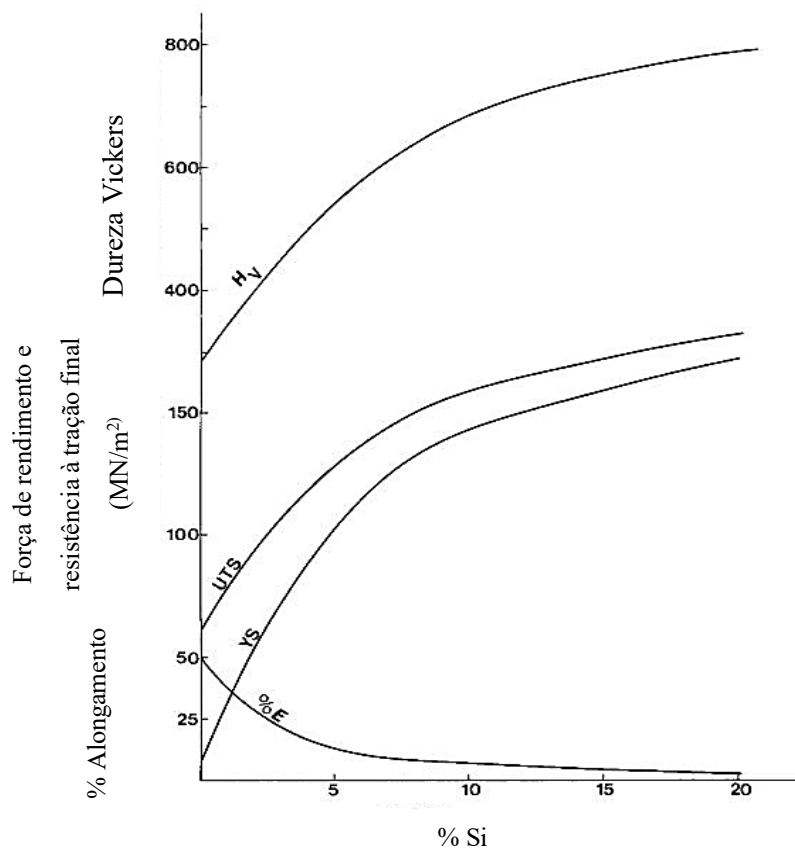
Nas palavras de Fuocco (2018), as ligas de alumínio da série 4XXX são ligas que possuem como principal elemento de liga, o silício. Essas ligas são conhecidas por apresentarem características como: elevada fluidez, boa resistência à corrosão, propriedades mecânicas consideradas relativamente alta e excelente fundibilidade. Para Coluci (2011) e Shabani (2011), essas ligas constituem cerca de 50 % das ligas de alumínio (fundidas)

usufruídas nas indústrias e possuem aplicações difundidas principalmente nas indústrias aeronáutica e automotiva.

Mordor Intelligence (2023) comenta que a liga da série 4XXX tem se mostrado bastante eficiente para os fabricantes do setor automobilístico que almejam ter automóveis com baixa emissão de gases de efeito estufa e mais conveniente em termos de combustíveis. Além disso, de acordo com a IEA (*International Energy Agency*) em 2030 as vendas globais, a cerca de carros elétricos, deve chegar em torno de 125 milhões, por isso os projetos para carros elétricos devem exigir que seus motores apresentem leveza para acionar o motor e reduzir a quantidade de energia elétrica, dessa forma a procura pela liga Al-Si deve aumentar.

Como mencionado anteriormente e segundo Ferrarini (2005), a liga Al-Si é caracterizada principalmente por possuir elevada resistência à corrosão e dependendo do teor de silício utilizado e da microestrutura, esta liga oferece uma série de propriedades mecânicas e físicas. De acordo com a Figura 6, nota-se a influência do teor de silício quando adicionado à matriz de alumínio.

**Figura 6** – A influência do Si nas propriedades das ligas de Al.



Fonte: Mondolfo (1976).

Com o gráfico, percebe-se que com o aumento do percentual de silício, a dureza (HV) e a resistência a tração (UTS) aumentam, por outro lado a ductilidade(%E) diminui, recordando que esta última propriedade é apresentada por Callister (2020) como a característica de alguns materiais se deformarem bastante antes da sua ruptura.

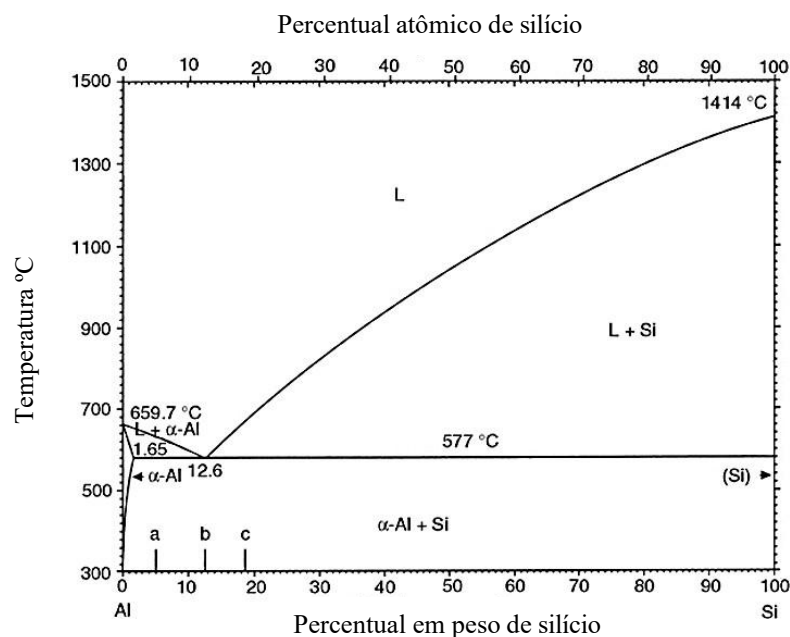
Segundo Hatch (1984), dependendo do teor de silício utilizado juntamente com o alumínio, as ligas são classificadas em 3 grupos:

- Ligas hipoeutéticas: apresentam percentual de silício inferior a 11%;
- Ligas eutéticas: possuem 11 a 13% em peso de silício;
- Ligas hipereutéticas: possuem 14 a 20% de silício em sua composição.

#### 2.4.1 Diagrama de equilíbrio Alumínio-Silício

As ligas hipoeutéticas, eutéticas e hipereutéticas são descritas melhor através do sistema binário alumínio-silício na Figura 7. O diagrama é caracterizado por possuir um eutético simples que é encontrado na temperatura de 577 °C e apresenta 12,6% em peso de silício e separa as ligas hipoeutéticas e hipereutéticas. Com a análise do diagrama também é possível notar que a solidificação do metal  $\alpha$ -Al se solidifica primeiro como uma liga hipoeutética (Fuocco; Corrêa, 2010). O silício possui a função de formar um eutético na liga, ou seja, uma região eutética que possui duas fases sólidas (Al- $\alpha$  e silício) abaixo da temperatura de 577°C.

**Figura 7** – diagrama de equilíbrio Al-Si

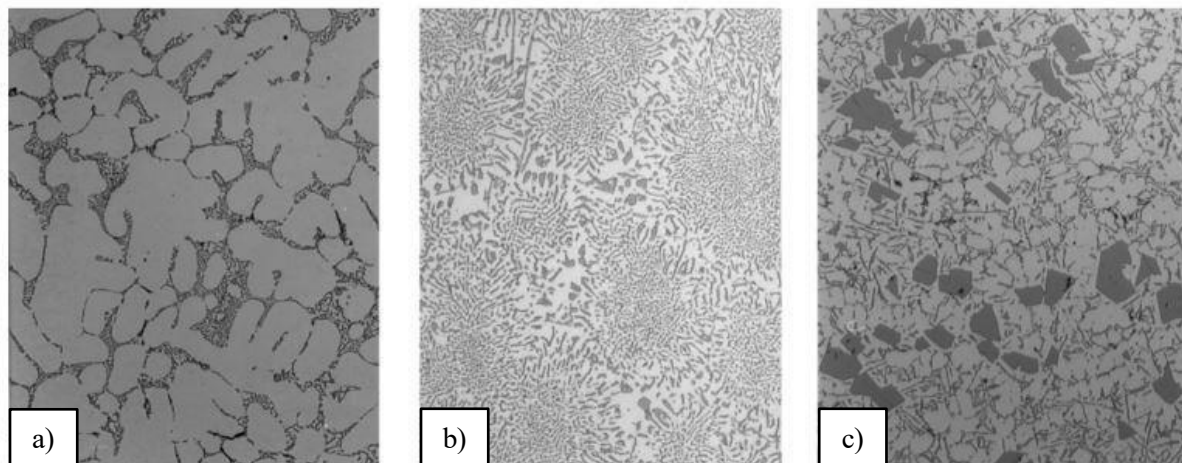


Fonte: Warmuzek (2004).

As ligas eutéticas e hipoeutéticas são descritas como ligas que apresentam boa resistência a corrosão e boa fluidez, já as ligas hipereutéticas apresentam ótima resistência ao desgaste e baixo coeficiente de expansão térmica (Ejiofor; Reedy, 1997).

Criado, et al. (2003) recorda que as ligas consideradas eutéticas são utilizadas nas aplicações onde a resistência não é um critério, por exemplo, na produção de carcaças de bombas hidráulicas. Em contrapartida, têm-se as ligas hipoeutéticas e hipereutéticas aplicadas comercialmente na produção de cilindros e blocos automotivos, corpos de válvulas, rotores, pistões e pás para ventiladores náuticos. Na Figura 8, têm-se as imagens das microestruturas correspondentes a cada liga citada anteriormente.

**Figura 8** – Microestrutura das ligas Al-Si (a) hipoeutética com aumento de 150x, (b) eutética com aumento de 400x e (c) hipereutética com aumento de 150x.



Fonte: Warmuzek (2004).

Na Figura 8 (a), percebe-se a formação de dendritas de fase  $\alpha$  no momento que ocorre a solidificação e essas mesmas dendritas se formam em sequência e param seu crescimento quando são impedidas por outra dendrita (Santos; Silva 2009). Na Figura 8 (c), nota-se que as ligas hipereutéticas apresentam morfologia semelhante a plaquetas e possuem formação da fase  $\beta$  (silício) (Pimenta, 2017).

Segundo Nascimento (2015) o arranjo microestrutural é o responsável em conferir ao material determinadas propriedades, principalmente quanto à tração, sendo muito desses aspectos influenciados fortemente no processo de solidificação.

#### 2.4.2 Aplicações das ligas alumínio-silício

De acordo com Fuocco (2017), a busca por ligas com menor peso elevam a utilização das ligas de alumínio, principalmente onde antes se utilizava peças de ferro fundido cinzento e nodulares, por exemplo, alguns componentes automotivos).

