



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
*CAMPUS* UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ELINALDO SILVA CALDAS

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURAL DE ALUMÍNIO  
RECICLADO DE EMBALAGEM PÓS CONSUMO DE BEBIDAS**

ANANINDEUA  
2019

ELINALDO SILVA CALDAS

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURAL DE ALUMÍNIO  
RECICLADO DE EMBALAGEM PÓS CONSUMO DE BEBIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia – Ênfase em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Msc. Alacid do S. Siqueira Neves.

Coorientador: Prof. Dra. Raimunda F. da S. Maia.

**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)**

---

C145c Caldas, Elinaldo Silva  
Caracterização química e microestrutural de alumínio reciclado  
de embalagem pós consumo de bebidas / Elinaldo Silva Caldas. —  
2019.  
57 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Alacid do S. Siqueira Neves  
Coorientador(a): Prof. Dr. Raimunda F. da S. Maia  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ciência  
e Tecnologia, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade  
Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

1. Reciclagem. 2. Caracterização. 3. Ligas de alumínio. 4.  
Fundição. I. Título.

CDD 620.11

---

ELINALDO SILVA CALDAS

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURAL DE ALUMÍNIO  
RECICLADO DE EMBALAGEM PÓS CONSUMO DE BEBIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia – Ênfase em Tecnologia Mineral.

Data da Avaliação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Msc. Alacid do Socorro Siqueira Neves  
(FEMAT - UFPA - Campus Ananindeua - Orientador)

---

Prof. Dra. Raimunda Figueiredo da S. Maia  
(PRODERNA – ITEC - UFPA – Coorientador)

---

Prof. Dr. Daniel José Lima de Sousa  
(FACET- UFPA – Campus Ananindeua –Membro Interno)

---

Bel. Brenda Thayssa Figueira Daniel  
(PPGEM - ITEC - UFPA – Membro Externo)

*“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.”*

(Bill Gates)

## AGRADECIMENTOS

Louvo e agradeço a Deus por me conceder a força e coragem para nunca desistir, minha eterna gratidão por seu infinito amor na minha vida.

Agradeço a Nossa Senhora, Maria, mãe de Jesus, por sua constante intercessão. Obrigado por sempre levar minhas orações a Deus e por não me desamparar nos momentos mais difíceis, *totus tuus Mariae*.

Aos meus pais, José Edinaldo e Maria Eliete, pela paciência, incentivo, pelo investimento na minha educação e por sempre lutarem pela nossa família e nunca desistiram de cada um de nós. Agradeço a Deus pelo amor, cuidado e carinho que sempre tiveram comigo.

Aos meus irmãos Eliakim Caldas, Ediane Caldas, Emerson Caldas e Bruno Caldas por toda parceria, momentos de risadas, cuidado e incentivo durante todo esse trajeto e por sempre estarem do meu lado, amo vocês.

A todos os amigos que fiz durante minha jornada na UFPA, Brenda Daniel, Yukio Okada, Genesis Carneiro, Maurício Carvalho e tantos outros. Em especial a Larissa Afonso e Elienay Magalhães, que me ajudaram de todas as maneiras para a conclusão desse trabalho.

Ao meu Orientador Professor Msc. Alacid Neves, que abriu as portas para minha ideia, que abraçou o projeto, me incentivando e fazendo acreditar que era possível.

A minha coorientadora, Raimunda Maia, que me fez experimentar de sua maternidade, ao me orientar com tanto amor, me ensinando com paciência, mostrando o caminho que eu devia seguir, mesmo em tantas vezes que falhei não me deixou só, e ficou ao meu lado e me mostrou a beleza da docência, meu muito obrigado.

Ao Laboratório de Engenharia Mecânica, por ter me disponibilizado equipamentos e estrutura para a realização desta pesquisa.

Ao Laboratório de Metalografia do Grupo de Pesquisa GPEMAT, da Faculdade de Engenharia Mecânica, e em especial a Marcus Wanderley e Patrick Honorato, pela disponibilidade de desenvolver as ligas, os ensaios necessários, e por toda a ajuda que foi tão preciosa para o desenvolvimento do meu trabalho laboratorial.

Ao PRODERNA pelo suporte na realização de todo o projeto, de modo particular aos técnicos Inaldo e Jamile Rocha por toda ajuda ao longo desse ano.

Ao Laboratório de Engenharia Química, pelo suporte e estrutura concedidos.

A UFPA, campus Ananindeua em especial a Faculdade de Ciência e Tecnologia.

A Alubar Metais e Cabos S.A, obrigado por todo suporte oferecido ao abrir as portas da empresa, nos ajudando diretamente na conclusão desse trabalho.

Ao Secretário do curso de Ciência e Tecnologia, Josivan França, pela amizade e por ser um profissional com tanta empatia por cada aluno.

Aos meus amigos da Paróquia Divino Espírito Santo em especial o grupo de coroinhas, que tanto ajudou no meu crescimento, no trabalho em equipe e na vontade de servir a Deus. E também aos meus amigos Thamires Ribeiro, Igor Cerbino, Cleciciane Gomes por todos esses anos de amizades, por sempre estarem ao meu lado, obrigado por serem esses amigos/irmãos.

A todos os meus amigos da Comunidade Católica Shalom, a qual tenho um grande carinho por tudo que vivi ao lado de cada um, através de cada grupo que já fiz parte *Totus Tuus*, Israel e Teshuvá, obrigado pela intercessão de vocês. E de modo particular ao meu grupo “*o conselho*” Giselle Brasil, Nathy Correa e Phablo Costa que durante 2019 foram pessoas que realmente estiveram ao meu lado, obrigado pelas risadas, convivências que tive ao lado de vocês e pelas orações.

E por fim agradeço a todos que contribuíram diretamente e indiretamente a conclusão desse projeto, meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A responsabilidade ambiental é caracterizada por um conjunto de atitudes voltadas para o desenvolvimento sustentável do planeta, entre essas atitudes está a reciclagem. O material utilizado neste trabalho foi um lingote obtido da reciclagem de alumínio, oriundo de latas pós-consumo da indústria de bebidas, liga de alumínio AA3004 série 3XXX. Foi realizada a coleta seletiva a fim de se obter a matéria prima necessária para a realização da caracterização metalográfica. As amostras da matéria prima foram devidamente preparadas e analisadas via MEV. O material coletado foi cominuído e submetido à refusão, obtendo-se um lingote. Amostras do lingote foram preparadas para análise da microestrutura através do microscopia óptica e eletrônica de varredura. Para a caracterização química foram utilizadas as técnicas de espectrometria de emissão ótica, espectrometria de fluorescência de raios X e a técnica de espectroscopia de raio x por dispersão em energia (EDS) e para caracterização mecânica foi realizado o ensaio de microdureza. Foi obtido 272 g de material reciclado, e observada a microestrutura dendrítica e a composição química apresentou pouca variação em relação a liga da série 3xxx. A média para quinze pontos para o ensaio de microdureza foi de 41,08 Hv.

**Palavras-chave:** Reciclagem. Caracterização. Ligas de Alumínio. Fundição.

## **ABSTRACT**

Environmental responsibility is characterized by a set of attitudes towards sustainable development of the planet, among these attitudes is recycling. The material used in this work was an ingot obtained from aluminum recycling, from post-consumer cans of the beverage industry, recycled AA3004 aluminum alloy series 3XXX. Selective collection was performed in order to obtain the necessary raw material for the metallographic characterization. The samples were properly prepared and analyzed by SEM. An ingot was also obtained after the casting process and after this procedure the ingot was submitted to microhardness and metallography testing through sanding, polishing and chemical etching in order to observe the microstructure of the ingot through the optical microscope, as well as to analyze morphology with the aid of SEM, quantitative chemical characterization through EDS and qualitative analysis of chemical elements using FRX.

**Keywords:** Recycling. Characterization. Aluminum Alloys. Foundry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de Mineração da Bauxita .....	19
Figura 2 - Etapas do Refino da Alumina .....	20
Figura 3 - Etapas do Processo Hall-Héroult .....	21
Figura 4 - Diagrama esquemático do Processo Hall-Héroult .....	21
Figura 5 - Ciclo de vida da lata.....	26
Figura 6 - Ilustração esquemática das estruturas macroscópicas de um lingote fundido com transição colunar/equiaxial .....	29
Figura 7 - Representação esquemática do crescimento de grãos, zona coquilhada e surgimento da zona colunar .....	30
Figura 8 - Ilustração do aspecto morfológico de crescimento dendrítico unidirecional e multidirecional .....	31
Figura 9 - Fluxograma das etapas da pesquisa.....	33
Figura 10 - Higienização da amostra (a); secagem da amostra (b).....	34
Figura 11 - Aparelho utilizado no ensaio (a); base da lata (b); corpo de prova depois da realização do ensaio (c).....	35
Figura 12 - Material cominuído (a), recipiente de lata para o material cominuído (b) e prensa hidráulica (c).....	36
Figura 13 - Forno tipo mufla utilizado na fundição.....	36
Figura 14 - Cadinho preparado para fundição .....	37
Figura 15 - Injeção de ar argônio (a) obtenção do lingote (b) .....	38
Figura 16 - Cortadora CMR-60 (a) esquema e corte do lingote (b).....	39
Figura 17 - Amostra facetada (a), Espectrômetro (b) e amostra ensaiada (c).....	40
Figura 18 - Laminador duo elétrico Menac (a), Preparação para o corte em disco (b) Amostra higienizada por ultrassom(c) .....	41
Figura 19 - Politriz metalográfica (a), peça polida (b).....	42
Figura 20- Esquema de corte na amostra para análise metalográfico (a); peças cortadas (b); peças embutidas para preparação metalografica e análise (c) .....	43
Figura 21 - Microscópio óptico.....	44
Figura 22 - Microscópio eletrônico de varredura .....	44
Figura 23 - Microdurômetro .....	45
Figura 24 - Micrografia da matéria prima e um espectro .....	47

Figura 25 - Lingote .....	47
Figura 26 - Macroestrutura do lingote .....	50
Figura 27 - Microestrutura do material reciclado, sentido longitudinal 50x (a) e 100x (b).....	51
Figura 28 - Microestrutura do material reciclado, sentido transversal 50x (a) e 100x (b).....	51
Figura 29 - Microestruturas bruta de fusão do material reciclado .....	52
Figura 30 - Micrografia e espectro no contorno do braço dendrítico .....	52
Figura 31 - Gráfico dos resultados da microdureza e imagem dos pontos analisados. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do Alumínio.....	18
Tabela 2 - Nomenclatura das ligas de alumínio. ....	23
Tabela 3 - Limites de composição química em percentagem.....	32
Tabela 4 - Composição química da matéria prima.....	43
Tabela 5 - Composição química do material reciclado em %.....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL- Associação Brasileira do Alumínio

ABRALATAS- Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio

ASTM- American Society for Testing and Materials

EEO- Espectrometria de Emissão Ótica

EDS- Espectroscopia de raios X por dispersão em energia

FRX- Espectrometria de fluorescência de raios X

IAI- International aluminium institute

ITEC- Instituto de Tecnologia

LABEM- Laboratório de Engenharia Mecânica

LCAM- Laboratório de Caracterização de Materiais da Amazônia

LEQ- Laboratório de Engenharia Química

MATCAM- Laboratório de caracterização de Materiais na Mineração, Metalurgia e Siderurgia

MEV- Microscópio Eletrônico de Varredura

mm- Milímetro

PRODERNA- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia.

S/L- Sólido e o Líquido

UFPA- Universidade Federal do Pará

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.2.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 ALUMÍNIO .....	19
2.1.1 Obtenção do alumínio primário .....	19
2.1.2 Mineração da Bauxita .....	19
2.1.3 Refino da Alumina .....	21
2.1.4 Redução do Alumínio .....	21
2.2 LIGAS DE ALUMÍNIO .....	22
2.2.1 Liga de Al-Mn (3xxx ou 3xx.x) .....	23
2.3 FABRICAÇÕES DAS LATAS DE ALUMÍNIO .....	23
2.4 RECICLAGEM DO ALUMÍNIO NO BRASIL .....	25
2.5 FUNDIÇÃO .....	26
2.6 SOLIDIFICAÇÃO .....	28
2.6.1 Estruturas de solidificação .....	29
2.6.2 Formação da Macroestrutura .....	29
2.6.3 formação da microestrutura .....	31
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
3.1 MATERIAIS .....	33
3.2 MÉTODOS .....	33
3.3 COLETA SELETIVA .....	34
3.4 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DO MATERIAL COLETADO PARA A CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA. .....	34
3.5 CARACTERIZAÇÃO POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA .....	35
3.6 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA PARA FUNDIÇÃO .....	36
3.6.1 Processo de fundição .....	37
3.6.2 Preparação do Cadinho .....	38
3.6.3 Fundição .....	38
3.7 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	39
3.8 TÉCNICAS DE ANÁLISES QUÍMICAS .....	40

3.8.1 Caracterização por Espectrometria de Emissão Ótica .....	40
3.8.2 Fluorescência de raiosX .....	41
3.8.3 Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS) .....	42
3.9 PROCEDIMENTOS METALOGRAFICO .....	42
3.9.1 Macroestrutura .....	42
3.9.2 Microestrutura .....	43
3.10TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO.....	44
3.10.1 Microscopia ótica (MO) .....	44
3.10.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	45
3.11MICRODUREZA VICKERS .....	46
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1 MATÉRIA PRIMA .....	47
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MATÉRIA PRIMA.....	47
4.3 OBTENÇÃO DO LINGOTE .....	48
4.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ALUMÍNIO RECICLADO .....	49
4.5 MACROESTRUTURA .....	50
4.6 MICROSCOPIA ÓPTICA (MO).....	51
4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	52
4.8 MICRODUREZA VICKERS.....	54
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O cuidado com o meio ambiente tornou-se pauta do dia, é consenso de que os recursos do planeta devem ser utilizados de maneira sustentável. A responsabilidade ambiental é caracterizada por um conjunto de atitudes voltadas para o desenvolvimento sustentável do planeta, entre essas atitudes está a reciclagem. Pode-se citar como vantagens nos processos de reciclagem a minimização do impacto ambiental, diminuição da poluição no solo, na água e no ar, inclusão social e geração de empregos, redução da energia utilizada no processo (ABAL, 2017).