As ligas Al-Si possuem um ótimo desempenho e devido a isso são requisitadas nos setores que exigem uma liga com características como: resistência ao desgaste. Essas ligas costumam ser aplicadas na produção de rotores de freio, camisas de cilindros, pistões e bielas, válvulas, bloco de motor etc. (Reddy, 2015).

#### 2.5 Processos de fundição e solidificação

De acordo com Soares (2000) e Ferreira (2010), a fundição é um processo de fabricação composta por um conjunto de métodos, processos e técnicas para obter metais fundidos e solidificação controlada. O objetivo desse processo é obter peças com dimensões e forma controlada de acordo com a projeção inicial. Esse processo se destaca entre os demais por permitir que se obtenha peças de vários tamanhos e grande grau de complexidade.

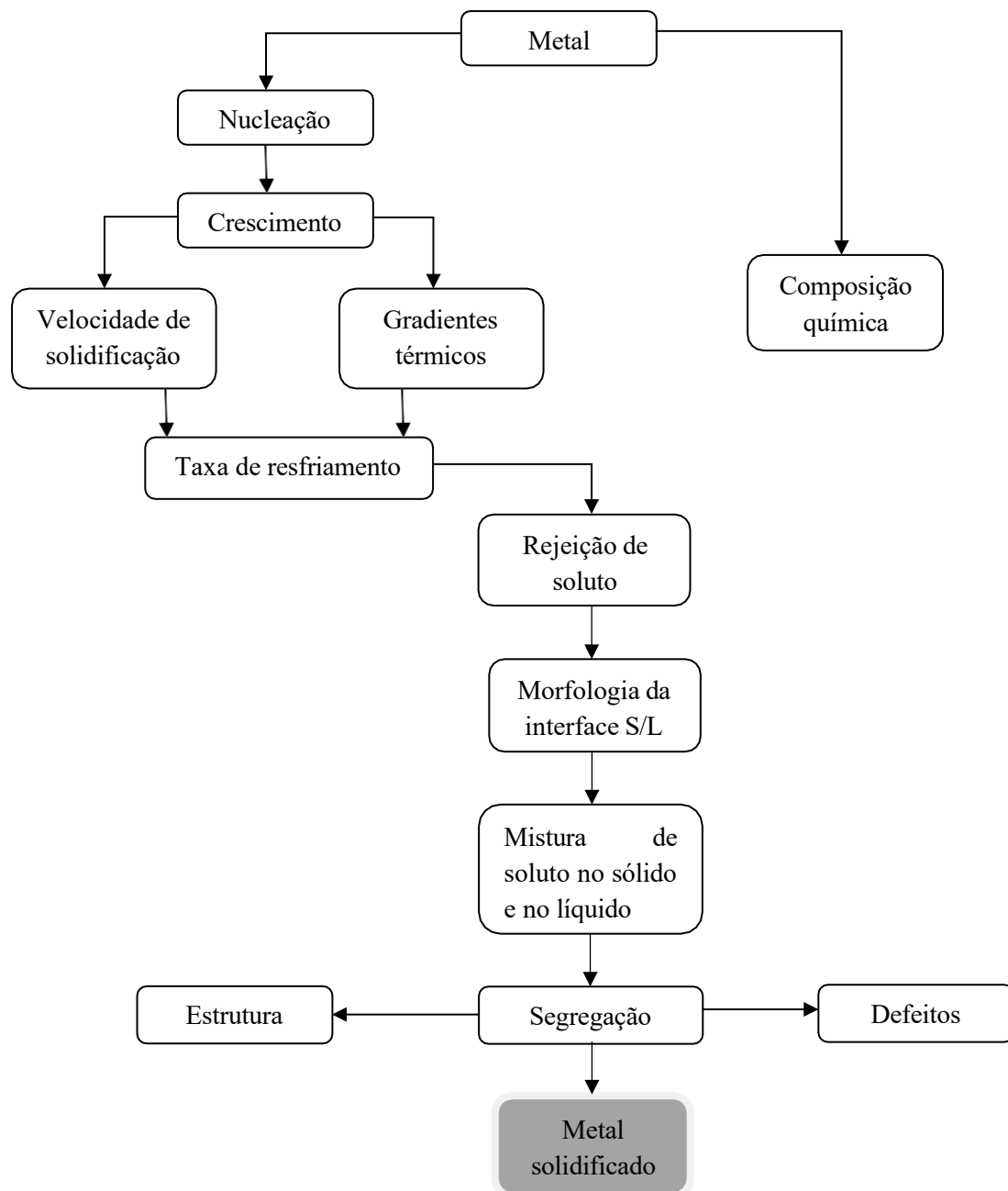
Prates e Davies (1978) mencionam que para se obter os produtos com suas devidas formas desejadas é necessário que haja a fundição do metal e o vazamento dele (em forma líquida) em moldes, podendo ser de areia verde, permanente, cera perdida, entre outros. Nesse processo o metal líquido vai perdendo calor ao preencher o molde e com isso vai se solidificando e obtendo a forma final do produto almejado. Durante o processo de solidificação (transformação líquido-sólido) ocorre uma série de eventos que são imperceptíveis a olho nu. Essa série de eventos devem ser controladas, pois podem comprometer a qualidade e propriedade do produto.

Em sua literatura, Garcia (2001) aponta que a solidificação é um fator muito importante no processo de obtenção de uma liga fundida, pois depois da composição química do material é ela que determinará a microestrutura resultante que por sua vez influenciará nas propriedades finais do metal ou liga. Dessa forma, é muito importante conhecer fatores que possam influenciar na taxa de resfriamento durante o vazamento da liga, por exemplo: temperatura de vazamento, velocidade do preenchimento do molde, material e formato do molde, capacidade de absorção de calor do molde.

De acordo com Tâmega (2017) há uma diversidade de processos de fundição que utilizam diversos tipos de moldes, dentre eles se destaca a fundição que utiliza molde

permanente, sendo estes moldes construídos de materiais metálicos, ferro ou aço tratado. Ainda há uma subdivisão desses tipos de fundição utilizando estes moldes, sendo uma delas a fundição em coquilha que se caracteriza pelo vazamento do material ocorrer pela ação da gravidade. As ligas metálicas indicadas para serem postas nesses moldes são alumínio, cobre, magnésio e zinco, por possuírem menor ponto de fusão comparado ao do molde. Na Figura 9, tem-se o fluxograma que apresentam as etapas que ocorrem durante o processo de solidificação.

**Figura 9** – Fluxograma com etapas do processo de solidificação.



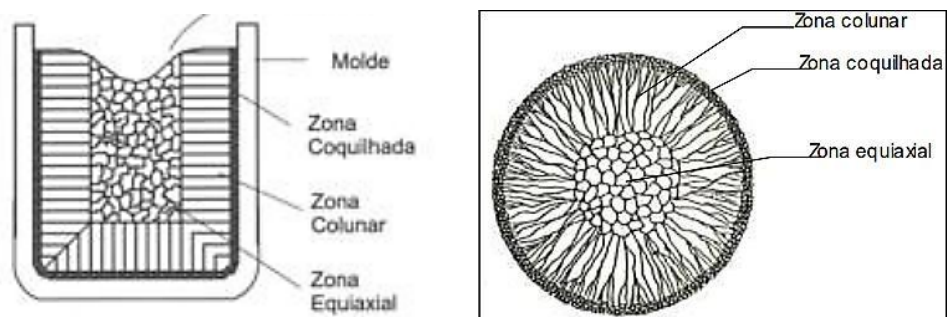
Fonte: Adaptado de Garcia (2001).

### 2.5.1 Estruturas obtidas a partir da solidificação

Os grãos de um metal podem ser observados a olho nu depois da amostra ser submetida a várias etapas metalográficas. A partir dessas etapas é possível analisar a macroestrutura, isto é, os grãos formados depois que o metal se solidificou. Garcia (2001), afirma que quando o metal ainda no estado líquido é vazado em lingoteiras, a parte que entra em contato com a parede do molde (que se encontra fria) é rapidamente super-resfriada e tende a ter uma intensa nucleação de grãos cristalinos com orientações aleatórias. Essa camada de grãos costuma ser fina e essa espessura pode ser determinada de acordo com os seguintes fatores: propriedades termofísicas do material do molde utilizado; temperatura do vazamento; composição química da liga e a fluidez do metal líquido. A camada formada é denominada zona coquilhada.

Após a solidificação, é possível identificar (nos materiais policristalinos) três zonas estruturais: zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial, a Figura 10 mostra essas zonas. Nas palavras de Prazeres (2016), a zona coquilhada é caracterizada por possuir grãos com orientações aleatórias de pequena dimensão e por serem formados próximo à parede do molde. A zona colunar é representada por grãos cristalinos mais alongados e perpendiculares a parede do molde. A zona equiaxial possui grãos localizados no centro do lingote e esses grãos possuem orientações aleatórias e suas dimensões são superiores aos grãos da zona coquilhada.

**Figura 10** – Possíveis zonas macroestruturais de uma liga.

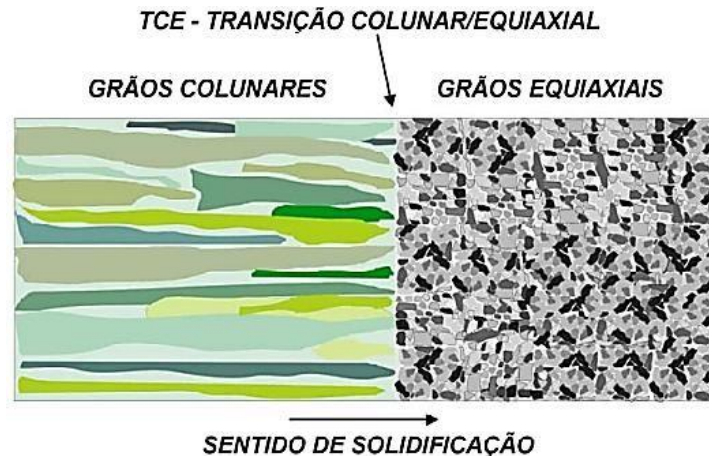


**Fonte:** Garcia (2001) E Prates; Davies, (1978).

Quadro, *et. al.* (2016), menciona em seus estudos que além dessa estrutura existem ligas de alumínio que possuem grãos mais refinados, sendo uma das causas, o resfriamento rápido, onde a estrutura de grãos finos é formada pela interrupção brusca do crescimento de grãos no processo de solidificação. Grãos mais refinados são caracterizados por conferir ao material maior resistência mecânica e redução da porosidade.

Ainda há a estrutura considerada um pouco mais complexa, sendo formada por grãos colunares e equiaxiais. Nessas macroestruturas tem-se uma Transição Colunar/Equiaxial (TEC), conforme mostra a Figura 11. Nesse tipo de estrutura ocorre a nucleação e crescimento dos grãos a frente dos grãos colunares, formando dessa forma essa transição.

**Figura 11** – Transição colunar/equiaxial



Fonte: Garcia (2001).

Nota-se que os grãos influenciam diretamente na resistência mecânica do material, no entanto, ainda há outros fatores que possibilitam aumento nas propriedades, são esses, endurecimento por solução sólida, conformação plástica (encruamento) e tratamento térmico.

## 2.6 Endurecimento por solução sólida

De acordo com Prazeres (2016), parte dos metais com elevada pureza não apresentam alta dureza e propriedades mecânica. Para efetuar o ganho dessas propriedades há a inserção de elementos ligantes que possibilitam o aumento ou ganho dessas propriedades. Com essa inserção ocorre uma solução sólida, sendo o metal puro o solvente e o elemento de liga o soluto. Com o aumento da concentração de impurezas, há o aumento no limite de resistência a tração (LRT) e limite de escoamento. As ligas apresentam maior resistência devido os átomos do soluto entrarem na rede cristalina resultando em uma interação do campo de deformação entre as discordâncias e os átomos do soluto, ocasionando a restrição das discordâncias.

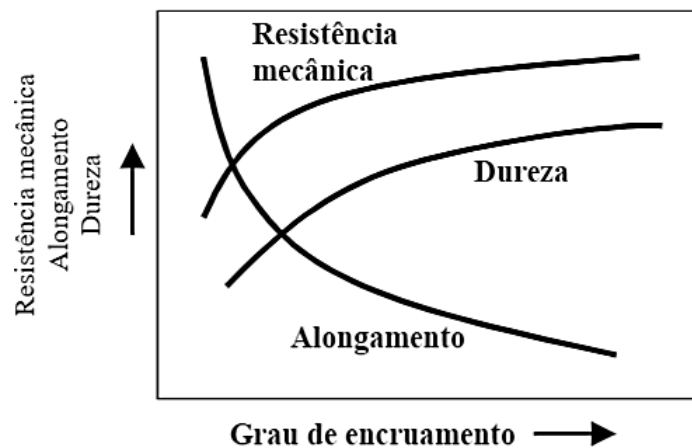
## 2.7 Conformação plástica dos metais

A conformação plástica consiste em uma deformação permanente do material com a mudança de um corpo metálico para outra forma definida. Na conformação são utilizadas tensões inferiores ao limite de resistência a ruptura. Esse processo corresponde ao movimento de inúmeros átomos submetidos a uma dada tensão que rompem ligações interatômicas e formam novamente. Nos materiais que apresentam estrutura cristalina, essa deformação consiste basicamente no movimento das discordâncias (Callister; Rethwisch, 2020).

Bresciani Filho *et al.* (2011) aponta que o objetivo desse processo consiste em: obter peças com dimensões e formas solicitadas, condições específicas e propriedades mecânicas. Os processos de conformação são classificados de acordo com vários critérios, sendo um deles classificado quanto a temperatura de trabalho a frio ou a quente.

O trabalho mecânico a frio é caracterizado pelo efeito do encruamento que é responsável pelo aumento da resistência mecânica dada a partir da deformação plástica, na Figura 12 é observado o efeito do encruamento nas propriedades mecânicas o aumento da dureza e limite de escoamento e diminuição da ductilidade.

**Figura 12** – Efeito do encruamento nos metais



Fonte: Santos (2007).

Após o encruamento a densidade das discordâncias aumenta, podendo formar até um emaranhado de discordâncias próximo aos contornos de grãos.

## 2.8 Tratamento térmico para as ligas de alumínio

O tratamento térmico é um dos métodos pelo qual se pode modificar a microestrutura dos metais e suas ligas. Freitas (2014), diz que o tratamento térmico é a operação ou conjunto de operações que possuem a finalidade de proporcionar determinadas características ao material por meio de aquecimento, permanência em dadas temperaturas e resfriamento brusco ou controlado, para que dessa forma este processo possa modificar o comportamento que o metal já apresentava.

Para Chiaverini (2008) e Colpaert (2008), as características e propriedades de um material dependem grandemente da estrutura, granular ou cristalina, e mais ainda, estão ligadas diretamente com a composição química e a maneira como foram fabricados. Algumas propriedades dos materiais metálicos podem ser alteradas, sendo o tratamento térmico um dos meios considerado mais seguro e eficiente. Esse tratamento irá determinar a estrutura desejada e por consequência alterar as propriedades finais. Embora, as ligas ferrosas sejam as mais tratadas termicamente ainda há ligas não ferrosas, ligas de alumínio, por exemplo, que passam por esse processo para atingir propriedades convenientes à sua aplicação. Sendo assim, o tratamento térmico consiste em melhorar as propriedades mecânicas do material.

Os fatores que costumam influenciar no resultado de um tratamento térmico, segundo Abal (2011), são: aquecimento, temperatura, resfriamento e a atmosfera do local. O tratamento pode alterar a dureza do material, melhorar a ductilidade, usinabilidade, corrigir defeitos causado por tratamentos anteriores etc.

As ligas de alumínio podem se dividir em dois grupos: ligas não tratáveis termicamente e ligas tratáveis. Sendo as ligas não tratáveis, àquelas que só podem aumentar a resistência ao passar pelo processo de conformação a frio e tratadas com os tratamentos térmicos de envelhecimento artificial, estabilização e recozimentos plenos ou parciais (Verran *et al.*, 2005).

### 2.8.1 Envelhecimento artificial

Segundo Prazeres (2023), o tratamento de envelhecimento é feito para que as ligas de alumínio tenham boa resistência mecânica sem perda considerável das suas propriedades elétricas, sugerindo que no final, a liga que tenha passado por esse tratamento possa ser utilizada para fins elétricos. As ligas de alumínio e silício são consideráveis tratáveis, e um dos métodos de tratamento bastante utilizado após a etapa de laminação é o tratamento de envelhecimento. Silva (2022), menciona em seus estudos que esse tratamento térmico tem como finalidade

quantificar o potencial de condutividade elétrica e se esse corpo de prova possuirá a capacidade de atuar na transmissão de energia elétrica.

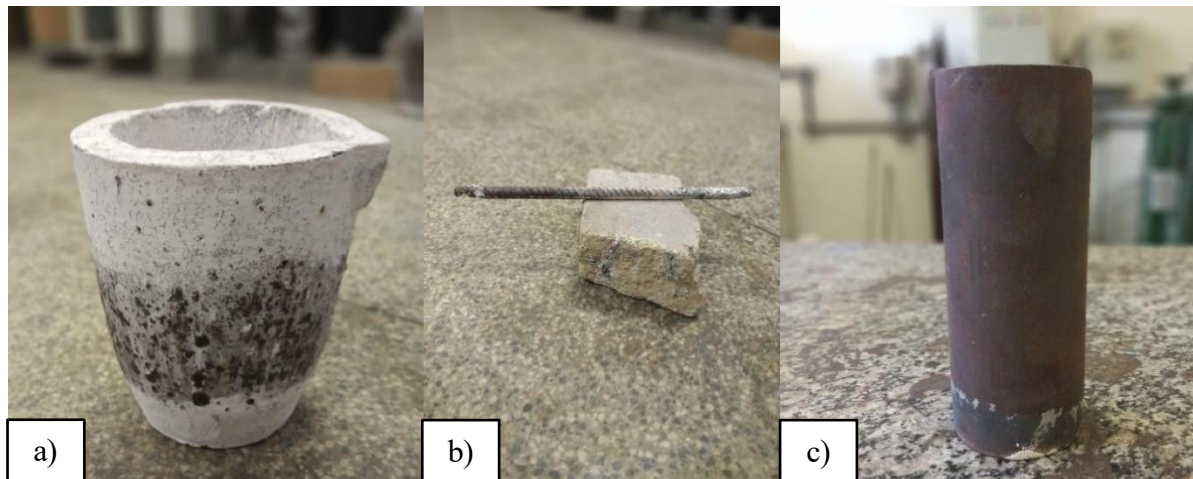
De acordo com Callister (2020), para realizar o tratamento térmico de envelhecimento, é necessário que antes se faça o TT de solubilização, que consiste em elevar a temperatura acima da linha solvus (limite de solubilidade no estado sólido) e resfriar bruscamente até a temperatura ambiente. Após essa etapa a liga de Al poderá passar por dois tipos de envelhecimento, sendo natural ou artificial ou combinar os dois. Groover (2017), diz que a etapa do envelhecimento consiste na formação de partículas que atuarão como barreiras no movimento das discordâncias desse metal, resultando no aumento da sua resistência mecânica e dureza.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais utilizados no processo de fundição e/ou solidificação

Inicialmente houve a preparação do cadinho, espátula e molde através de lixamento para retirar quaisquer resquícios de metais de fundições anteriores, em seguida foram levados ao forno tipo mufla a temperatura de 100°C para retirada de umidade e finalizou-se com a inserção de uma película de alumina líquida na superfície dos objetos para que o metal fundido não aderisse. Os aparatos manuseados são mostrados na Figura 13, a seguir. É importante ressaltar que as ligas foram obtidas de forma semelhante, excerto pela maneira como o elemento de liga, silício, foi adicionado.

**Figura 13** - Aparatos utilizados no processo (a) cadinho (b) espátula (c) molde.



Fonte: Autoria própria (2025).

#### 2. 3.2 Fundição

Para a etapa de fundição o forno utilizado foi do tipo mufla, marca GREFORTEC®, como mostra a Figura 14, e a temperatura utilizada para garantir a fusão dos componentes da liga foi de aproximadamente 900 °C.

**Figura 14** – Forno da marca Grefortec ®.



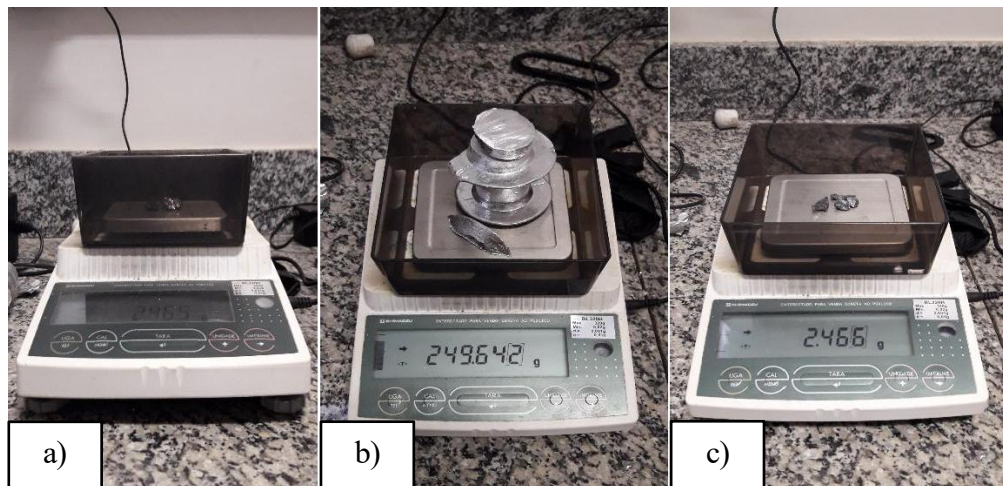
Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.2.1 Ligas obtidas pelo método tradicional (MT)

Este método foi denominado tradicional, pois é o método comumente utilizado para a obtenção das ligas nos laboratórios. Isso consiste em fundir o(s) elemento(s) de liga juntamente com o metal principal.