O processo de reciclagem de alumínio a partir da refusão de latas de bebidas descartadas é uma atividade que vem proporcionando um significativo crescimento em função do avanço no emprego desde tipo de embalagens e da redução dos insumos no consumo de energia relacionados com esta reciclagem em comparação com a produção de alumínio primário, onde se utiliza uma tecnologia de refino eletrolítico que envolve um elevado consumo de energia (VERRAN, 2005).

O processo de reciclagem utiliza apenas 5% da energia elétrica e, segundo dados do *International Aluminium Institute* (IAI), libera somente 5% das emissões de gás de efeito estufa quando comparado com a produção de alumínio primário. O processo diminui o volume de lixo gerado que teria como destino os aterros sanitários. Também estimula a consciência ecológica, incentivando também a reciclagem de outros materiais, seja devido ao seu elevado valor residual ou mesmo por meio de programas de educação ambiental.

Segundo Verran (2005), para a produção de alumínio reciclado utiliza-se apenas 5% da energia utilizada para a produção do alumínio primário. A economia de energia associada com a reciclagem de 1Kg de alumínio representa uma redução no consumo de energia elétrica da ordem de 95% com relação à produção da mesma quantidade de alumínio primário, conforme Voguel (2004), cerca de 1.576 GWh/ano, o que equivale a 0,5% de toda a energia gerada pelo país, suficiente para abastecer uma cidade de um milhão de habitantes.

O alumínio é um metal utilizado na indústria de fabricação de componentes obtidos pelo processo mecânico de estampagem e estiramento como na fabricação de corpo de latas de bebidas, nesse caso, a liga de alumínio AA3004, seu principal elemento de liga é o manganês, mesmo sendo utilizado em pequenos teores (KOLOSOSKI et al., 1998).

Esta liga é classificada como trabalhável não tratável termicamente e suas propriedades mecânicas são melhoradas a partir da formação de solução sólida e / ou deformação a frio (MERCHANT et al., 1990).

Segundo a Associação Brasileira de Alumínio, o Brasil recicla quase toda a sucata disponível, ficando acima da média mundial. Em 2015, o país reciclou 602 mil toneladas de alumínio. Desse total, 292,5 mil toneladas referem-se à sucata de latas de alumínio para bebidas, o que corresponde a 97,9% do total de embalagens consumidas em 2015, índice que mantém o Brasil entre os países líderes em reciclagem de latinhas desde 2001.

As latas de bebidas são fabricadas a partir de três diferentes partes, corpo (liga 3004) que apresenta boa resistência à corrosão, boa conformabilidade e moderada resistência mecânica. A tampa (liga 5182) e anel (liga 5082) (VERRAN, 2005).

Outro fator de destaque quanto à aplicação de alumínio está em embalagens para líquidos, como refrigerantes e outras bebidas. Neste ramo de emprego deste metal é forte a logística de reciclagem. Tal atividade gera emprego e renda para milhares de trabalhadores no Brasil, sendo que o país é líder mundial na reciclagem desse material (FORTUNA et al., 2012). Por possuir alto valor agregado na sua revenda para sucatarias em relação aos demais materiais como, por exemplo, ferro, plástico, papel, entre outros.

Sua utilização mostra bem a importância para a economia no mundo atual. Em vários setores da indústria, como na área de transporte, construção civil, equipamentos elétricos e de transmissão de energia, o alumínio se faz presente. Também se encontra em móveis, eletrodomésticos, brinquedos, utensílios de cozinha, latas e produtos farmacêuticos (CONSTANTINO, 2002).

O minério de importância industrial para obtenção do alumínio metálico e de muitos compostos de alumínio é a bauxita (formada em regiões tropicais e subtropicais), onde que seu principal componente é a alumina ( $Al_2O_3$ ) (FORTUNA et al., 2012).

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo Geral

Caracterização química, macro e microestrutural de alumínio reciclado do corpo de latas de alumínio utilizadas na indústria de bebidas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Coleta das latas de alumínio e cominuição;
- Caracterização qualitativa e semi quantitativa da matéria prima utilizada;
- Obtenção de um lingote de alumínio reciclado pela rota pirometalúrgica;
- Caracterização química qualitativa e semi quantitativa do alumínio reciclado;
- Caracterização macro e microestrutural do alumínio reciclado;
- Ensaio mecânico de microdureza do alumínio reciclado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado os temas, baseados na literatura, sobre os processos de obtenção do alumínio, assim como suas propriedades, aplicações e reciclagem. Dando ênfase a liga AA3004(Al-Mn-Mg). Serão abordados também os métodos de caracterização micro estrutural e a reciclagem a partir da fusão de embalagens de alumínio pós-consumo da indústria de bebidas

### 2.1 Alumínio

O alumínio possui estrutura cristalina CFC e densidade de 2,69 g/cm<sup>3</sup> na forma pura, características que podem ser modificadas quando aplicada na forma de ligas. O ponto de fusão do alumínio é 660 °C, quando comparado a outros metais é relativamente baixo, com a adição de elementos de liga o ponto de fusão varia em função do soluto (ABAL, 2017).

O alumínio é bastante dúctil e apresenta resistência mecânica e dureza relativamente baixas, característica limitante para algumas aplicações (CALLISTER, 2012). Na Tabela 1 temos as principais características do alumínio em seu puro.

**Tabela1** - Propriedades do Alumínio.

<b>Propriedades Físicas</b>	<b>Alumínio</b>	<b>Unidades</b>
<b>Densidade</b>	2,71	g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
<b>Temperatura de Fusão</b>	660	°C
<b>Módulo de Elasticidade</b>	69000	Mpa
<b>Coefficiente de Expansão Linear</b>	23 x 10 <sup>-6</sup>	m/°C
<b>Condutividade Térmica</b>	0,56	cal/cm °C (25 °C)
<b>Condutividade Elétrica</b>	62	(IACS)%

Fonte: METALS HANDBOOK, 1992.

A capacidade de transferência de energia térmica do alumínio comercialmente puro, mesmo sendo inferior a do cobre, confere sua aplicabilidade na indústria como trocadores e dissipadores de calor. A condutividade elétrica, ainda que inferior ao cobre, é bastante competitiva em aplicações, devido à baixa densidade, apesar da baixa resistência mecânica. Tem refletividade acima de 80%, qualidade que permite ampla utilização em luminárias, por

não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. É um importante elemento de barreira à luz, é também impermeável à ação da umidade e do oxigênio. (ABAL, 2007).

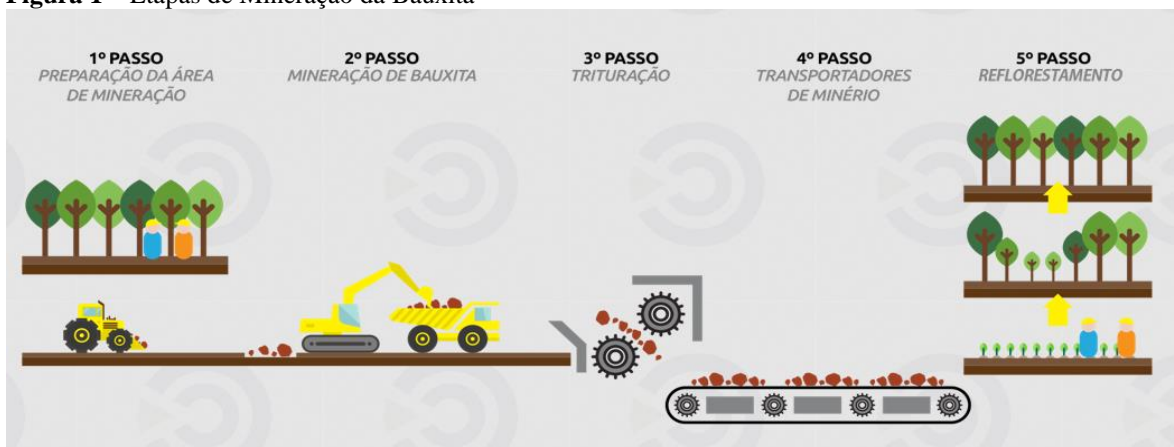
### 2.1.1 Obtenção do alumínio primário

O alumínio não é encontrado diretamente em estado metálico na crosta terrestre. É obtido a partir do minério bauxita, o processo de extração deste minério, assim como dos demais, é uma atividade que provoca intenso impacto do solo e dos corpos hídricos próximos (RECICLOTERRA, 2017).

### 2.1.2 Mineração da Bauxita

O minério da bauxita é constituído por óxido de alumínio hidratado de composições variáveis. A bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) aproveitável para que a produção de alumínio seja economicamente viável. As etapas para mineração da bauxita podem ser visualizadas na Figura 1.

**Figura 1** – Etapas de Mineração da Bauxita

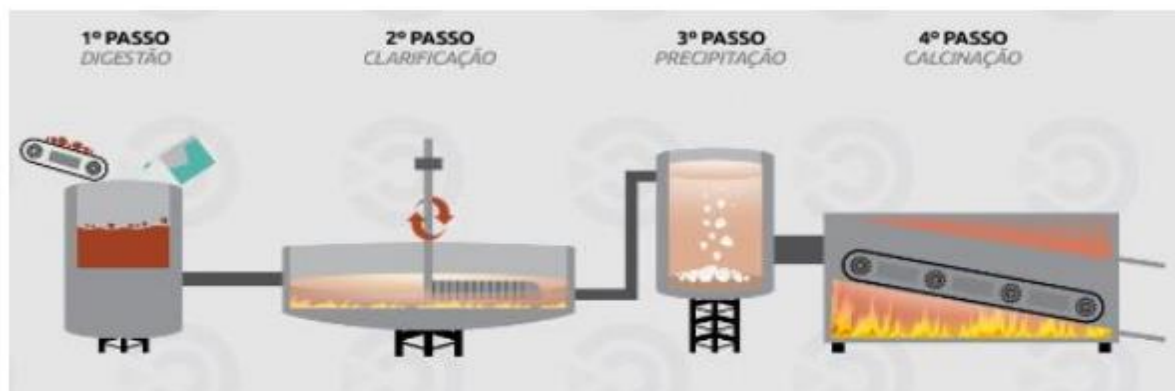


Fonte: BRASIL ALUMÍNIO, 2017.

### 2.1.3 Refino da Alumina

O processo mais utilizado para obtenção de alumina é o Processo Bayer (BRASIL ALUMÍNIO, 2017). Suas etapas podem ser visualizadas na Figura 2.

**Figura 2** – Etapas do Refino da Alumina



**Fonte:** BRASIL ALUMÍNIO, 2017.

O processo Bayer é o principal e o mais econômico método para produção de alumina e alumínio, a partir de bauxitas (gibbsita) com baixa porcentagem de sílica. A bauxita é moída e digerida em *autoclave* com uma solução de hidróxido de sódio, carbonato de sódio e cal. A suspensão e o rejeito, denominado lama vermelha, após a digestão e resfriamento, são separados por sedimentação e filtração. Após a digestão, a suspensão de aluminato de sódio é introduzida em precipitadores, onde germens de gibbsita catalisam a formação de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . O precipitado é separado, lavado e calcinado. As condições de precipitação, tais como tempo, temperatura e condições de nucleação, são importantes no controle da distribuição de tamanho da partícula, textura e pureza do hidróxido produzido. No processo Bayer para cada 2-2,5 toneladas de bauxita tem-se, após a calcinação, aproximadamente 1 tonelada de alumina (BRASIL ALUMÍNIO, 2017).