Inicialmente foi realizado o cálculo estequiométrico a fim de obter o valor das massas dos elementos que foram utilizados, sendo manuseado uma balança analítica para esta obtenção de massa, mostrada na Figura 15, a seguir, sendo apresentado também o momento da pesagem dos elementos utilizados nas ligas.

**Figura 15** – (a) Balança analítica, (b) pesagem do alumínio (c) pesagem do silício.



Fonte: Autoria própria (2025).

Com os valores das massas dos materiais devidamente obtidos, alumínio e silício foram colocados no cadinho devidamente preparado para a etapa de fundição e posteriormente levado ao forno (que já estava em aquecimento), para que ocorresse a fundição. Após a fundição dos materiais, houve os seguintes procedimentos: homogeneização com o auxílio de uma espátula de aço, injeção do gás argônio para retirada de impurezas, retirada da escória e vazamento no molde coquilha aço SAE 1040, conforme mostra a Figura 16.

**Figura 16** – Vazamento da liga Al- Si no molde coquilha.

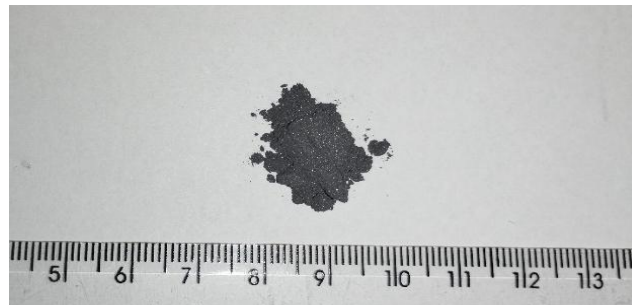


Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.2.2 Ligas obtidas pelo método adição pó de silício(MAPS)

Este método diferiu do método tradicional por manusear o elemento de liga, silício, com baixa granulometria, 200 *mesh*, mostrado na Figura 17.

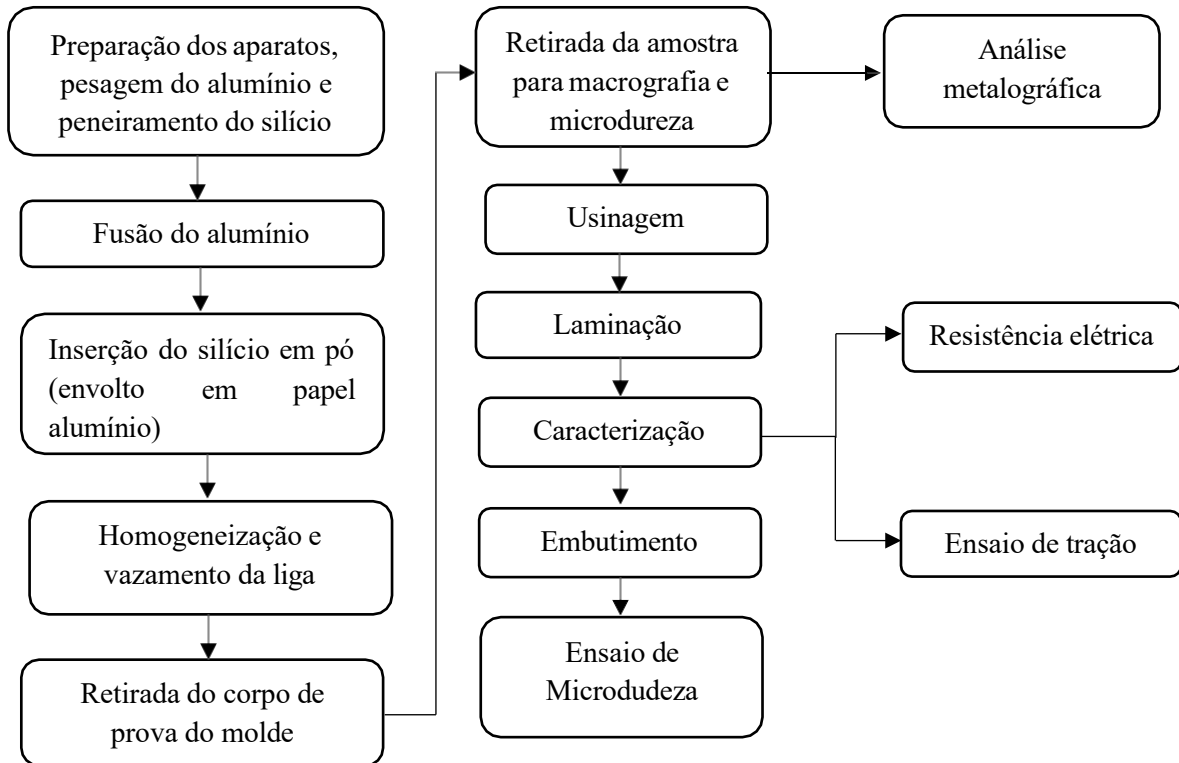
**Figura 17** – Silício com granulometria de 200 *mesh*.



Fonte: Autoria própria (2025).

O método é mostrado de forma simplificada no fluxograma na Figura 18. Inicialmente, tem-se a preparação dos instrumentos que foram utilizados no processo de fundição e preparação dos materiais que foram fundidos (pesagem do alumínio e peneiramento do silício).

**Figura 18** – Fluxograma do método adição silício em pó.

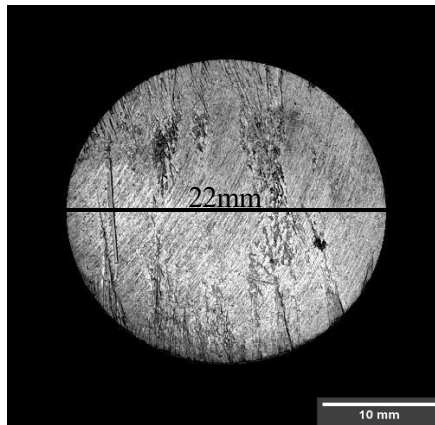


**Fonte:** Autoria própria (2025).

### 3.3 Corpos de prova

Após a solidificação dos lingotes, aguardou-se um tempo para que os metais solidificados fossem retirados dos moldes. Com isso, retirou-se um corpo de prova com o diâmetro de 22 mm, Figura 19, de cada liga para que pudesse ser realizada as etapas metalográficas com a finalidade de executar a análise macroestrutural e ensaio de microdureza. O restante do lingote foi levado para a usinagem.

**Figura 19** – Amostra retirada para realizar macrografia e ensaio de microdureza.



**Fonte:** A autoria própria (2025).

### 3.4 Metalografia

Para realizar a caracterização macroestrutural as ligas passaram pelo processo de metalografia padrão. As peças obtidas de cada liga foram lixadas com lixas de granulometria 80, 120, 220, 340, 400, 600 e 1200 *mesh*. Posteriormente foram polidas com pasta de alumina 0,5  $\mu$  e 0,3  $\mu$ , com o objetivo de alcançar uma área plana, sem riscos e adequada para realizar o ataque químico. O lixamento e polimento, foram realizados na politriz da marca WEG, modelo CFW10 equipada com inversor de frequência, mostrada na Figura 20.

**Figura 20** – Politriz utilizada para lixar e polir as peças.



**Fonte:** A autoria própria (2025).

Para realizar a análise macrográfica as peças foram atacadas com a solução Keller (95 ml H<sub>2</sub>O + 2,5 ml HNO<sub>3</sub> + 1,5 ml HCl + 1,0 ml HF).

### 3.5 Usinagem e laminação

Após a solidificação da liga e a retirada da amostra para a realização da análise macrográfica, o restante da amostra foi levado para usinagem, onde, segundo Prazeres (2016) a usinagem é necessária, para melhorar o acabamento superficial das amostras, evitando que surjam defeitos na etapa de laminação. Após a usinagem, o diâmetro final de cada lingote foi de 18 mm. As mesmas amostras foram submetidas ao processo de laminação a frio nos laminadores elétricos duo reversíveis da marca MENAC, ilustrado na Figura 21, que possuem em seus cilindros diferentes secções circulares, sendo de interesse desse estudo os fios com diâmetro de 3 mm.

**Figura 21** - Laminadores utilizados para laminação a frio.

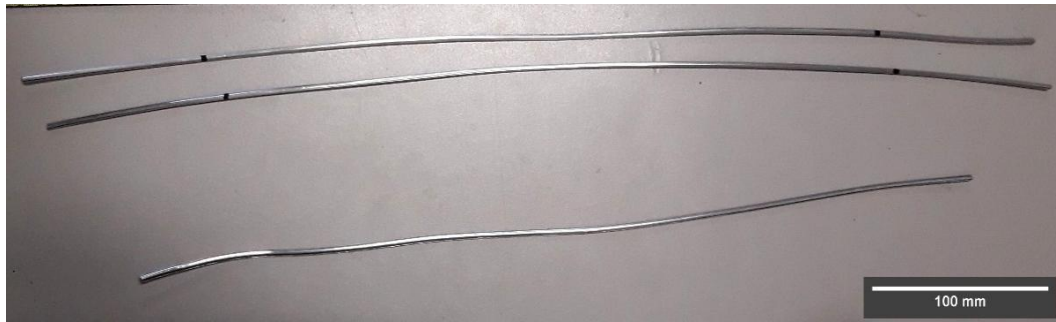


Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.6 Caracterização elétrica

Com a laminação realizada, alcançou-se fios com 3 mm de diâmetro, sendo esses cortados em tamanho de 600 mm, Figura 22, com a finalidade de medir a resistência elétrica.

**Figura 22** – Fios laminados para ensaio de resistência elétrica.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Como resultado da laminação, foram obtidos 3 (três) fios de 600 mm cada para o ensaio de resistência elétrica. Para este ensaio utilizou-se o microhmímetro MEGABRÁS (ponte de kelvin), modelo MPK – 2000, Figura 23.