### 2.1.4 Redução do Alumínio

A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina em um processo conhecido como Hall-Héroult. Ele pode ser dividido basicamente em 5 passos, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

**Figura 3** – Etapas do Processo Hall-Hérault.

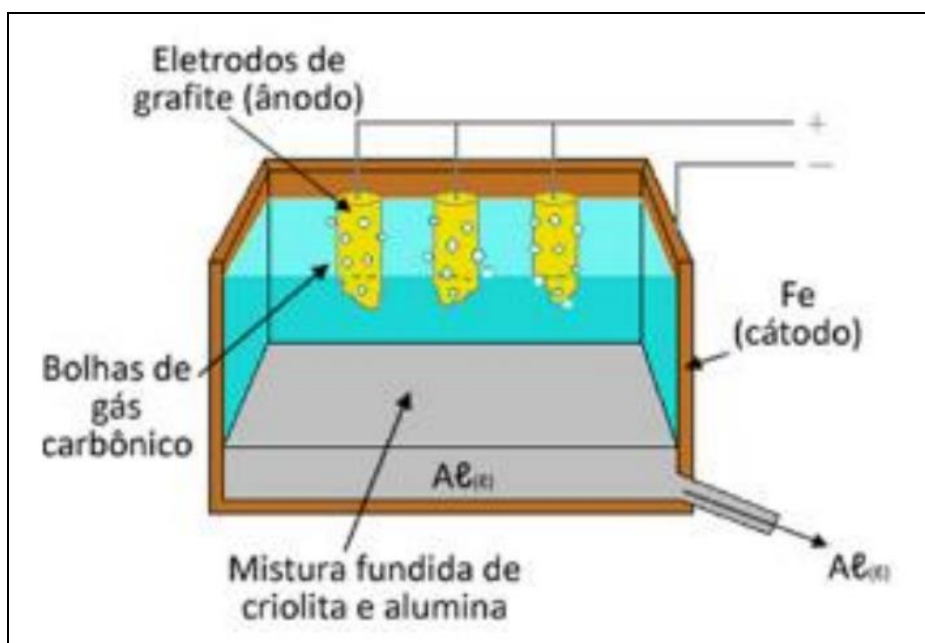


Fonte: BRASIL ALUMÍNIO, 2017.

Este processo consiste em colocar uma mistura fundida da alumina com a criolita ( $Al_2O_3 + Na_3AlF_6$ ) num recipiente feito de ferro ou de aço (liga metálica cujo principal constituinte é o ferro), com eletrodos de carbono (pode ser de carvão ou de grafite) mergulhados nessa mistura. O processo se desenvolve em fornos especiais revestidos de carbono, também chamados de cubas eletrolíticas, que operam a aproximadamente  $960^\circ C$  (BRASIL ALUMÍNIO, 2017).

A cuba possui dois componentes principais: os anodos, dispostos na parte superior, e o cátodo, ou cuba propriamente dita, onde se processa a eletrólise (diagrama da Figura 4).

**Figura 4** – Diagrama esquemático do Processo Hall-Hérault.



Fonte: Mundo do Alumínio (2017).

## 2.2 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio são mais conhecidas por sua baixa densidade quando comparada com a densidade do aço, por exemplo, e também sua alta resistência à corrosão. A condutividade elétrica, facilidade de fabricação e aparência também são características atraentes. Outro ponto forte das ligas de alumínio é sua elevada ductilidade, ficando nítido em processos de laminação de até finas folhas (CALLISTER, 2002).

Embora as ligas não ferrosas sejam usadas na maioria das aplicações metálicas nos projetos atuais de engenharia, as ligas não ferrosas desempenham um papel de grande e indispensável em nossa tecnologia, e a lista delas é longa e complexa (SHACKELFORD, 2014).

As ligas de alumínio por conveniência foram classificadas em dois grupos, dependendo do processo de fabricação, isto é ligas conformadas ou trabalhadas e ligas fundidas. A primeira refere-se às destinadas a fabricação de produtos que envolvem laminação, extrusão, forjamento, trefilação e usinagem. Esses processos são realizados por meio de trabalho mecânico, deformadas plasticamente (a quente ou a frio), que forçam o material a adquirir a forma desejada. A segunda está relacionada às ligas que são destinadas a fabricação de produtos fundidos. Essas são vantajosas para produção de peças complexas com áreas ocas ou tubulares e contornos complexos, ainda nesse processo não há necessidade de acabamentos e nem grandes limitações de forma e tamanho.

O grupo das ligas trabalhadas foi dividido em dois subgrupos, ou seja, o subgrupo das ligas trabalhadas tratáveis termicamente e o subgrupo das ligas trabalhadas não tratáveis termicamente, o mesmo ocorrendo para as ligas fundidas ou para fundição. Na Tabela 2 a nomenclatura das ligas de alumínio

O preparo da liga exige cuidados que podem influir nas propriedades das peças. Na fundição são utilizados fornos de indução e moldes de areia (REIS, 2013). As ligas de alumínio são fundidas em diferentes formatos e a sua composição pode ser diferenciada, para melhor se adequar ao uso que terá. (HYDRO, 2019)

**Tabela 2-** Nomenclatura das ligas de alumínio.

<b>Ligas Trabalhadas</b>	<b>Principal Elemento de liga</b>	<b>Ligas fundidas</b>	<b>Principal Elemento de liga</b>
Série 1xxx	Al	Série 1xx.x	Al
Série 2xxx	Al-Cu	Série 2xx.x	Al-Cu
Série 3xxx	Al-Mn	Série 3xx.x	Al-Mn-Mg
Série 4xxx	Al-Si	Série 4xx.x	Al-Si
Série 5xxx	Al-Mg	Série 5xx.x	Al-Mg
Série 6xxx	Al-Mg-Si	Série 6xx.x	Al-Mg-Si
Série 7xxx	Al-Zn	Série 7xx.x	Al-Zn
Série 8xxx	Al-Li-Sn-Fe	Série 8xx.x	Al-Li-Sn-Fe

**Fonte:** HANDBOOK, 1996.

### 2.2.1 Liga de Al-Mn (3xxx ou 3xx.x)

Neste sistema, o principal elemento de liga é o manganês, contendo também magnésio, ferro e silício, que suprem a formação da solução sólida Al-Mn, e o cromo que estabiliza a fase. Estas ligas não são tratáveis termicamente, portanto são endurecidas por encruamento (trabalho mecânico). A principal característica é a redução da suscetibilidade a corrosão sob tensão, também possui razoável resistência mecânica e conformabilidade. As suas aplicações incluem diversos utensílios domésticos, latas de bebidas, tanques de armazenamento, estruturas arquitetônicas e decorativas (HANDBOOK, 1996)

A liga de alumínio AA3004 (corpo e base da lata) usada na fabricação de latas de alumínio para o armazenamento de bebidas e equivale a 75% do seu peso total (REIS, 2013). Essa liga possui altos teores de manganês e magnésio, além de ferro, silício e cobre. Ela não responde bem à tratamentos térmicos de endurecimento, porém tem alta conformabilidade e alta capacidade de endurecimento por encruamento. Outra característica é a baixa susceptibilidade à corrosão sob tensão (ASTM, 1996).

Teores de Fe e Si até o limite de 0,7% cada, levam ao aumento da resistência mecânica sem diminuir a resistência a corrosão (MARTINS, 2005). A microestrutura é constituída basicamente por uma matriz de Al-alfa (CCC) e outras fases derivadas dos elementos presentes, como intermetálicos do tipo  $Al_6(MnFe)$  (ortorrômbico) e  $Al(MnFe)Si$  (cúbico) (PATROCÍNIO, 2011).

### 2.3 Fabricações das latas de alumínio

Para a fabricação de latas de bebidas, são utilizadas ligas de alumínio de baixa liga, ou seja, que recebem a adição de elementos de ligas em pequenas quantidades para o alcance de das propriedades específicas requeridas, tal como a associação de resistência mecânica com alta ductilidade e estampabilidade. Os elementos dessa liga são o manganês e o magnésio que possui os maiores teores na composição, mas também há outros elementos na composição química geral dessa lata, como o cobre, silício, ferro e zinco. As latas de um modo geral, são formadas por três ligas, são elas: a 3004 que é usada para compor o corpo e a base da lata, e equivale a 75% da massa total, a liga 5182 compõe a tampa (23% da massa da lata) e a liga 5042 que é usada para o anel de abertura que equivale a 2% da massa (REIS, 2013).

A lata de alumínio para bebidas é uma embalagem versátil que permite o desenvolvimento de inúmeras inovações em formatos e impressões, de acordo com as necessidades dos fabricantes de bebidas e dos consumidores e possui a uma estrutura que se divide em três grandes regiões, a flange (parte superior), pescoço (o corpo da lata é estreitado, para acomodar a tampa que é menor) e o corpo constituído de 1% de Mn, 1% de Mg, 0,4% de Fe, 0,2% de Si e 0,15% de Cu (ABRALATAS, 2019).

A fabricação das latas de alumínio é realizada a partir de chapas laminadas com espessura de 0,2 mm, adquiridas de fabricas de alumínio. Para fabricação do corpo da lata, a chapa é colocada na máquina de prensagem (*bodymaker*) que realiza o corte na forma de discos e em seguida, por meio da estampagem, produz os copos rasos. Estes copos rasos passam para outra máquina que promove o estiramento gradual até alcançar o formato final da lata, sendo necessário cortar as bordas para que tenham o mesmo comprimento. A etapa final consiste na lavagem, esterilização e secagem, logo após as latas seguem para impressão do rótulo, onde a aplicação de uma camada externa de verniz garante o brilho e fixação da pintura. As latas são colocadas em forno para secagem e cura do verniz externo, em seguida uma camada interna de verniz é aplicada para que o líquido não entre em contato com a superfície metálica, logo após as latas são colocadas novamente no forno para secagem e cura do verniz interno. O corpo da lata de alumínio rotulado é submetido ao processo de formação do perfil da boca para que a tampa possa ser encaixada e recravada após envasamento. No processo de fabricação da tampa básica, em uma prensa são cortados os discos e posteriormente moldados.

A reborda da tampa é moldada para garantir a recravação e uma boa fixação, além da aplicação de um selante que evita vazamentos. A tampa básica é submetida à formação de relevo, do rebite para sustentação do anel e das linhas para abertura por um processo de conformação rigorosamente controlado (SOUZA, 2017).

## 2.4 Reciclagem do alumínio no Brasil

A reciclagem do alumínio alia uma combinação única de vantagens. Dentre seus benefícios podem ser destacados a importância da atividade nos aspectos sustentável da indústria do alumínio, representado pela economia de energia elétrica e da bauxita, (minério, recurso que origina o alumínio primário), a geração de renda a um número de famílias que vivem da atividade, minimiza a poluição no solo, na água e no ar ( CAMPBELL, 1996; HENSTOCK, 1996; ABAL, 2017; MACHADO et al., 2001; LATASA, 2019). Todos os produtos de alumínio podem ser reciclados latas, esquadrias, painéis, blocos de motor, etc. Em comparação com a produção de alumínio primário, a reciclagem de alumínio tem uma grande vantagem devido ao menor custo de produção (LOGOZAR et al., 2006; ZHOU et al., 2006 ).

Dados da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) mostram que o Brasil é campeão de reciclagem de latas de alumínio desde 2001, reciclando 97,7% das latas vendidas. No processo de reciclagem, após o descarte pós-consumo, as latas são coletadas por catadores que as vendem para cooperativas. Estes, por sua vez, vendem a sucata de latas para grandes indústrias. Ao chegar no Centro de Coleta, o material é prensado e a sucata segue para a fundição, onde passa por equipamentos de alta tecnologia para desfardamento, separação de impurezas e picote do material, e depois é encaminhado para os fornos rotativos e de réverbero onde é fundido a 700°C. Estes produtos atendem a diversos segmentos como indústria automotiva, de bens de consumo. A Figura 5 mostra o ciclo de vida da lata de alumínio que tem uma média de trinta dias (LATASA, 2019).

**Figura 5-** Ciclo de vida da lata de alumínio.



**Fonte:** Latasa (2019).

## 2.5 Fundição

A fundição é um dos procedimentos mais antigos utilizados na produção de artigos de metal e consiste na alimentação do metal líquido na cavidade de um molde com o formato requerido, seguindo-se de resfriamento para produzir o produto desejado após a solidificação. Do ponto de vista de fundição, as ligas de alumínio caracterizam-se pela baixa temperatura de fusão. Por outro lado, esta característica permite uma grande flexibilidade quanto aos tipos de moldes utilizados já que as solicitações térmicas são reduzidas (MOREIRA, 2012).

Os processos de fundição podem ser classificados pelos tipos de moldes e modelos utilizados; moldes de areia (a verde ou aglomerados com resinas ou silicatos), moldes metálicos (fabricados em aços ou ferros fundidos), moldes de gesso, moldes de materiais cerâmicos, fundição de precisão, entre outros.

Os moldes permanentes são fabricados em materiais metálicos, minimizarem os custos de moldagem e permitem a obtenção de excelente acabamento superficial. O custo do ferramental é elevado sendo valido para a aplicação em larga escala. Para séries menores, os processos de areia, gesso e de moldes cerâmicos são mais indicados. Os moldes metálicos apresentam algumas vantagens sobre a fundição em moldes de areia. As principais são: melhor acabamento superficial, melhores tolerâncias dimensionais; permitem reduzir o sobre-metal de usinagem; melhor qualidade microestrutural (e mecânica) devido a maior velocidade de resfriamento; menor necessidade de operações de limpeza e rebarbação dos fundidos. (MOREIRA et al., 2012)

## 2.6 Solidificação

O fenômeno da solidificação é um processo de transferência de calor em regime transitório de extração de calor, que contempla as condições necessárias à transformação de fase líquida na fase sólida (S/L). Nessas condições, o calor latente liberado é removido através do sistema metal/molde, tendo uma relação direta com a velocidade de solidificação, gradientes de temperatura e taxas de resfriamentos, por conseguinte, com a macroestrutura e microestrutura (DIAS FILHO, 2013).

A termodinâmica do processo irá impor uma rejeição de soluto ou solvente devido a um movimento de massas associados à transferência de calor. Essa transferência de calor irá impor condições que determinarão a morfologia de crescimento e o arranjo microestrutural. (GARCIA, 2007).

Quando a solidificação do metal estiver completa, os cristais formados irão possuir diferentes orientações, juntando suas fronteiras formando os contornos de grãos, que são as zonas de contato entre os diferentes cristais formados no metal solidificado. O número de núcleos disponíveis na solidificação afetara diretamente a estrutura do grão metálico. Se o número de pontos de nucleação for relativamente pequeno, a solidificação produzirá uma estrutura com a formação de grãos maiores proporcionados por uma estrutura grosseira. No caso de uma solidificação com um maior número de pontos de nucleação, a formação dos cristais se dará num maior número de pontos formando uma estrutura policristalina, um grão mais fino. A maior parte das ligas de engenharia vazada busca obter uma estrutura de

formação de grão mais fina, já que essa estrutura proporciona uma resistência mecânica e uniformidade mais desejável para os produtos acabados. (ALMADA, 2014).

### 2.6.1 Estruturas de solidificação

De modo geral, as substâncias podem assumir três estados físicos de agregação atômica: gasoso, líquido e sólido. Do estado sólido, por aquecimento, passa-se para o estado líquido, mudança conhecida como fusão, que ocorre em uma única temperatura para componentes puros e geralmente em um intervalo de temperaturas para uma mistura de componente. O caminho contrário ao da fusão por resfriamento é conhecido por solidificação e pode ser entendido como sendo a mudança do estado líquido para o estado sólido de uma substância. Essa mudança tem início com o aparecimento de pequenas partículas de nova fase sólida, que crescem até que a transformação se complete. O aparecimento e o crescimento posterior dessas partículas sólidas caracterizam o modo de formação da microestrutura em metais e ligas metálicas em momentos sucessivos de tal modo que aspectos cinéticos, térmicos, químicos e termodinâmicos estão fortemente relacionados. (GARCIA, 2001)

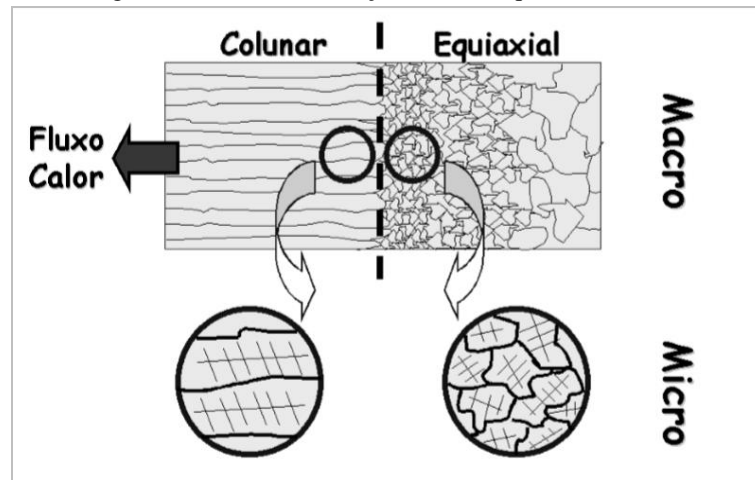
Qualquer processo baseado na solidificação de um metal com o objetivo de produzir-se uma peça sólida deve atender certas exigências, que dependem de sua aplicação futura, e que decorrem de aspectos estruturais e geométricos. Sabe-se que as propriedades finais do fundido dependerão da estrutura solidificada, por consequência dos diversos fatores de processo que a controlam, como o fluxo de calor do metal líquido, propriedades químicas e termofísicas do metal em estudo, condições de vazamento e propriedades do sistema de solidificação. (PEIXOTO, 2009)

### 2.6.2 Formação da Macroestrutura

A evolução da solidificação só é possível devido à ocorrência do processo de nucleação e crescimento dos núcleos formados pelo mecanismo de adição de átomos, originando os grãos cristalinos. A nucleação só ocorre quando a energia cinética de vários átomos do metal líquido atinge um valor suficientemente baixo, permitindo que eles ocupem posições de equilíbrio na rede cristalina. Daí em diante o núcleo continua crescendo à medida que a extração de calor evolui desde que a variação total de energia livre dê condições para a

continuidade do crescimento, caso contrário o embrião sólido volta a se dissolver no líquido (GARCIA, 2001). As estruturas de solidificação podem ser subdivididas em: macroestruturas e microestruturas, como podem ser observadas na ilustração esquemática da Figura 6

**Figura 6** – Ilustração esquemática das estruturas macroscópicas de um lingote fundido com transição colunar/equiaxial.



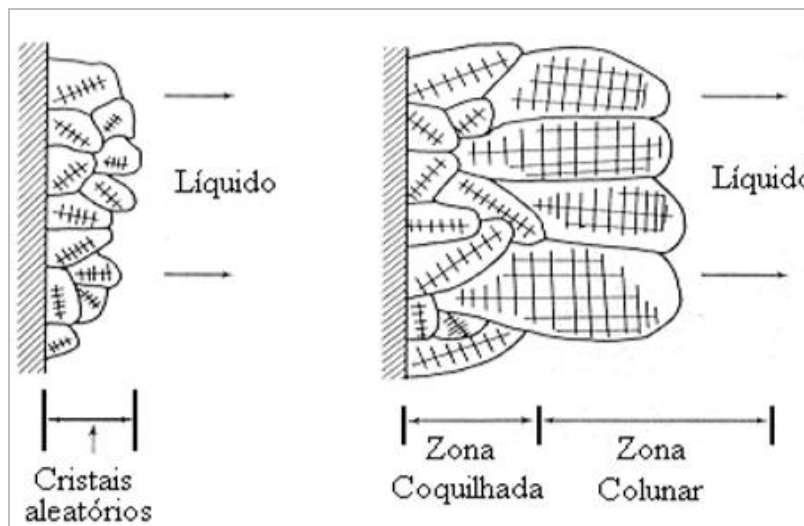
Fonte- GARCIA, 2001.

A formação da macroestrutura tanto nos metais puros, quanto nas ligas metálicas, são semelhantes do ponto de vista macroscópico e no que diz respeito à disposição das estruturas. Essa macroestrutura pode se apresentar em três diferentes morfologias: coquilhada, colunar e equiaxial. As três formações morfológicas podem ocorrer em um fundido, sendo mais comum a ocorrência das estruturas colunar e equiaxial, com uma região de transição abrupta entre elas. Tanto a transição, quanto a formação das outras morfologias dependem das condições operacionais e condições impostas pelo sistema metal/molde. Podem ainda, interagirem em um mesmo fundido, ocupando proporções diferentes, influenciadas fortemente pelas condições de solidificação.

De modo geral, quando o metal líquido é vertido em um molde qualquer, a porção do metal líquido que primeiro entra em contato com as paredes frias da lingoteira é rapidamente superresfriada. Isso ocorrerá tão mais rapidamente quanto maior a difusividade de calor do molde. Nessa fina camada de líquido super-resfriado ocorre uma alta frequência de nucleação dos grãos cristalinos com orientação aleatória. Essa camada de pequenos grãos finamente dispersos e localizados na superfície do lingote é denominada de zona coquilhada. O tamanho dessa zona depende de uma série de fatores dentre os quais se podem citar as propriedades termofísicas do material do molde, o coeficiente de transferência de calor metal/molde, e a temperatura de vazamento do metal líquido (OSÓRIO, 2004).

Após o surgimento de uma primeira casca sólida, os únicos grãos que se desenvolverão serão aqueles que estarão crescendo a partir das paredes do molde e em direção ao líquido. Desses grãos, aqueles que tiverem direções de crescimento mais coincidentes com a direção de extração de calor, ou seja, perpendicularmente à parede do molde, crescerão de forma seletiva porque a direção preferencial de crescimento dendrítico é próxima dessa direção. Os grãos que não tiverem direções favoráveis de crescimento serão bloqueados e impedidos de continuarem a crescer, originando uma região denominada de zona colunar, conforme exibido no esquema da Figura 7 (GARCIA, 2001).

**Figura 7-** Representação esquemática do crescimento de grãos, zona coquilhada e surgimento da zona colunar.



Fonte - GARCIA, 2001.

### 2.6.3 Formação da microestrutura

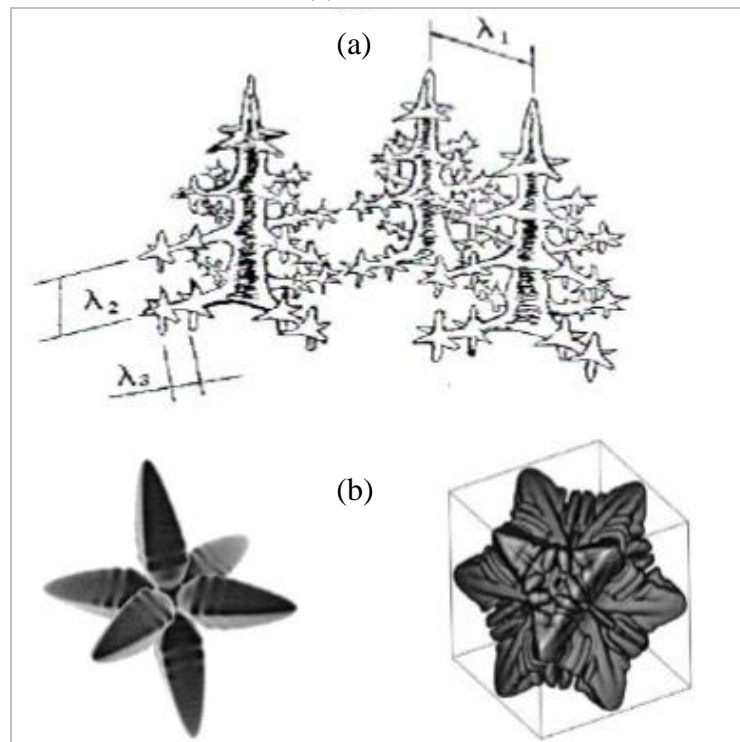
A formação da microestrutura depende das condições térmicas e constitucionais na interface sólido/líquido na interface sólido/líquido durante a solidificação.

Considerando-se um processo de solidificação, em que a retirada da energia térmica do metal líquido ocorre preferencialmente em uma única direção, por intermédio de molde refrigerado, maciço ou pela troca de calor natural com o ambiente, a interface sólido/líquido, difere para metais puros e ligas. No caso dos metais puros, essa interface é estável, desenvolvendo-se de forma plana. No caso de ligas, a interface pode ou não se apresentar

estável dependendo das variáveis térmicas e constitucionais junto a esta interface (OSÓRIO , 2004).

A Figura 8 (a) ilustra condições esquemáticas de um crescimento unidirecional que permitem observar os espaçamentos interdendríticos primário ( $\lambda_1$ ), secundário ( $\lambda_2$ ) e de maior ordem. Na Figura 8 (b) mostra-se uma condição onde não existe uma direção preferencial de fluxo de calor, assim a dendrita cresce de forma multidirecional.

**Figura 8** - Crescimento dendrítico unidirecional (a), crescimento dendrítico é multidirecional (b)



Fonte: OSÓRIO, 2004.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

A matéria prima utilizada para este trabalho foram os corpos de latas de alumínio pós-consumo da indústria de bebidas, que normalmente apresentam em sua composição 1% de magnésio, 1% de manganês, 0,4% de ferro, 0,2% de silício e 0,15% de cobre. Tais valores correspondem à liga de alumínio AA3004, série 3XXX, a Tabela 3 apresenta a composição química em percentagem em peso para essa liga de acordo com a ASM (1992). Os valores apresentados indicam as porcentagens máximas admissíveis como impurezas, com exceção das indicadas por faixas (que representam os elementos de liga).

**Tabela 3** - Limites de composição química em percentagem.

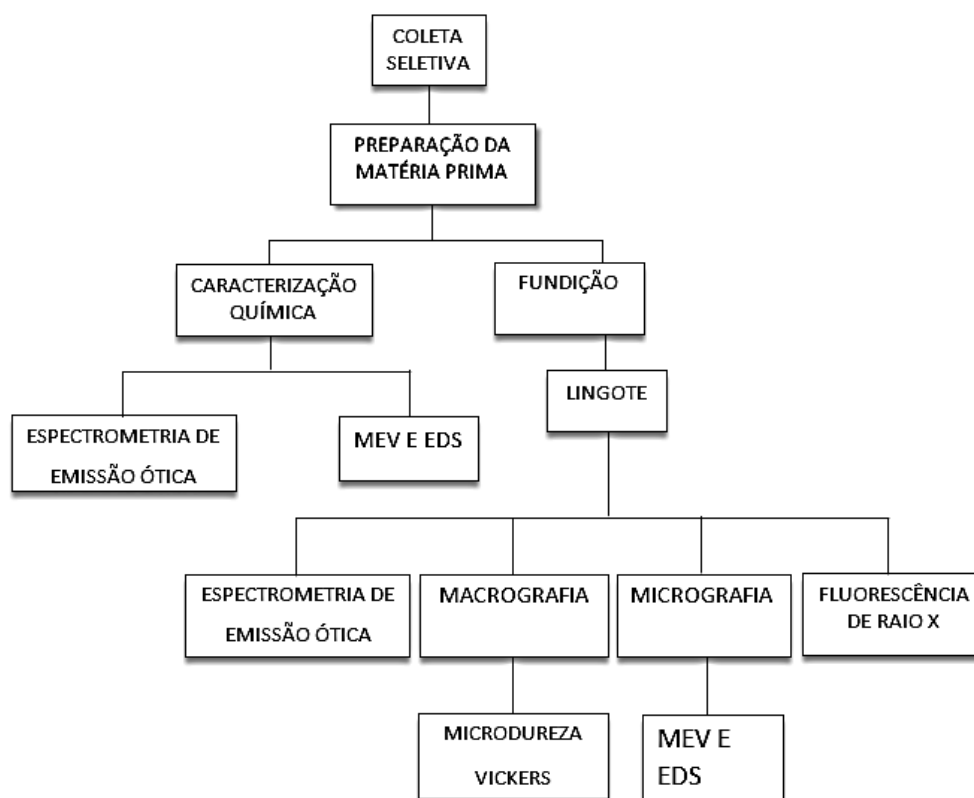
LIGA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Outros	Al
<b>Liga AA3004</b>	0,30	0,70	0,25	1.0-1.5	0,8-1,3	0.25	0,20	96.7

Fonte: ASM, 1996.