**Figura 23** – Microhmímetro MEGABRÁS modelo MPK – 2000.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Conforme a NBR 5118 a resistência deve ser medida a uma temperatura entre 10 °C e 30 °C, a temperatura durante o ensaio foi de 20 °C, conforme é recomendado. Após a obtenção dos resultados, para o cálculo da resistência elétrica dos corpos de prova, utilizou-se a equação 1 fornecida pela norma NBR 6814, mostrada a seguir.

$$R_{20} = R_t \left( \frac{1}{1 + \alpha(t - 20)} \right) \quad (1)$$

Onde:

$R_{20}$  = resistência a 20 °C;

$R_t$  = resistência a T °C ( $\Omega$ );

$\alpha$  = coeficiente de variação da resistência com a temperatura de 20 °C, especificado segundo a norma para ligas de alumínio;

$t$  = temperatura em que foi realizada a medição (°C).

Com o resultado da resistência corrigida a 20°C, utilizou-se a Equação 2 para obter a resistividade seguindo a NBR 6815.

Onde:

$$R_V = \rho_C \cdot A \quad (2)$$

$R_V$  = resistência elétrica do corpo de prova por unidade de comprimento a 20°C, em  $\frac{\Omega}{m}$ ;

$\rho_C$  = resistividade volumétrica do corpo de prova a 20°C, em  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ ;

$A$  = área da secção transversal do corpo de prova, em mm<sup>2</sup>.

Os resultados obtidos foram transformados em condutividade elétrica (IACS), através da fórmula:

$$\varphi = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} \quad (3)$$

Onde:

$\varphi$  = a condutividade elétrica do fio em IACS;

$\rho_{Cu}$  = a resistividade elétrica do cobre em  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ ;

$\rho_{Al}$  = a resistividade elétrica do alumínio em  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ .

### 3.7 Caracterização mecânica

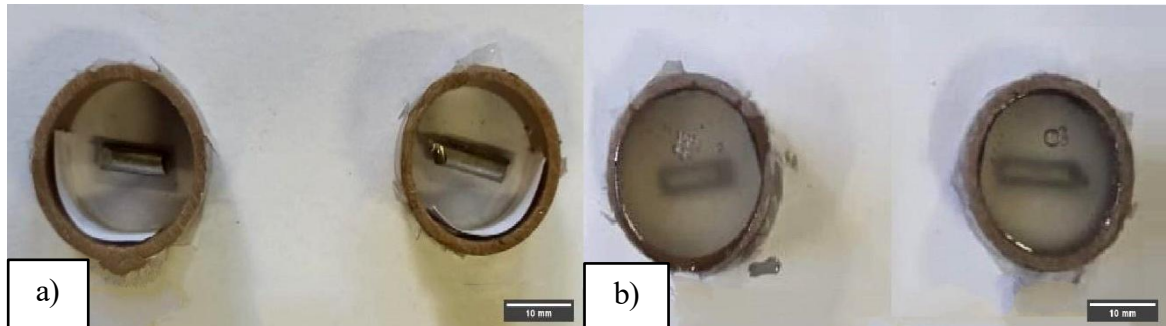
#### 3.7.1 Ensaio de microdureza Vickers

A microdureza consiste em avaliar a resistência do material ao ser deformado plasticamente após sofrer uma carga sobre uma superfície plana e preparada, utilizando-se de um penetrador de diamante em formato de pirâmide de base quadrada.

Para efetuar a análise da microdureza do fio de cada liga foi necessário realizar o embutimento a frio. A princípio, retirou-se do fio uma amostra de 15 mm, utilizando-se um

molde de policloreto de vinila (PVC) colocando-se a amostra, conforme mostra a Figura 24 (a). Em seguida, foi adicionado a cada molde a resina poliéster, conforme está ilustrado na Figura 24 (b). O embutimento foi realizado a frio pela possibilidade de o processo a quente causar danos às ligas.

**Figura 24** – (a) Amostras inseridas no molde de PVC, (b) amostras embutidas.

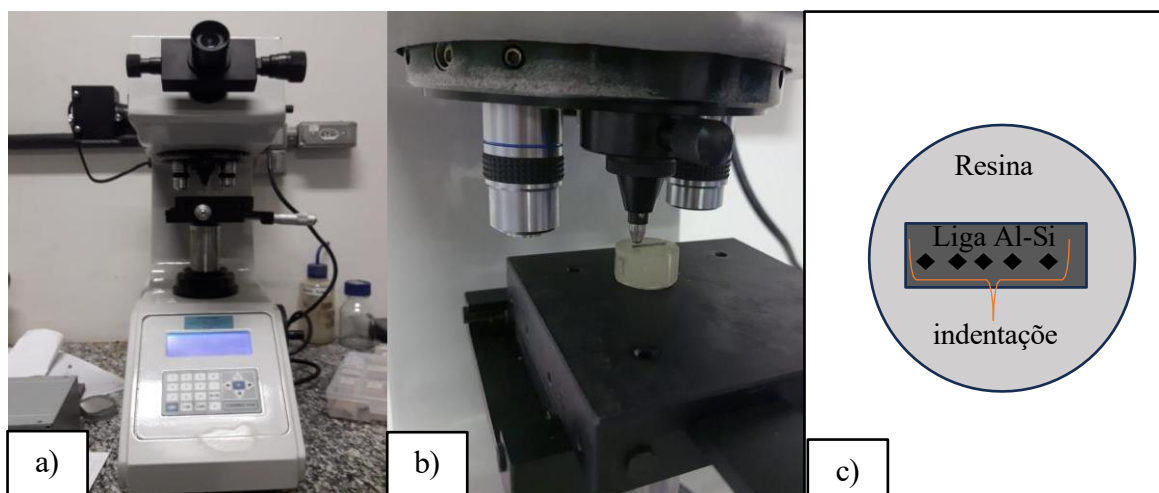


**Fonte:** Autoria própria (2025).

Após 24h, tempo necessário para a secagem da resina, houve a retirada das amostras dos moldes de PVC e em seguida foram submetidas as etapas de lixamento e polimento.

Para o ensaio de microdureza, utilizou-se o microdurômetro da marca Digital Metallic Vickers Hardness HT-710, modelo HV – 1000B, com penetrador de diamante, Figura 25(a). O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 14155 em uma amostra embutida, lixada e polida, Figura 25(b). A carga utilizada durante o ensaio foi de 100 kgf durante 13 segundos e cada amostra sofreu 13 indentações, conforme exemplo da Figura 25(c).

**Figura 25** – (a) Microdurômetro modelo HV, (b) amostra ensaiada, (c) indentações realizada nas amostras.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

### 3.7.2 Ensaio de tração

Para este ensaio foram cortados os mesmos fios utilizados no ensaio de resistência elétrica, resultando em 3 (três) corpos de prova com o comprimento de 200 mm, sendo necessário marcar os 150 mm entre garras para poder inserir na máquina de tração. A máquina utilizada foi da marca Shimadzu, modelo Servo Pulser, mostrado na Figura 26. O ensaio seguiu as normas NBR 6810 para caracterizar mecanicamente estes corpos de prova.

**Figura 26** – Máquina de ensaio de tração.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

### 3.8 Tratamento térmico

Para observar e comparar o comportamento das ligas, foi realizado tratamento térmico envelhecimento artificial nos fios que não foram ensaiados. Para a realização do tratamento nas ligas foram selecionados 3 fios de 600 mm, sendo essas ligas obtidas pelo método tradicional e o método adição de silício em pó. O processo foi realizado na estufa NEVONI®, modelo NV 1.0, como mostra a Figura 27, no qual o fio permaneceu na estufa por 1 hora sob a temperatura de 280 °C, em concordância com o protocolo COPEL e a norma ASTM B941.

**Figura 27** – Estufa NEVONI ®



**Fonte:** Autoria própria (2025).

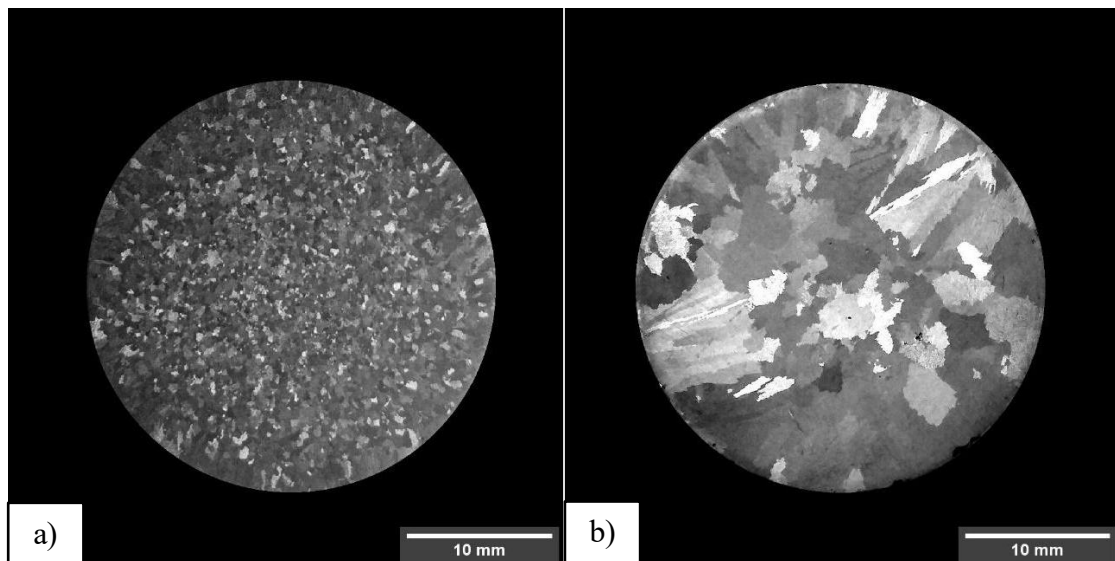
Após o resfriamento dos fios, esses foram submetidos ao ensaio de resistência elétrica, posteriormente foi efetuado o embutimento das amostras das ligas para realizar microdureza e o restante dos fios foram submetidos ao ensaio de resistência e posteriormente foram cortados com o tamanho de 200 mm para o ensaio de tração.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Macroestrutura da liga

Para a análise da macroestrutura, tem-se a comparação das ligas de alumínio na Figura 28, onde em (a) a macro é referente à liga obtida pelo método tradicional e em (b) a liga foi obtida pelo método de adição de silício na forma de pó.

**Figura 28** – Macroestrutura Al- 2% Si (a) método tradicional; (b) método com silício na forma de pó.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Nota-se que na Figura 28 (a), formou-se uma fina camada de grãos próximo a parede do molde e estes são pouco alongados, devido a taxa de resfriamento ter ocorrido rapidamente, fazendo com que houvesse uma nucleação intensa e com mesma orientação formando uma camada fina de grãos coquilhados, no entanto, percebe-se também que a maior parte da peça apresentou grãos bastante refinados sugerindo que ocorreu o impedimento brusco na formação no crescimento dos grãos colunares e equiaxiais, possivelmente ocasionado por um resfriamento rápido. Essa estrutura, de acordo com Garcia (2001) evidencia que a liga em questão apresentará boa resistência mecânica, já que com o refino dos grãos haverá maior quantidade de contornos de grãos que impedirão a movimentação das discordâncias.

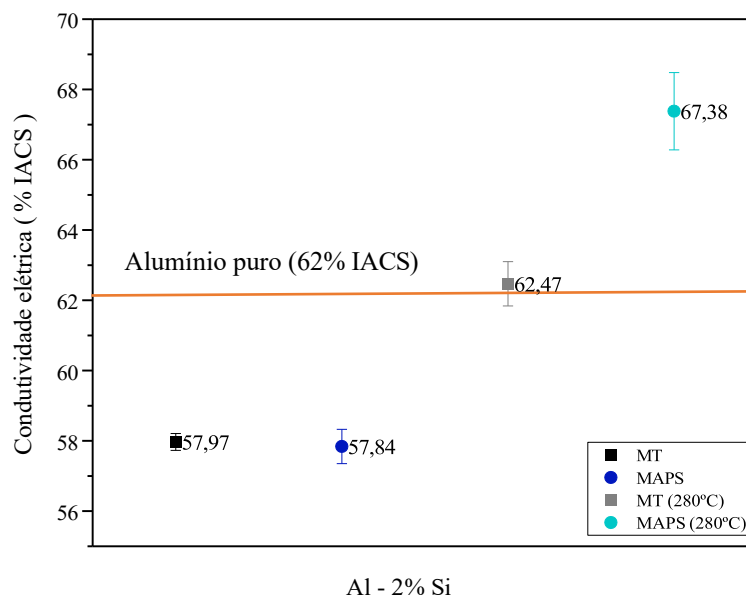
Já na Figura 28 (b) houve a formação de uma estrutura mais complexa onde é evidente as três zonas, sendo a zona coquilhada quase que imperceptível; a zona colunar é bastante evidente mostrando que o calor foi extraído por condução em direção à parede do molde

gerando grãos colunares até que ocorreu um bloqueio devido a zona super-resfriada à frente da colunar, iniciando-se a formação dos grãos equiaxiais.

## 4.2 Caracterização elétrica

Na Figura 29, tem-se o gráfico apresentando o resultado da a condutividade elétrica das ligas para diferentes metodologias estudadas (MT e MAPS), inclusive as ligas tratadas e não tratadas termicamente.

**Figura 29** – Gráfico da condutividade elétrica das ligas de Al-2% Si.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

De acordo com a norma estabelecida pela IACS, as ligas metálicas utilizadas para fins elétricos devem apresentar valor mínimo de 54,71% IACS, dessa forma, a partir do gráfico da Figura 29, pode-se constatar que todas as ligas podem ser utilizadas para essa aplicação, devido apresentarem valor superior ao estabelecido. Por outro lado, comparando a condutividade elétrica do alumínio puro (62 % IACS, listada na reta laranja no gráfico da Figura 29), as ligas sem tratamento não atendem ao requisito da norma e mostram que somente o silício não foi suficiente para aumentar esta propriedade. Do ponto de vista de Filho (2021), alguns semicondutores influenciam na movimentação dos elétrons e esse fator possivelmente ocorreu na liga em estudo, reduzindo sua condução elétrica.

Dentre as quatro ligas estudadas, somente as ligas que passaram pelo tratamento térmico igualaram e superaram a condutividade elétrica do alumínio puro que é próximo de 62% IACS. Cunha *et. al* (2018) menciona em seus estudos que as discordâncias atuam como obstáculos que impedem a passagem dos elétrons e que a partir de um tratamento térmico é possível reduzir a ação, aumentando esta propriedade elétrica. A partir disso, foi possível afirmar que as ligas tratadas tiveram uma redução nos emaranhados das discordâncias e isso pode ter contribuído para o aumento da condução elétrica das ligas MT e MAPS.

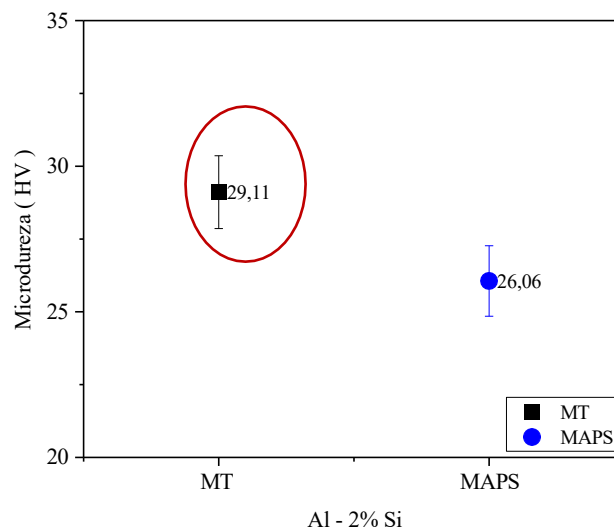
Quanto aos métodos estudados, Método Tradicional e Método Adição Pó de Silício, identificou-se que a forma do silício (grãos e pó) não teve influência no ensaio de resistividade, visto que as ligas sem tratamento térmico apresentaram resultados com a diferença de 0,13% IACS, comprovando que o método não influenciou. Vale ressaltar que o aumento dessa propriedade foi possível somente a partir do tratamento térmico.

### 4.3 Caracterização mecânica

#### 4.3.1 Ensaio de microdureza

Com os resultados obtidos, calculou-se a média e o desvio-padrão do ensaio de microdureza. A seguir são apresentados duas Figuras mostrando gráficos da microdureza dos corpos de prova, sendo o primeiro ilustrado na Figura 30 registrando o resultado da microdureza obtida na peça retirada do lingote antes da usinagem e conformação plástica.

**Figura 30** – Microdureza realizada nas amostras sem deformação plástica.

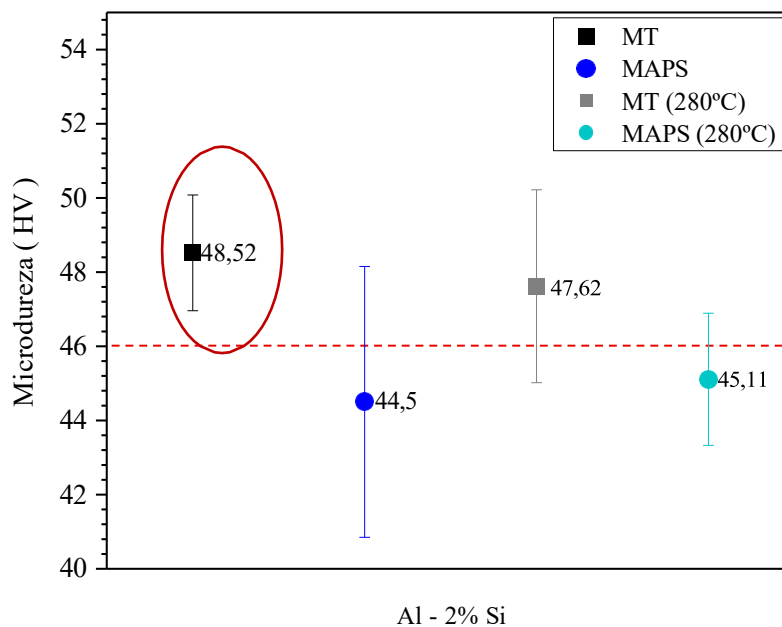


Fonte: Autoria própria (2025).

Com a análise do gráfico da Figura 30, identificou-se a diferença de aproximadamente 3,05 HV entre as ligas em questão, sendo a liga do método tradicional a com melhor microdureza, apresentando microdureza de 29,11 HV. De acordo com Callister (2020), este fator se deve a macroestrutura da liga, observa-se que a liga do MT que apresentou grãos refinados e este fator colabora com o aumento da resistência do material, pois grãos equiaxiais tendem apresentar uma resistência elevada devido ao maior número de contornos de grãos que se apresentam como barreiras na movimentação das discordâncias.

No gráfico apresentado na Figura 31, têm-se as ligas que foram conformadas mecanicamente sem tratamento e as que foram submetidas ao tratamento térmico.

**Figura 31** – Microdureza realizada nos fios com deformação plástica.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Primeiramente, nota-se que a microdureza das ligas sem tratamento térmico aumentou consideravelmente comparadas as mesmas ligas antes da laminação. De acordo com Santos (2019), esse aumento é ocasionado pelo encruamento que a liga sofreu ao ser conformada mecanicamente e causou dificuldade na movimentação das discordâncias, aumentando a dureza da liga, nesse caso, a liga Al-2%Si MT sem tratamento térmico com valor de 48,52 HV (valor circulado no gráfico da Figura 31).

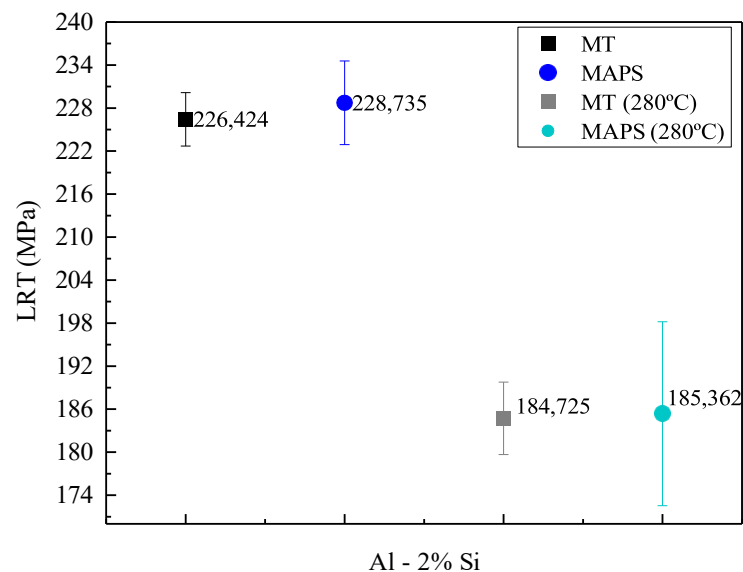
A liga do MT tratada a temperatura de 280 °C sofreu redução (quando comparada a liga sem tratamento do MT) na dureza de 0,90 HV, e de acordo com Santos (2017) essa queda ocorre

porque algumas ligas de alumínio podem apresentar baixa resistência mecânica após serem submetidas a altas temperaturas e de acordo com Dieter (1981) provavelmente ocorreu a recristalização dos grãos e a redução na densidade das discordâncias sendo eliminado também os efeitos do encruamento, além de haver a formação de novos grãos, possivelmente maiores e isto afetou diretamente a dureza da liga. Por outro lado, a liga do MAPS tratada termicamente apresentou um aumento de 0,61 HV (quando comparada a liga MAPS sem tratamento térmico), de acordo com os estudos de Freitas (2014), pode-se dizer que isso ocorreu devido a alteração da microestrutura inicial da liga após o tratamento térmico e ter o aumento na resistência, ainda Freitas (2014), diz que a mesma liga pode ser submetida às mesmas condições de tratamento e ainda assim apresentar diferentes resultados. Ressalta-se que a liga do MAPS apresentou grãos colunares e poucos equiaxiais que possivelmente foram modificados no processo de laminação e posteriormente no tratamento térmico fazendo com que sua dureza aumentasse. É importante mencionar que ao se tratar de valor absoluto as ligas apresentaram valores diferentes, porém, tratando-se de valores estatísticos as ligas mostraram valores na mesma escala (devido o desvio padrão apresentado).