#### 3.2 Métodos

Neste capítulo é abordado à metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. O fluxograma da Figura 9 apresenta as etapas realizadas na pesquisa.

**Figura 9** - Fluxograma das etapas da pesquisa.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.3 Coleta seletiva

A coleta de latas de alumínio foi realizada no município de Ananindeua, no período de duas semanas no mês de março de 2019. A maior aquisição foi no período do carnaval, a movimentação na cidade é intensa e, o consumo de bebidas armazenadas em latas é comum. Nesse período o acúmulo de resíduo sólido é visível ao longo, da Avenida Dom Vicente Zico que por tradição é o local em que ocorrem as principais atrações.

### 3.4 Preparação da amostra do material coletado para a caracterização química

Para a análise da composição química do material, foram retiradas amostras em formato de tiras com as seguintes dimensões 7x5 mm, inicialmente limpas com água e sabão,

e na sequencia colocadas em um becker contendo uma solução de 50% de álcool 70 e 50% de água destilada. Esse conjunto foi agitado por 15 minutos em uma cuba de ultrassom Afr-800 Figura 10 (a), após essa etapa foram retiradas com uma pinça e secas com jato de ar quente Figura 10 (b).

**Figura 10** - Higienização da amostra (a); secagem da amostra (b).

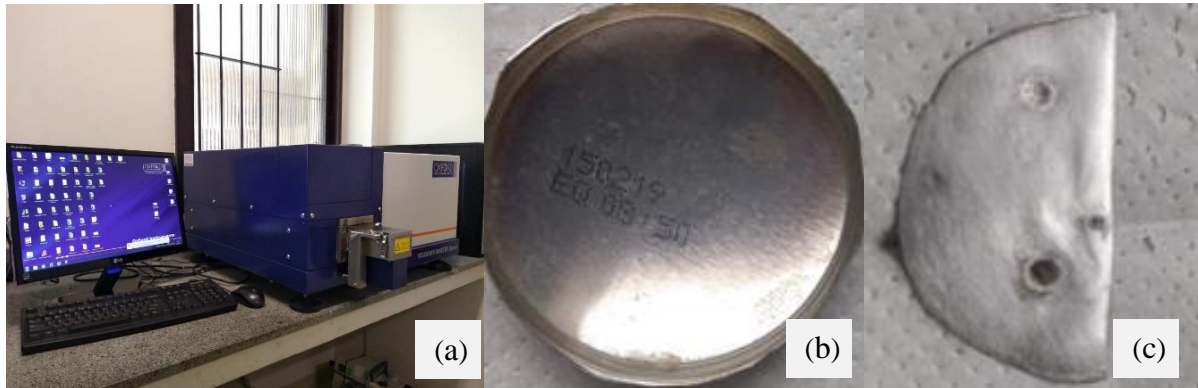


**Fonte** - Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.5 Caracterização por Espectrometria de Emissão Ótica

O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM) da UFPA, utilizando o aparelho Foundry-Master Xpert, Figura 11 (a). A amostra foi preparada por corte, retirando a base da lata Figura 11 (b). Por apresentar espessura abaixo de um milímetro, espessura mínima para a análise nesse equipamento foi necessário aumentar a espessura. Para tal a peça foi dobrada com alicate e prensada uniaxialmente, sob uma carga de uma tonelada por uma prensa hidráulica manual durante 1 minuto. Dando continuidade o ensaio foi realizado com a aplicação de três descargas elétricas para se obter uma média de cada ponto analisado. Na foto da figura 11 (c) é possível visualizar as marcas impressas pela descarga.

**Figura 11**-Aparelho utilizado no ensaio (a); base da lata (b); corpo de prova depois da realização do ensaio (c).



**Fonte**- Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.6 Preparação da matéria prima para fundição

No Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Belém, foi realizado a preparação da matéria prima para fundição. Do material coletado foi obtido 600 g de matéria prima para a realização da fundição, considerando como matéria prima o copo que é constituído do corpo e da base da lata. O material foi higienizado em um recipiente com água e sabão Figura 12 (a). Na sequência foi cominuído e alguns copos foram utilizados como invólucro do material cominuído Figura 12 (b), formando a matéria prima para a fundição. Com a finalidade de diminuir os espaços vazios essa matéria prima que foi prensada uniaxialmente sob uma carga de uma tonelada por uma prensa hidráulica manual durante 1 minuto, Figura 12 (c).

**Figura 12-** material cominuído (a), invólucro de latas (b) e prensa hidráulica (c).



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.6.1 Processo de fundição

O processo de fundição do metal foi realizado no Laboratório de Metalografia da Faculdade de Engenharia Mecânica (LABEM), localizado na UFPA, campus Belém. Um forno tipo mufla da marca Brasimet, Figura 13, foi utilizado para a fundição. A rampa de aquecimento foi realizada no período de 3 horas e 30 minutos até atingir a temperatura máxima de 900 °C.

**Figura 13 -** Forno tipo mufla utilizado na fundição.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.6.2 Preparação do Cadinho

O cadinho utilizado para a fundição foi higienizado com uma escova de aço para retirar as impurezas e uma lixa 120 mesh para uniformizar suas paredes, após a higienização, este foi levado para aquecer em uma estufa com circulação de ar à 200°C por 10 minutos, em seguida o cadinho foi revestido internamente com alumina, Figura 14, para evitar a aderência do fundente na parede do cadinho e facilitar o vazamento.

**Figura 14** - Cadinho preparado para fundição.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.6.3 Fundição

O material prensado foi levado para estufa por cerca de dez minutos a 200°C para retirada da umidade. O material seco foi adicionado ao cadinho e direcionado para o forno. Transcorrido três horas o cadinho foi retirado do forno e homogeneizado, durante 60 segundos com um bastão de aço inox revestido com alumina e retornou ao forno por mais uma hora. Após esse período o cadinho foi retirado do forno, realizando a injeção de argônio, Figura 15 (a), e retirado a escória. Uma hora após o cadinho foi novamente retirado do forno,

homogeneizado, e para facilitar a liberação do alumínio líquido foi adicionado um fluxo salino equimolar composto por NaCl e KCl correspondendo a aproximadamente 10% em relação a carga de entrada na superfície do líquido dentro do cadinho (VIEIRA et al., 2012). O vazamento ocorreu em um molde de cobre fornecido pelo laboratório de engenharia mecânica, obtendo-se um lingote Figura 15 (b).

**Figura 15** - Injeção de ar argônio (a) obtenção do lingote.(b)



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

O rendimento foi calculado pela Equação 1 a seguir:

$$X = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

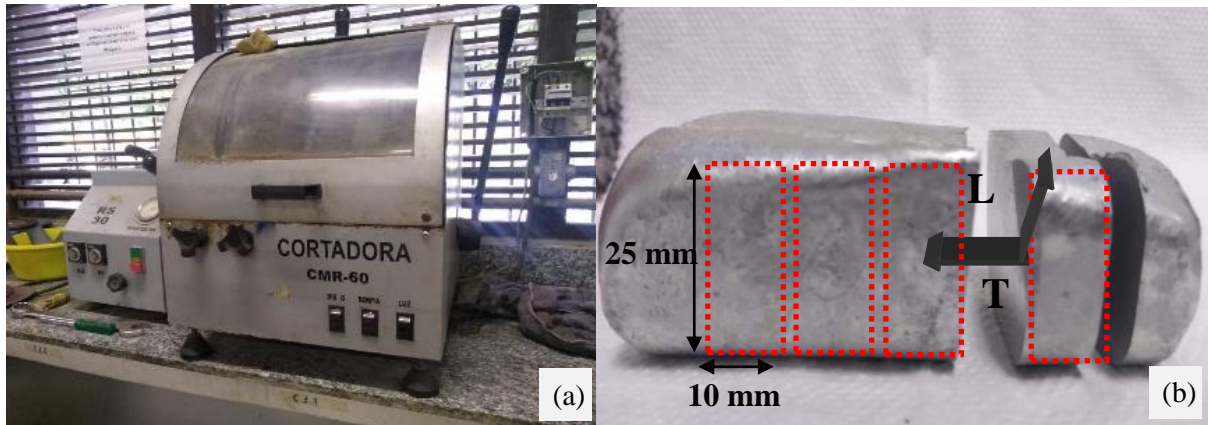
Rendimento da fundição X. Onde  $M_1$  é a carga de entrada e  $M_2$  é a massa do resíduo.

### 3.7 Obtenção dos corpos de prova

Para a obtenção do corpo de prova o lingote foi seccionado ao longo da seção longitudinal utilizando a cortadora CMR-60 Figura 16 (a) disponibilizada pelo Laboratório de Metalografia de Engenharia Mecânica (GPEMAT) que possibilitou realizar os cortes com maior precisão, utilizando-se de um fino disco abrasivo e jatos de água que tem por finalidade minimizar o aquecimento das amostras. O lingote foi cortado em quatro peças como apresenta o esquema e corte da Figura 16 (b), sendo uma para análise macrográfica e o ensaio mecânico

de microdureza Vickers, uma para a espectrometria de emissão ótica, fluorescência de raios X e uma para as análises microestrutural e espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS).

**Figura 16** – Cortadora CMR-60 (a) esquema e corte do lingote (b).



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

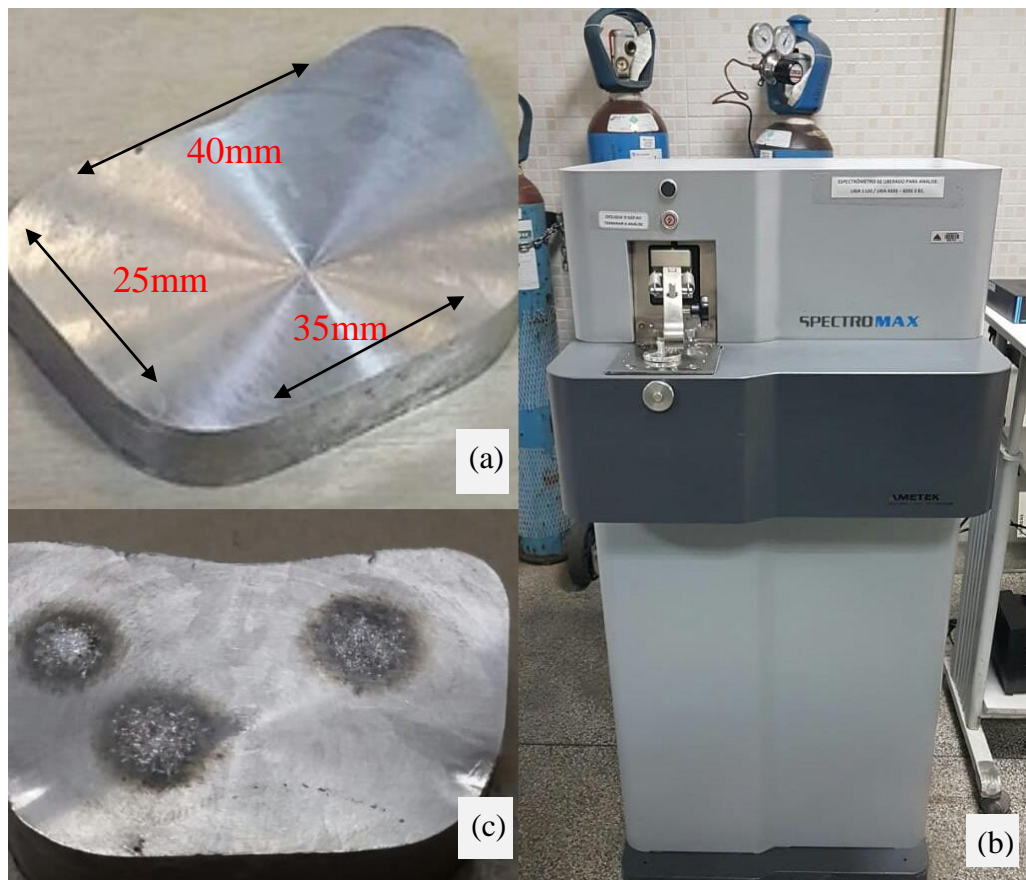
### 3.8 Técnicas de análises químicas

Para a análise química do material reciclado foram utilizadas as técnicas de espectrometria de emissão ótica, espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e a técnica de espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS).