#### 4.3.2 Ensaio de tração

Após a obtenção dos dados no ensaio de tração, montou-se o gráfico de LRT (Limite de Resistência a Tração) que está mostrado na Figura 32. O gráfico apresenta a tensão máxima (em MPa) para cada corpo de prova.

**Figura 32** – LRT das ligas de Al-2%Si.

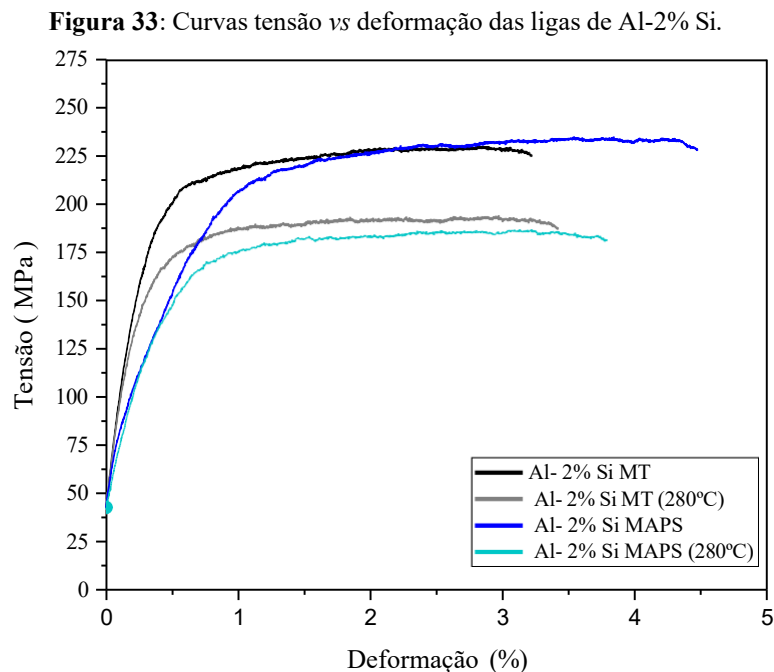


**Fonte:** Autoria própria (2025).

Após análise, identificou-se que as ligas sem tratamento térmico apresentaram um limite de resistência a tração superior às ligas tratadas, esse fator se deve, segundo Santos (2021), ao encruamento que as ligas sem tratamento sofreram no processo de laminação, uma vez que com o aumento do grau de deformação a frio também se eleva a resistência mecânica. Silva (2017) também menciona em sua literatura que com o trabalho a frio ocorre o aumento da densidade e multiplicação das discordâncias, ou seja, cresce a dificuldade das movimentações e por consequência aumenta a tensão. Santos (2019), ainda diz que a microestrutura do material se altera com o processo de conformação a frio, então, com isso é possível dizer que a microestrutura da liga MAPS sem tratamento foi alterada e por isso apresenta maior LRT de todas as ligas ensaiadas.

Por outro lado, nota-se que as ligas que sofreram tratamento térmico sob temperatura de 280 °C apresentam LRT inferior às ligas sem TT. Isso sugere que ocorreu o alívio das tensões internas das ligas com tratamentos, visto que essas apresentaram redução em seu LRT.

Na Figura 33 são apresentadas as curvas de tensão real *versus* deformação real de todas as ligas com e sem tratamento térmico.



**Fonte:** Elaborado pela autora (2025).

A partir da análise da Figura 33, percebe-se que as ligas com maior tensão foram as ligas sem tratamento térmico, em especial, a liga com a inserção do silício em pó que mostrou uma tensão de aproximadamente 232 MPa e deformação real de aproximadamente 5%. Por outro

lado, as ligas tratadas termicamente mostraram grande perda de tensão, Verran (2005 *apud* Rodrigues, 2015, p. 23) aponta que o fator disso acontecer se deve a possíveis alívios de tensões ocorridas no processo de recristalização, causada pelo tratamento térmico que diminuiu a resistência mecânica.

Com o gráfico também se nota que as ligas contendo adição de silício em pó foram as ligas que apresentaram maior ductilidade, possivelmente esse fator se deve a macroestrutura inicial da liga, apresentada na Figura 28 b, onde se tem grãos mais grosseiros que de acordo com Bresciane Filho (2011) um dos influenciadores nas propriedades mecânicas dos metais são o tamanho e formato dos grãos e tratamentos térmicos posteriores. Com isso, levando em consideração a análise da macroestrutura, pode-se dizer que a ductilidade desta liga se deve a sua morfologia inicial. E apesar do tratamento térmico realizado ainda assim não afetou diretamente na sua alta capacidade de deformação.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos e discutidos, o presente trabalho atendeu ao objetivo que consistia em avaliar as ligas de Al-2% Si, a partir das análises macrográficas e ensaios de materiais, e a possível influência da granulometria do elemento ligante, silício. Com isso de modo geral, pode-se dizer que:

- Foi possível observar os grãos nas ligas fabricadas e a partir disso constatar que a liga do método tradicional apresentou grãos refinados e isso remete que o material apresentou uma elevada resistência mecânica, podendo ser aplicado em produtos que exigem alta dureza e esforços tracionados. Por outro lado, a liga utilizando silício de baixa granulometria mostrou grãos colunares e equiaxiais que competem a materiais onde a resistência não é uma exigência.
- Na condutividade elétrica não houve diferença significativa entre os métodos estudados nas ligas sem tratamento térmico. Por outro lado, após o tratamento térmico, a liga com maior desempenho e que poderia ser aplicada para produção de cabos de transmissão de energia seria a liga com silício com a granulometria de 200 *mesh*.
- Quanto a dureza do material, as ligas não mostraram diferença significativa, tanto para as ligas tratadas e não tratadas termicamente, portanto, ambos os métodos seriam viáveis para um material que necessitasse tal grau de dureza.
- No LRT as ligas sem tratamento térmico foram as que suportaram maior tensão.
- Quanto a deformação plástica dessas ligas antes de suas rupturas, as ligas do MAPS com e sem tratamento térmico se destacam por apresentarem alto grau de deformação quando comparada as demais ligas estudadas. Comprovando a influência das características dos grãos.

- Sobre o tratamento térmico aplicado nas ligas, percebeu-se a sua contribuição na redução do limite de resistência a tração, causado possivelmente pelo alívio de tensões internas.
- Por fim, após todas as análises e ensaios concluídos e discutidos utilizando diversas literaturas, percebeu-se que a maneira como o silício foi inserido antes ou depois da fusão do alumínio não interferiu bruscamente nos valores das propriedades mecânicas das ligas sem tratamento térmico, no entanto, ao realizar o tratamento térmico nas ligas, percebeu-se que houve mudanças nas propriedades elétricas e mecânicas.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Para possíveis estudos e pesquisas futuras, são sugeridas as seguintes questões:

- Analisar a microestrutura das amostras por meio do MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) com EDS;
- Analisar a região da fratura dos corpos tracionados;
- Analisar a inserção de outros elementos de liga.

## REFERÊNCIAS

- ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Características químicas e físicas**. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em 28 nov. 2025.
- ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do alumínio: tratamento térmico do alumínio e suas ligas**. 2 ed. São Paulo: ABAL, 2011. 152 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 209**. Alumínio e suas ligas – Composição química. ABNT. 2010. 4p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5118**. Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos. Rio de Janeiro, ago. 2007.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6810**. Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6815**. Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago.1981.
- ALUMÍNIO BRASILEIRO EM DESTAQUE NA CP30. **Revista Alumínio: conteúdo, inovação, tecnologia e sustentabilidade**. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/aluminio-brasileiro-em-destaque-na-cop30/>. Acesso em: 21 abril 2025.
- BRESCIANE FILHO, E. **Seleção dos Materiais não Ferrosos**. 2 ed. Campinas: UNICAMP, 1997.
- BRESCIANE FILHO, E. et al. **Conformação plástica dos metais**. São Paulo: EPUSP, 2011. Disponível em: [www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf). Acesso em 02 ago. 2025.
- CALLISTER JR., W. D., RETHWISH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10 ed. LTC, 2020.
- CASANOVA, A. M. B. **Recristalização em Chapa de Alumínio 7475 Deformada Severamente Via Laminação Assimétrica e Acumulativa**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. 1 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COBDEN, Ron; ALCAN; BANBURRY. Aluminium physical properties, characteristics and alloys. 1994.

COLUCI, Marcelo Araujo Pinto. **Tratamento de modificação de eutético da liga AA356**. 2011. 85 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) – Universidade Paulista, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118707/coluci\\_map\\_tcc\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118707/coluci_map_tcc_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 24 fev. 2025.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª edição. São Paulo: Blucher, 2008.

CONSTANTINO, Vera R. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**. 2002, v. 25, n. 3. p. 490-498. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000300024>. Acesso em: 19 mar. 2025.

CUNHA, Daniel Fernandes da. **Influência do teor de silício na usinabilidade da liga de alumínio 6351 – avaliada através de força de corte e acabamento superficial**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14901/1/t.pdf> . Acesso em: 10 mar 2025.

CUNHA, Jesus Nazareno Pereira da; LOBATO, Mauro Quaresma; SANTANA, Clóvis Iarlande Oliveira; COSTA, Viviane do Socorro da; QUARESMA, José Maria do Vale. Influência do Tratamento Térmico nas Propriedades Elétrica e Mecânica de uma Liga Al-Fe-Zr. **Tecnologia Metalurgia, Materiais e Mineração**. 2018, V. 15, N2, p. 151-158.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981.

DUARTE, D. F. **Alumínio**. In: ENCONTRO INTERDISCIPLINARES DE MATERIAIS E MOSTRA DE MATERIAIS – ENCIMAT. 2017. Disponível em: <https://www.encimat.cefetmg.br/2017/12/12/aluminio/>. Acesso em: 21 março 2025.

DUARTE, H. A. Ferro – um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1146-1153. 2019. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170443> >. Acesso em: 20 jan. 2023.