#### 3.8.1 Caracterização por Espectrometria de Emissão Ótica

Para a caracterização química por Espectrometria de Emissão Ótica uma amostra foi facetada e planificada Figura 17 (a), no laboratório de controle químico de qualidade da ALUBAR, utilizando o espectrômetro de emissão ótica modelo MAXx LMM16/2013 figura 17 (b) de propriedade da empresa ALUBAR METAIS E CABOS S.A. Três ensaios foram realizados, como pode ser observado na foto da figura 17 (c).

**Figura 17** - Amostra facetada (a), Espectrômetro (b) e amostra ensaiada

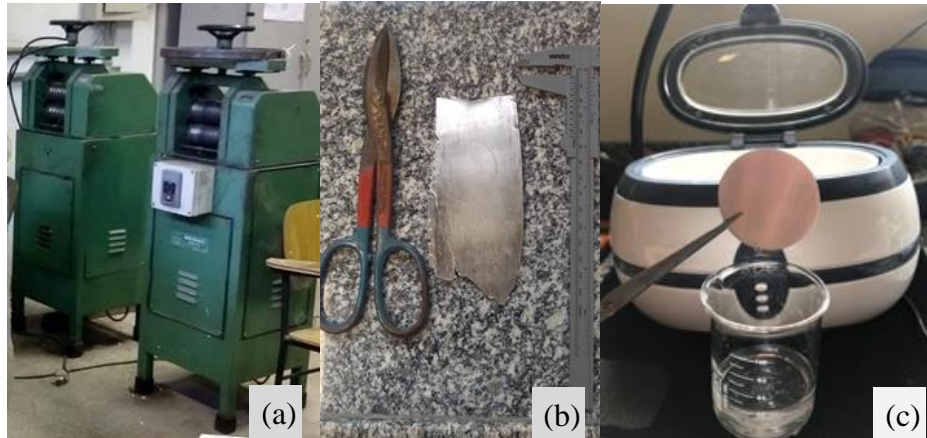


Fonte: ALUBAR, 2019.

### 3.8.2 Fluorescência de raios X

Para a realização da análise por fluorescência de raios X, a amostra foi preparada por laminação utilizando laminador duo elétrico Menac, Figura 18 (a) fornecido pelo LABEM/UFPA, até a espessura de 1 mm, na sequência foi utilizado um paquímetro e um compasso para ajustar o tamanho da peça com o diâmetro de 40 mm. O corte foi realizado com tesoura para corte metálico Figura 18 (b). A peça obtida foi lixada sequencialmente por lixas com granulometria de 100, 220 e 400 Meshs respectivamente. Para a remoção de possíveis resíduos na amostra foi utilizada a mesma metodologia apresentada no tópico 3.4, Figura 18 (c). A análise foi realizada no laboratório de materiais, disponibilizado pelo Instituto Federal do Pará.

**Figura 18** -Laminador (a), Preparação para o corte em disco (b) Amostra higienizada(c)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.8.3 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)

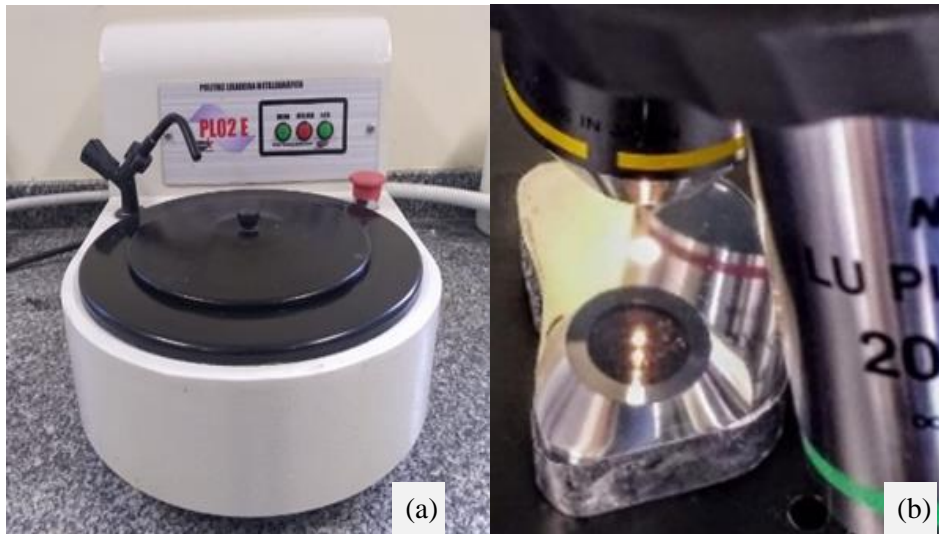
Com o recurso de espectroscopia de raios X por dispersão em energia foram realizadas análises dos elementos presentes, para auxiliar na identificação das fases constituintes da microestrutura. As análises foram realizadas nas amostras que foram preparadas para análise microestrutural descrita no tópico 3.2.2.

## 3.9 Procedimentos Metalográfico

### 3.9.1 Macroestrutura

A preparação da amostra foi realizada utilizando a técnica rotineira de metalografia no LABCAM/PRODERNA/ITEC/UFPA. Foi utilizada em uma politriz metalográfica, modelo PLO2E da TECLAGO, Figura 19(a), utilizando lixas de carbureto de silício na sequência granulométrica de 100, 220, 400, 600, 1000, 1200, 1500 *mesh* e água como refrigerador. No polimento foi utilizado pano de polimento metalográfico e como o abrasivo alumina 0.5  $\mu\text{m}$  até que a peça apresentasse o brilho espelhado Figura 19 (b).

**Figura 19** – Politriz metalográfica (a), peça polida (b)



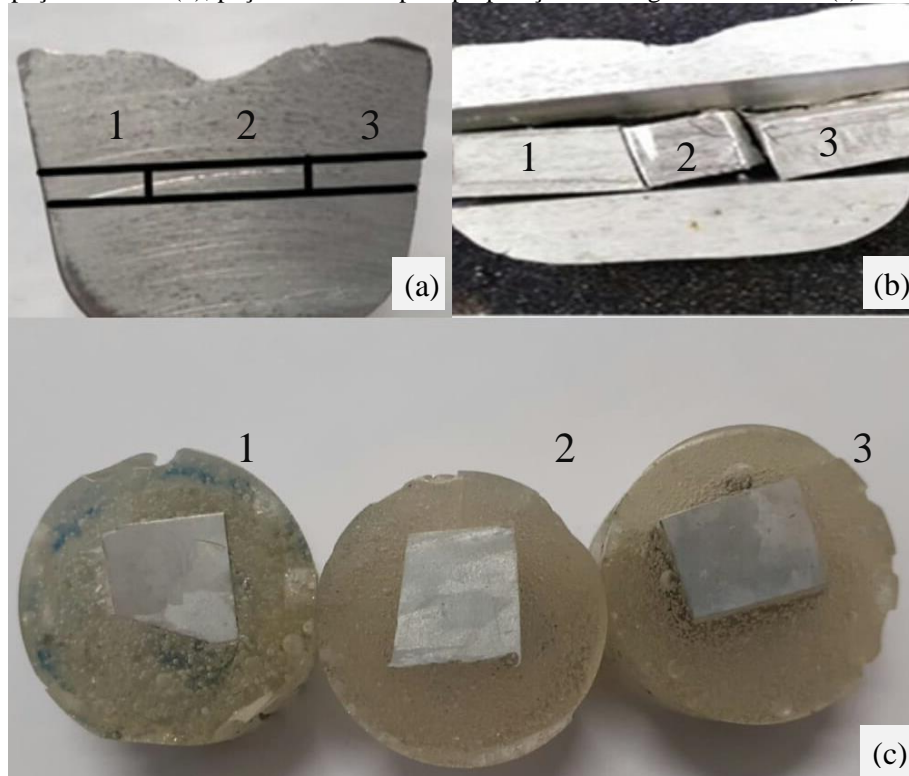
**Fonte:** Elaborado pelo autor (2019).

O ataque químico para a análise da macroestrutura foi realizado no Laboratório de Análise Química de Materiais LAQM/LEQ/ITEC/UFPA, utilizando reativo de Tucker (10 ml HCl + 10 ml HNO<sub>3</sub> + 0,5ml HF + 10 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), norma da ASTM E407 – 07. A amostra foi submetida à imersão na solução por 15 segundos, na sequência foi lavada com água corrente e álcool e seca com ar quente.

### 3.9.2 Microestrutura

Para a análise da microestrutura, a amostra foi cortada na região central em três partes conforme o esquema na Figura 20 (a). Após o corte, as peças Figura 20 (b) foram embutidas utilizando a resina acrílica auto-polimerizável, na seguinte sequência: as amostras um e dois foram embutidas no sentido longitudinal, isto é, direção do crescimento de solidificação, interface molde /metal líquido, a amostra três foi embutida no sentido transversal, Figura 20 (c).

**Figura 20** - Esquema de corte na amostra para análise metalográfico (a); peças cortadas (b); peças embutidas para preparação metalografica e análise (c).



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

Em seguida, as peças foram preparadas pelo processo metalográfico, foram lixadas com as lixas com as seguintes granulometrias 220, 400, 600, 1.000 e 1.200 *mesh*, polidas com alumina 0,1  $\mu\text{m}$ . O ataque químico para revelar a estrutura foi realizado com o reagente Tucker em imersão por 15 segundos.

### 3.10 Técnicas de observação

#### 3.10.1 Microscopia ótica (MO)

As amostras obtidas foram caracterizadas via microscopia ótica com luz polarizada. Para a aquisição e captura de imagens, foi utilizado um microscópio ótico Nikon modelo eclipse LV150, instalado no MATCAM, conforme Figura 21.

**Figura 21** - Microscópio óptico



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

### 3.10.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O MEV foi utilizado para avaliar a morfologia, fases presentes, porosidade e como forma complementar a análise dos resultados obtidos nos ensaios anteriores (ensaio de dureza, microscopia óptica). Para a realização deste ensaio foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura de bancada modelo TM 3000 Hitachi, com um detector de raios X por espectroscopia por dispersão em energia (EDS) e detector de elétrons retro espalhados (BSE), do laboratório MATCAM como mostra a fotografia da Figura 22. O MEV foi operado com a aceleração de voltagem de 15 kV.

**Figura 22** - Microscópio eletrônico de varredura.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

### 3.11 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Amazônia (LCAM) FEM/UFPA, foi utilizado um micro durômetro da marca MITUTOYO mostrado na Figura 23, com endentador de diamante em formato piramidal, um microscópio acoplado e um monitor com software para o cálculo do valor de dureza em HV. O ensaio foi aplicado em três regiões do corpo de prova (lado direito, centro e lado esquerdo) cada um com medição de cinco pontos. A carga aplicada pelo endentador foi de 0,3 kgF com o tempo de 10 segundos.

**Figura 23** – Microdurômetro



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2019.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Matéria prima

Foram coletadas 72 unidades de latas de alumínio, e ao ser removido a tampa e o selo, a massa final foi de 600 g, as quais foram recicladas por fusão.

### 4.2 Composição química da matéria prima.

A composição química da matéria prima fora obtida utilizando as técnicas de espectrometria de emissão ótica e a análise qualitativas e semi quantitativa utilizando a espectroscopia por dispersão em energia(EDS) acoplado ao MEV. A Tabela 4 apresenta a média dos elementos da composição química.

**Tabela 4** - Composição química da matéria prima.

<b>Liga3004</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Alumínio mínimo</b>
B-209M	0,3	0,7	0,20	1,0-1.5	0,8-1,3	0,25	96,7
EDS	0,1	0,66	0,3	0,9	1,1	0,03	96,9
EEO	0,18	0,53	0,18	0,84	1,30	0,02	96,9

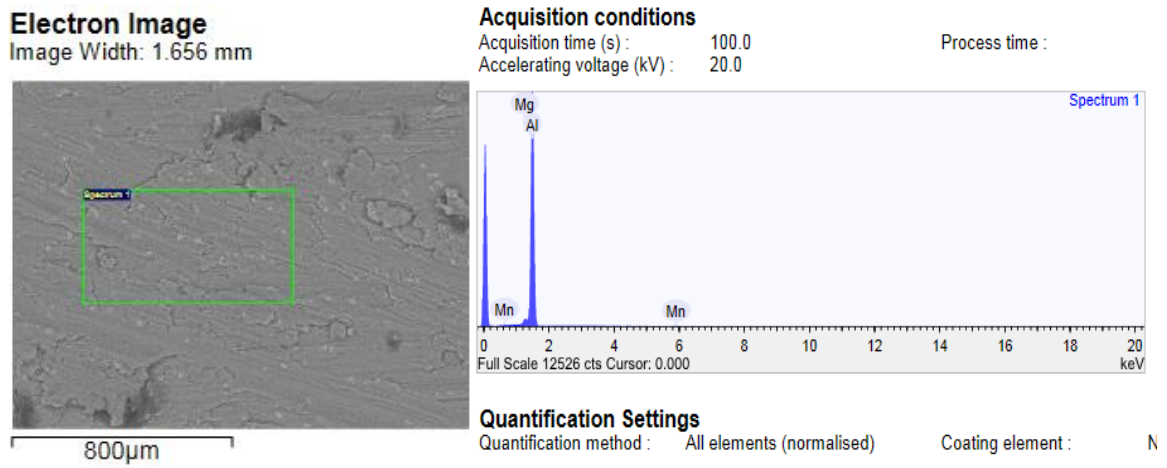
**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

Os resultados da composição química do material obtido permitem comparar com os elementos que constituem a liga de alumínio AA 3004 de acordo com a ASM (1996) a qual apresenta comoos principais elementos ligantes o manganês e o magnésio.

Os valores obtidos pela analise realizada por EDS e a análise de espectrometria de emissão ótica da matéria prima apresentaram teores na faixa de valores normatizados para a liga.

A Figura 24 é composta por uma micrografia da lâmina da amostra da matéria prima com uma área analisada e um espectro com a presença dos elementos de liga.

**Figura 24-** Micrografia da matéria prima e um espectro.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

#### 4.3 Obtenção do lingote

A fusão de 600 g do material coletado teve como resultado um lingote com 272 g, com as seguintes dimensões: 36 mm de largura, 26 mm de altura e 9 mm de comprimento com rendimento de 47.9. Na foto da Figura 25 é visualizado o conjunto lingote e a lingoteira de cobre.

**Figura 25-** Lingote.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

Mashhadi et al., (2009) em seus experimentos de reciclagem de lascas, resíduo da usinagem da liga AA 336 observou que devido à alta reatividade do alumínio e sua extrema tendência à oxidação, que a reciclagem de amostras em cadinho apresentou baixo rendimento.

O baixo rendimento pode ser melhorado ajustando os parâmetros de fusão, bem como a remoção adequada de pigmentos como tinta e vernizes presentes nas latas. Oosumi (1995) diz que as tintas aplicadas nas latas de bebidas de alumínio eram a fonte de impureza de titânio nas ligas de alumínio recicladas. Takahashi et al., (1997) e Fujisawa et al., (1998) mostraram que as tintas ocorreram como composições de metal fundido desfavoráveis (principalmente titânio) e, portanto, diminuem o rendimento do metal, eles aplicaram um método de descascamento para remover tintas para evitar a contaminação de titânio.

Estudos realizados por Verran et al., (2005) com reciclagem de latas de alumínio verificou que a adição de fluxo escorificante e a temperatura de vazamento, produziram efeitos de ganho no rendimento. Em seu experimento concluiu que a quantidade adequada foi de 20% em relação à massa de entrada.

#### 4.4 Composição química do alumínio reciclado

A Tabela 5 apresenta a m composição química para a liga 3004 de acordo com a ASM (1996), a média das análises de composição química obtida para o material reciclado por espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS), espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e por espectrometria de emissão ótica (EEO).

**Tabela 5** - Composição química do material reciclado em %.

<b>3004</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>
B-209M	0,30	0,70	0,20	1,0-1,5	0,80-1,3	0,25	-	96,7
EDS	0,50	0,60	0,10	0,80	1,5	0,20	0,04	96,2
FRX	0,32	0,74	0,29	1,10	1,7	0,09	0,41	95,3
EEO	0,20	0,54	0,18	0,86	1,20	0,06	0,40	96,5

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

Os valores encontrados para os elementos por EEO estão todos dentro da faixa estabelecido para a liga em estudo segundo a Norma. Para as análises realizadas por EDS e por FRX foram detectados valores acima do máximo para a liga em estudo. Na análise por EDS, os valores encontrados em discordância foram para os elementos Si e o Mg e para a análise por FRX os elementos Fe e Mg. Nas três metodologias de análise foi detectada a presença de titânio (Ti).

Uma quantidade de aproximadamente 0,005 % em peso de magnésio à liga de alumínio implica a formação de uma camada superficial protetora de óxido durante o aquecimento e a fusão do metal conhecida como espinélio (spinel): ( $MgOAl_2O_3$  ou  $MgAl_2O_4$ ). A formação de espinélio ocorre quando o metal entra em contato com a atmosfera do forno de fusão durante o processo de combustão que são consideradas normais no processo, entretanto, quantidades superiores a 2% implica perda maior do rendimento, visto que acelera a formação do filme óxido, levando ao aumento de espessura e conseqüente maior perda na fusão (STEWART, 1995).

Segundo Oosumi (1995) a presença do titânio nas análises para o material reciclado, elemento não presente na liga, é proveniente da pigmentação utilizada na pintura das latas que usa como agente básico o  $TiO_2$  quantidades de titânio acima de 0,04%, formam inclusões indesejáveis de óxidos ( $TiO_2$ ). O ferro e o silício analisados para FRX e EDS apareceram acima dos valores normatizados, isso se dar pelo fato das análises serem feitas em locais pontuais. Ligas de alumínio contendo Mn, Si e Fe solidificam formando intermetálicos na região interdendrítica. A estrutura intermetálica é instável em razão da morfologia irregular na forma ramificada e da alta densidade de defeitos de crescimento (MERCHANT, 1990).

#### 4.5 Macroestrutura

A macroestrutura do lingote obtido solidificada a temperatura ambiente pode ser visualizada na Figura 26, nela podemos observar que a estrutura é predominantemente colunar, não é observada a estrutura equiaxial. As ligas de alumínio fundidas geralmente apresentam grãos colunares ou equiaxiais, ambos grosseiros (MOREIRA e FUOCO 2019). Segundo Carvalho (2016) os grãos são formados à medida que o calor latente de solidificação diminui, ou seja, as estruturas são ditadas pela quantidade de calor retirada pela interface

metal/molde, isto é, o fluxo de calor em relação às paredes do molde. Quanto maior a retirada de calor, maior será a existência de estruturas colunares.

**Figura 26** - Macroestrutura do lingote.



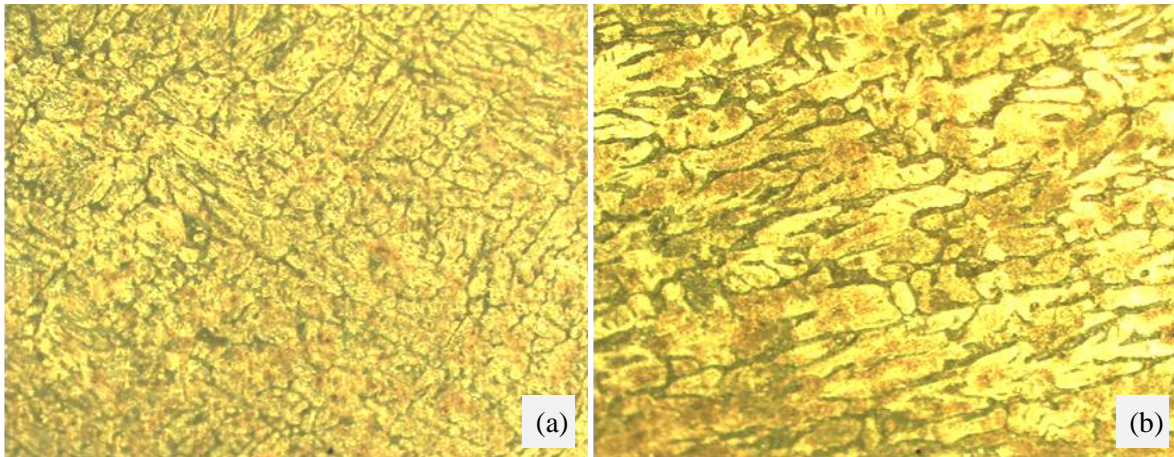
**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

#### 4.6 Microscopia óptica (MO)

As fotomicrografias obtidas via microscopia óptica foram realizadas em amostras obtidas por corte longitudinal e transversal.

A Figura 27 (a) e (b) é composta pela microestrutura da seção longitudinal da amostra da liga obtida por reciclagem, em seu estado bruto de fusão com aumento de 50x e 100x respectivamente. A estrutura visualizada é típica para as ligas da série 3xxx, (GRAS, MEREDITH, HUNT, 2005) Observa-se a estrutura composta por células dendríticas, a presença de micro poros e as inclusões.

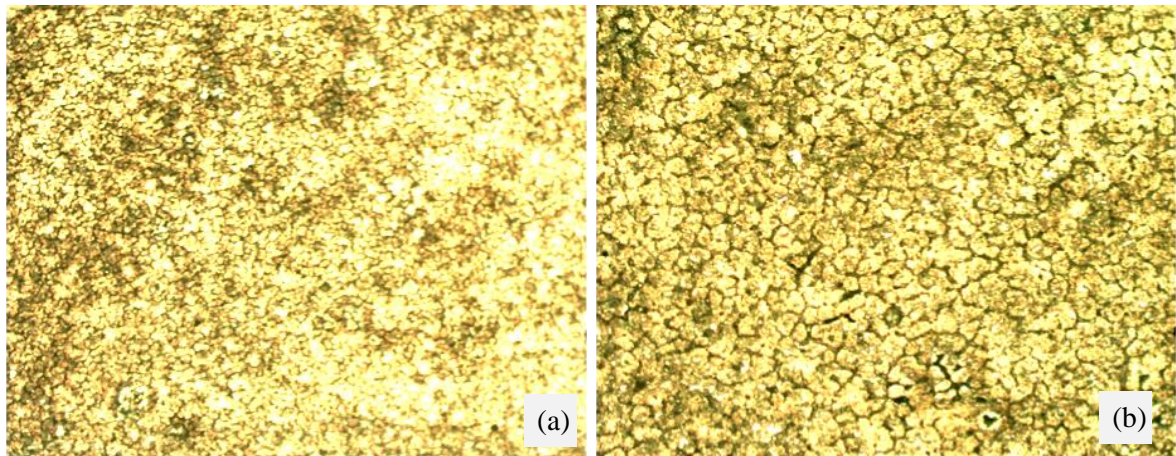
**Figura 27-**Microestrutura do material reciclado, sentido longitudinal 50x (a) e 100x (b)



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

A microestrutura da seção transversal da amostra da liga obtida na reciclagem é apresentada na Figura 30 (a) com aumento de 50 x e a Figura 30 (b) com o aumento de 100 x. A seção transversal apresenta o corte das dendritas primárias e secundárias.

**Figura 28-** Microestrutura do material reciclado, sentido transversal 50x (a) e 100x (b)

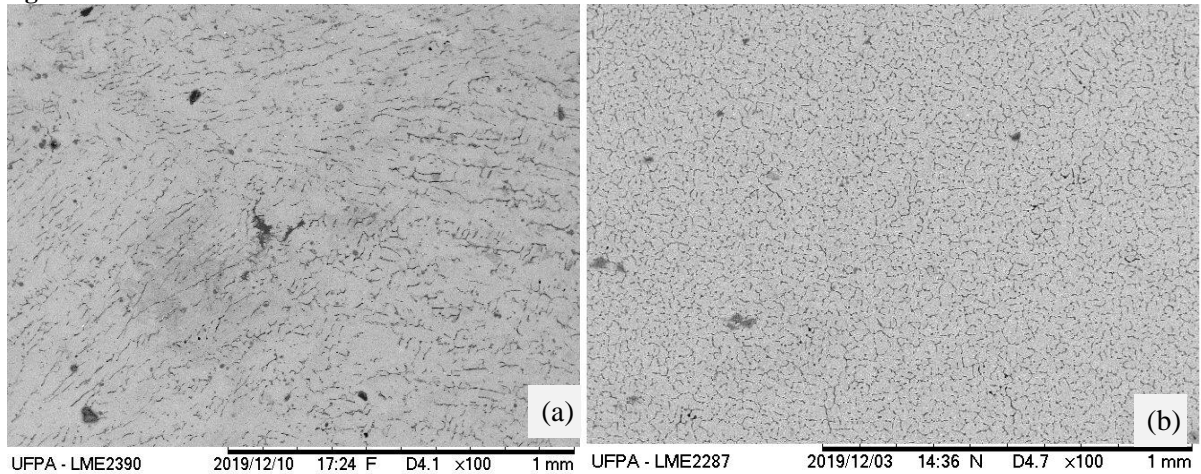


**Fonte:** Elaborada pelo autor (2019).

#### 4.7 Microscopia eletrônica de varredura

A micrografia das amostras foi obtida por elétrons retroespalhados sendo duas no corte longitudinal e uma no corte transversal. A microestrutura da amostra da liga no seu estado bruto de fusão, esta apresentada na Figura 29 (a) para o corte longitudinal onde é confirmada a estrutura dendrítica típica para a liga da série 3xxxx e a microestrutura do corte transversal na Figura 29 (b). As imagens revelam a presença de microporos assim com a presença de inclusões, nas duas secções.