EJIOFOR, J.U.; REEDY, R.G. Developments in the processing and properties of particulate Al-Si composites. **Journal of the Minerals, Metals e Materials Society**, v. 49, n. 11, p. 31-37, 1997. Disponível: <https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9711/Ejiofor-9711.html>. Acesso em 22 fev. 2025.

EMPRESAS DA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO ANALISAM O DESEMPENHO EM 2022 E AS EXPECTATIVAS PARA 2023. **Revista Alumínio**: conteúdo, inovação, tecnologia e sustentabilidade, 2023. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/empresas-da-industria-do-aluminio-analisam-o-desempenho-em-2022-e-as-perspectivas-para-2023/>. Acesso em 26 jan 2025.

FILHO, L.H.C. **Estudo e fabricação de termistores de zno dopados com cu por reação de combustão com otimização de eletrodos.** Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

FERRARINI, Cleyton Fernandes. **Microestrutura e propriedades mecânicas de ligas Al-Si hipoeutéticas conformadas por spray.** 2005. 109 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/642/TeseCFF.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 14 jan. 2025.

FERREIRA, J. M. **Tecnologia da Fundição.** 3 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

FREITAS, Paulo Sergio de. **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática.** São Paulo: SENAI-SP, 2014.

FUOCCO, Ricardo; CORRÊA, Edison Roberto. Evolução da microestrutura das ligas Al-Si durante a solidificação. **Abifa: fundição e matérias-primas.** Belo-Horizonte, v. 13, n. 113, p. 66-85, fevereiro, 2010. Disponível em: <https://pt.calameo.com/read/000150569ec9bdd2b3ed2>. Acesso em: 23 fev. 2025.

FUOCCO, Ricardo. Propriedades mecânicas de peças fundidas em ligas Al-Si. **Fundições e Matérias – Primas.** Joinville, SC., n. 198, p. 36-51, maio, 2018. Disponível: <<https://www.abifa.org.br/revista1/index.html#p=56>>. Acesso em 28 jan. 2025.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações.** 2. ed. Campinas: UNICAMP, 2001.

GARCIA, A. et al. **Ensaio dos materiais.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. A sílica e suas particularidades. **Revista virtual de química.** Niterói-RJ, v. 10, n. 4, p. 1018-1038, julho, 2018. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v10n4a19.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da Moderna Manufatura.** 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. 2 v.

HATCH, J. E. **Aluminum Properties and Physical Metallurgy.** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984.

HASKEL, T. **Efeito do Tratamento Térmico de Solubilização na microestrutura e nas Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio A356.** 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado)-Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2009.

HYDRO. **Norsk hydro ASA.** Alumínio. 2022. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/aluminium/products/bauxita-e-alumina/alumina/>. Acesso em 03 jan. 2025.

HYDRO. **Norsk hydro ASA.** Como é feito o alumínio. 2022. <https://www.hydro.com/pt-BR/aluminium/sobre-aluminio/how-aluminium-is-made/>. Acesso em: 03 jan. 2025.

HYDRO. **Norsk Hydro ASA**. Bauxita: a bauxita é o principal minério de alumínio. <https://www.hydro.com/br/global/aluminium/products/bauxita-e-alumina/bauxita/>. Acesso em: 02 nov. 2024.

ISBAEX, Crismere. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico**. 2014. 58 f. Dissertação (Magister scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

LIMA, João Paulo Perpétuo. **Estudo do Comportamento Mecânico da Liga de Alumínio ASTM/ABNT 1200 em Função das Condições de Solicitação Mecânica**. 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MARANHÃO, Diego Carvalho. **Caracterização Microestrutural e Mecânica de Ligas Diluídas de Alumínio-Tungstênio, produzidas por Solidificação Unidirecional Ascendente em Regime Transiente de Calor**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

METHA. **Silício metálico puro**. Disponível em: <http://www.methatec.com.br/produto-01-20.php>. Acesso em: 23 dez 2025.

MACHADO, Paulo Cordeiro. **Análise da influência dos solutos Zr e Ti sobre as propriedades mecânica, elétrica e de termorresistência de uma liga Al-Cu-Fe-Si destinada a Tx e a Dx de energia elétrica**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

MONDOLFO, L. F. **Aluminum alloys: structure and properties**. London, Boston: Butterworths, 1976. 971 p.

MERCADO DE SILÍCIO METÁLICO – CRESCIMENTO, TENDÊNCIAS, IMPACTO DO COVID-19 E PREVISÃO (2023 -2028). **Mordor Intelligence**, 2023. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/silicon-metal-market>. Acesso em 26 jan 2025.

NAGEM, Nilton Freixo. **Geopolímero a partir de resíduos oriundos da indústria de alumínio para reutilização coprocessamento**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Área de concentração: ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NASCIMENTO, Luíz..G.S. **Influência da adição de nanotubos de carbono nas propriedades mecânicas da liga al-2%ni solidificada direcionalmente**. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2015.

OLIVEIRA, Eduardo Oliveira. **Correlação entre Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Al-Mg Solidificadas Unidirecionalmente**. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Paraíba, 2017.

PARREIRAS, Luís Guilherme Souza. **Avaliação dos esforços de corte no torneamento da liga de alumínio silício (A356) com diferentes anteligas**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Mecânica). – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG, 2014. Disponível em: < <https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Dissertacao%20-%20Luis%20Guilherme.pdf> >. Acesso em 24 jan. 2025.

PIMENTA, Adriene Anita dos Santos, **Influência dos teores de Mg, Sr e Ti nas propriedades mecânicas da liga de alumínio A319**. 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Área de concentração de ciência e desenvolvimento de materiais., Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

PRATES, M.; DAVIES, G.J. **Solidificação de metais e suas liga**. Rio de Janeiro: ED. Livros Técnicos e Científicos, 1978.

PRAZERES, E. R. **Avaliação da modificação da liga base Al – Cu – Fe – Mg por teores de Ni e Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica, a partir de ligas solidificadas em molde “U”**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Área de concentração em Processamento de e Caracterização dos Materiais., ITEC, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

QUADRO, Alexandre Leão; SABARIZ, Antônio Luís Ribeiro; RAPOSO, Marco Túlio. Refino de grão de ligas alumínio- silício com ante-ligas Al-B. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 807-816, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0075>>. Acesso em 26 mar. 2025.

ROSSI, Vilmar Luis. **Influência da composição química e dos parâmetros de processo sobre a resistência à corrosão em peças fundidas usando as ligas de alumínio356 e A356**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004. Disponível em: <https://docplayer.com.br/61664596-Formacao-mestrado-em-ciencia-e-engenharia-de-materiais-dissertacao-de-mestrado-obtida-por-vilmar-luis-rossi-influencia-da-composicao-quimica-e-dos.html>. Acesso em 20 mar. 2025.

RODRIGUES, Gabriel Lopes. **Efeitos dos tratamentos térmicos em ligas de alumínio**. 2015. 40 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, Goiás, 2015. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/EFEITOS%20DOS%20TRATAMENTOS%20TERMICOS%20EM%20LIGAS%20DE%20ALUMINIO.pdf>. Acesso em 23 mar. 2025.

SANTOS, Jânio Geraldo dos. **Determinação das curvas de encruamento por laminação e trefilação do cobre para fins elétricos**. 2021. Monografia (Tecnólogo em Materiais) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: [https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/7133/1/materiais\\_2021\\_2\\_janiogeraldodossantos\\_determinacaodascurvasdeencruamento.pdf](https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/7133/1/materiais_2021_2_janiogeraldodossantos_determinacaodascurvasdeencruamento.pdf). Acesso em 16 jun. 2025.

SANTOS, Matheus Perin; SILVA, Jailson. **Efeito do titânio no espaçamento dendrítico secundário e nas propriedades mecânicas da liga A356**. 2009. Artigo de iniciação científica (Superior Engenharia) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009. Disponível em: <http://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/4973/1/Henrique%20Lazaro%20de%20Oliveira%20Cruz.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2025.

SANTOS, Silvano Vieira dos. **Relação Entre Deformação a Frio, Microestrutura e Comportamento Mecânico da Liga Ti35Nb2,5Sn**. 2019. 125 f. Tese (doutorado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Sergipe, 2019. Disponível em: [https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/11486/2/SILVANDO\\_VIEIRA\\_SANTOS.pdf](https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/11486/2/SILVANDO_VIEIRA_SANTOS.pdf).

SANTOS, Rezende Gomes dos. **Transformações de fases: em materiais metálicos**. São Paulo: Unicamp, 2007. 430 p.

SANTOS, Elinaldo Neves dos. **Fabricação e caracterização da liga de alumínio-silício a partir dos pós elementares de alumínio e silício via metalurgia do pó**. 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/27539/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Elinaldo%20Neves%20dos%20Santos.pdf>. Acesso em 13 fev 2025.

SHABANI, M. O.; MAZAHERY, A.; BAHMANI, A.; P. DAVAMI, P.; VARAHRAM, N. Solidification of A356 Al alloy: experimental study and modeling. **Kovove Mater**, v. 5, n. 49, p. 253–264. 2015.

SCHNEIDER, Guilherme Leal. **Desenvolvimento de uma metodologia numérica para estimativa de espessura de Ledge na produção de alumínio primário**. 2012. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/61135/000862959.pdf?sequence=1>. Acesso em: 03 jan. 2025.

SILVA, Bruno Arruda. **Implementação de Método Numérico Multidimensional para Determinação de Parâmetros de Encruamento de Materiais Dúcteis por Ensaio de Tração**. 2017. 84 f. Relatório (Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/18789/1/2017\\_BrunoArrudaDaSilva\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/18789/1/2017_BrunoArrudaDaSilva_tcc.pdf). Acesso em: 16 jun. 2025.

SILVA, Hanathanya Rocha da. **Avaliação da Influência dos nanotubos de Carbono nas Propriedades da Liga Al-2%Si**. 2022. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, 2022.

SOARES, Gloria. **Fundição: Mercado, Processo e Metalurgia**. Rio de Janeiro: Coppe/Ufrj, 2000. 116 p.

SOUSA, Marcelo do Nascimento. **Influência das propriedades Mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade – foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza dos cavacos**. 2013. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14741/1/InfluenciaPropriedadesMecanicas.pdf> >. Acesso em 24 jan. 2025.

SOUZA, José Raelson Pereira de. **Efeito da sinterização e da moagem de alta energia na microestrutura e nas propriedades mecânicas em ligas de alumínio recicladas a partir de latas de bebidas**. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado Em Ciência e Engenharia de Materiais) –

Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Tecnologia, Rio Grande do Norte, 2017.

TÂMEGA, Fábio. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Editora e Distribuidora SA, 2017.

WARMUZEK, Matgorzata. **Aluminum-silicon casting alloys: atlas of microfractographs**. United States of America: ASM International, 2004. 124 p.