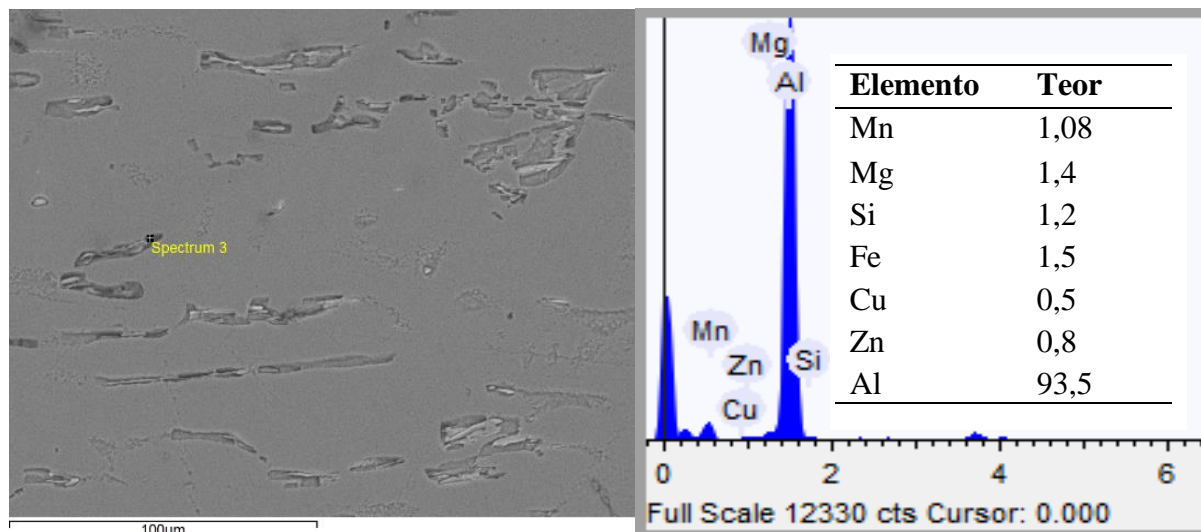
**Figura 29** - Microestruturas brutas de fusão do material reciclado.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

Uma análise mais acurada por microscopia eletrônica de varredura e micro análise espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) pode ajudar na correta identificação dos precipitados. A Figura 30 é composta pela micrografia da seção longitudinal obtida por MEV com um ponto analisado por EDS no contorno do braço dendrítico, um espectro mostrando a presença dos principais elementos presentes na liga e uma tabela com os teores de cada elemento analisado naquele ponto. A micro análise da liga evidencia qualitativamente e semi quantitativamente a presença dos principais elementos para a liga comercial da série 3xxx, mostrando que além dos elementos Mn e Mg, estão presentes outros elementos em menores quantidades como, por exemplo, o Fe e o Si .

**Figura 30-** Micrografia e espectro no contorno do braço dendrítico.



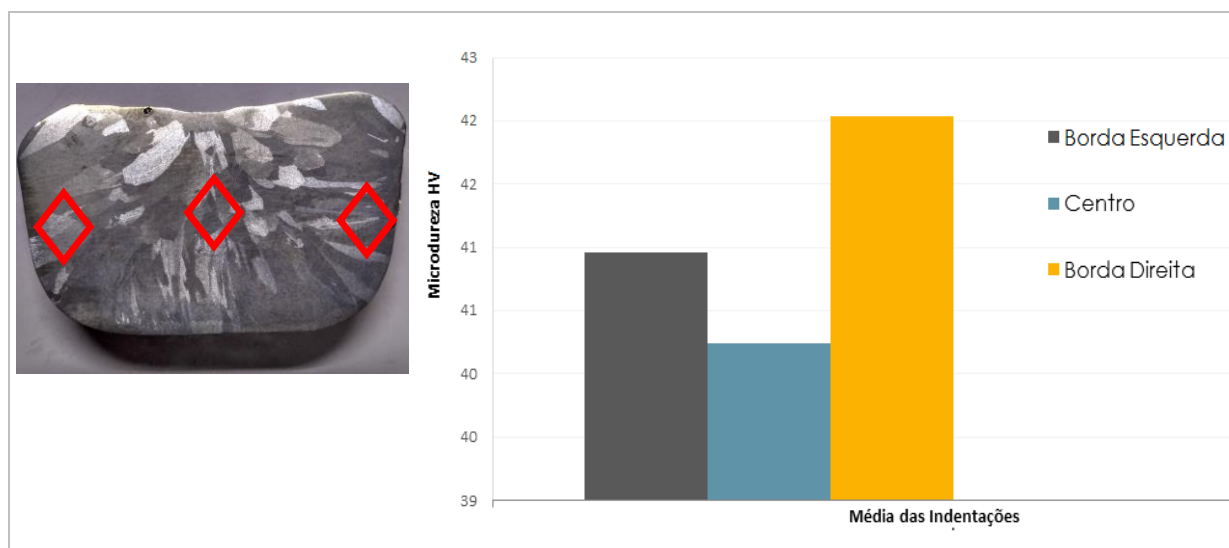
**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

#### 4.8 Microdureza Vickers

A média para os 15 pontos analisados para a dureza foi de 41,08 Hv, utilizando a escala de microdureza Vickers. As endentações foram realizadas no corpo de prova atacado, isto é, na peça que apresenta a macroestrutura. As regiões escolhidas para tais endentações tomaram como referência partes distintas da amostra, a interface direita, centro e interface esquerda.

A Figura 31 é composta por um gráfico e uma imagem que indica os pontos analisados. O gráfico indica o maior valor encontrado foi de 42,04 Hv para a endentação da interface esquerda, o menor valor foi de 40,26 na interface central, desse modo o ensaio mecânico de microdureza apresentou uma tendência homogênea nos valores ao longo da amostra.

**Figura 31-** Gráfico dos resultados da microdureza e imagem dos pontos analisados.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2019.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho experimental teve início com a coleta de material descartado seguido da caracterização química. O material coletado foi fundido e caracterizado. A estrutura foi avaliada observando a macroestrutura e a microestrutura com auxílio da microscopia óptica e eletrônica de varredura.

Os resultados da macroestrutura do lingote obtido solidificada a temperatura ambiente apresentou estrutura colunar e baixo índice de porosidade, isso lhe confere boas condições para sua utilização como matéria prima para ser utilizada em produtos a serem fabricados pelo processo de conformação mecânica.

A composição química foi avaliada por espectrometria de emissão ótica, espectroscopia de energia dispersiva dos raios-X (EDS) e por fluorescência de raios-X (FRX), o que permitiu constatar a presença predominante dos elementos de liga Al-Mn-Mg. Os resultados das análises de composição química do material reciclado apresentaram teores próximos aos valores normatizados para a liga. Na microestrutura é observada uma estrutura dendrítica e a composição química apresentou pouca variação em relação à liga da série 3xxx, a.s imagens revelam a presença de microporos assim com a presença de inclusões.

O ensaio mecânico de microdureza apresentou uma tendência homogênea nos valores ao longo da amostra, a média de dureza para os pontos foi de 41,08 HV.

## REFERÊNCIAS

- ABRALATAS- **Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio.**  
< <http://www.abralatas.org.br/#containerLata>>. Acesso em 12 de janeiro de 2019.
- ALMADA, G. C.. **Estudo da influência do agente nucleante) ALTi5% B1%) na microestrutura de chapas AA8011 obtidas por lingotamento contínuo.** 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK.** Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, V.2, ASM, 1996.
- ASTM E 3-11, “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, American Society for Testing Materials, 2011, 13 p.
- ASTM E 340-00 e1, “Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys, American Society for Testing Materials, 2011, 23 p.
- BRASIL ALUMÍNIO.<<http://brasilaluminio.com.br/pt/>>. Acesso em: 10 de novembro de 2019.
- CALLISTER JR., W. D.; **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.** 8 ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.
- CAMPBELL, MC, 1996. **Recycling of non ferrous metals: a complement to the production of primary metals. International Council on Metals and the Environment (ICME),** Canada, pp.3-8.
- CARVALHO, Rosimeire Silva de. **A influência do cobre nas microestruturas e propriedades mecânicas de uma liga Al2% Ni solidificadas com fluxo de calor unidirecional e transiente.** 2016.
- CONSTANTINO, Vera R. Leopoldo; et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. Química Nova.** v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.
- DIAS FILHO, J. M. S. **Análises Térmica e Microestrutural na Solidificação de Ligas Monofásica e Peritéticas do Sistema Zn-Ag.**Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas 2013.
- FORTUNA. J., MARQUES J. A, MARTINS2.C J., **Processo Bayer de obtenção de alumina como ferramenta para o ensino de conceitos de estequiometria,** 2012.
- FUNDAMENTOS, ABA L. aplicações do alumínio.** São Paulo, p. 35, 2007.
- FUJISAWA, K., OOSUMI, K., TAKAHASHI T., NAKAMURA, T., 1998. **Swellpeeling method for aluminum cans paints. ICAA 6th Int. Conf. On Aluminum Alloys,** Toyohashi, Japan, 5–10 January 1998, Aluminum Alloys, Their Physical & Mechanical Properties, vol. (3): Publication of Japan Inst. of Light Metals, Tsukamoto Sozan Bldg 6 F 4-2-15 ginza Chuo-Ku, Tokyo 104-0061 Japan, pp. 1741–1746.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações** São Paulo. Ed. Unicamp, 2001. 1ª edição

GARCIA. A **Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes**. Revista Projeções, v. 23, p. 13-32, 2005.

GARCIA. A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. São Paulo. Ed. Unicamp, UNICAMP, 2007 1ª edição.

GRAS, Ch.; MEREDITH, M.; HUNT, J. D. Microdefects formation during the twin-roll casting of Al–Mg–Mn aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 62–72.

HENSTOCK, M.F., 1996. The Recycling of Non-Ferrous Metals. International Council on Metals and the Environment (ICME), Canada, pp. 9–17

**HYDRO- Ciclo de vida do alumínio.**

< <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-o-aluminio/ciclo-de-vida-do-aluminio/>> acesso em: 15 de junho de 2019.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE- IAI Life Cycle Assessment.

<<https://www.iso.org/organization/9309.html>> Acesso em: 20 de agosto de 2019.

KOLOSOSKI J.; FILHO F. A.; COUTO A. A. **Curso de metalografia do alumínio e suas ligas**. São Paulo: ABAL, 1998. p. 148.

Latasa Reciclagem- **Grupo de reciclagem de metais não ferrosos do Brasil.**

< <https://www.latasa.ind.br/pt/institucional/latasa>> Acesso em: 20 de agosto de 2019.

LOGOZAR, K., RADONJIC, G., BASTIC, M., Incorporation of reverse logistics model into in-plant recycling process: a case of aluminium industry. *J. Resour. Conserv.*2006. *Recy.* 49, 49–67

MARTINS, J. de P.; **Evolução da microestrutura e da textura durante o processamento de chapas da liga Al-Mn-Fe-Si (3003) produzidas por lingotamento contínuo: um estado comparativo com o processo contínuo**. Tese (Doutorado em engenharia). USP. São Paulo, 2005.

MASHHADI, H. Amini et al. **Recycling of aluminium alloy turning scrap via cold pressing and melting with salt flux**. *Journal of Materials processing Technology*, v. 209, n. 7, p. 3138-3142, 2009.

MERCHANT, H. D.; MORRIS, J. D.; HODGSON, D. S.; **Characterization of intermetallics in Aluminum Alloy 3004**. *Materials Characterization* 25: 339-373. 1990.

MOREIRA, M. F.; FUOCO R.; **Ligas de Alumínio Fundidas**.

Disponível em <http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/bibliomat/aluminiofund.pdf>. Acesso em 23/08/2019.

MOREIRA, M. F. **Ligas de alumínio para fundição**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT Escola de Engenharia Mauá 2012.

OSÓRIO, W.R.R - **Análise da Influência de Parâmetros Estruturais da Solidificação de Metais e Ligas na Resistência à Corrosão**- Universidade Estadual de Campinas, Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, 2004.

PATROCÍNIO, P. R. G., **Caracterização da textura e do orelhamento (“earing”) da liga AA3104 após a redução a frio**. 2011, 117f., Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.

PEIXOTO. B **Microestrutura de Solidificação e Resistências Mecânica e à Corrosão de Ligas Pb-Sn Diluídas**, 2009.

RECICLOTERRA, Disponível em:  
<<http://www.recicloteca.org.br/materialreciclavvel/metal/aluminio/>>,  
Acesso em: dez de novembro de 2019.

REIS , A. A.; **Parâmetros de processamento para tixoconformação de uma liga Al-3,8%Si reciclada a partir de latas de alumínio**.130f. Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais -. IFES. Vitória, 2013.

SOUZA, F. M. **Estudo da microestrutura, da textura cristalográfica e da recristalização em chapas obtidas por lingotamento contínuo e semicontínuo da liga de alumínio AA4006**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SHACKELFORD - Introduction to Materials Science for Engineers (8th Edition) by James F. Shackelford (2014-04-12)

Stewart,A .L, J.G.McCubbin and J.Sulzer. **Melting Aluminum and Aluminum Alloys-AJuminurn** Company of Canada, Ltd- Light Metal Age, December, 1995, pl3- 15.

VERRAN, G.O., KURZAWA, U., PESCADOR, W.A. **Reciclagem de Latas de Alumínio Visando Melhor Rendimento e Qualidade Metalúrgica no Alumínio Obtido**. RevistaMatéria, v. 10, n. 1, pp. 72 – 79, Março de 2005

VIEIRA, R. M., ROMAGNA E. M., SANTOS, C. M. L. - **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO NOS PROCESSOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO (T6) DE UMA NOVA LIGA Al4,8%Cu REICLADA**,- VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico 17 a 20 de Junho de 2012, Atibaia, SP, Brasil

VOGEL, C., **“Brasil recicla 89% das latas”**, In: *A Notícia*, Florianópolis, mar. 2004.  
< <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10635/>>  
acesso em 15 de julho de 2019.

ZHOU, B., YANG, Y., REUTER, M.A., BOIN, U.M.J. Modelling of aluminium scrap melting in a rotary furnace. J. Miner. Eng. 2006. 19, 299–308.