

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA  
LICENCIATURA EM QUÍMICA

Jéssica Evelise Ferreira

METODOLOGIA DE ANÁLISE QUÍMICA E TÉCNICAS DE METALOGRAFIA NA  
RECICLAGEM DA LATA DE ALUMÍNIO

Sorocaba

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA  
LICENCIATURA EM QUÍMICA

Jéssica Evelise Ferreira

METODOLOGIA DE ANÁLISE QUÍMICA E TÉCNICAS DE METALOGRAFIA NA  
RECICLAGEM DA LATA DE ALUMÍNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física, Química e Matemática (DFQM) da UFSCar, *campus* Sorocaba, como requisito parcial para obtenção da graduação em Licenciatura em Química.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciana Camargo de Oliveira.

Coorientação: Mestranda Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho.

Sorocaba

2022



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA - CCQL-So/CCTS**

Rod. João Leme dos Santos km 110 - SP-264, s/n - Bairro Itinga, Sorocaba/SP, CEP 18052-780

Telefone: (15) 32296128 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 2/2022/CCQL-So/CCTS

**Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso**

**Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**JÉSSICA EVELISE FERREIRA**

**METODOLOGIA DE ANÁLISE QUÍMICA E TÉCNICAS DE METALOGRAFIA NA RECICLAGEM DA LATA DE ALUMÍNIO**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba**

Sorocaba, 31 de março de 2022

**ASSINATURAS E CIÊNCIAS**

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Profa. Dra. Luciana Camargo de Oliveira
	Doutoranda Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho (coorientadora)
Membro da Banca 1	Prof. Dr. João Batista dos Santos Junior
Membro da Banca 2	Prof. Dr. Alexandre Donizeti Martins Cavagis



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Camargo de Oliveira, Docente**, em 31/03/2022, às 20:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Batista dos Santos Junior, Docente**, em 31/03/2022, às 20:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Donizeti Martins Cavagis, Docente**, em 31/03/2022, às 20:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0627968** e o código CRC **BBECF01D**.



---

**Referência:** Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº  
23112.006585/2022-23

SEI nº 0627968

*Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019*

Ferreira, Jéssica Evelise

Metodologia de análise química e técnicas de metalografia na reciclagem da lata de alumínio / Jéssica Evelise Ferreira -- 2022.

73f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Luciana Camargo de Oliveira

Banca Examinadora: Luciana Camargo de Oliveira, João Batista dos Santos Junior, Alexandre Donizeti Martins

Cavagis

Bibliografia

1. Reciclagem da lata de alumínio. 2. Técnicas de metalografia e análise química. 3. Apostila. I. Ferreira, Jéssica Evelise. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979

## **DEDICATÓRIA**

Uma realização tão importante em sua vida é sustentada por muita dedicação, perseverança e união das pessoas que mais amamos. À minha querida família, que tanto admiro, dedico o resultado do esforço realizado ao longo deste percurso para conclusão desse trabalho.

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.*

*Minha sincera gratidão a minha Mãe Vanda, por força e garra inabalável, e aos meus irmãos Jaqueline e Jeferson, que sempre estiveram ao meu lado, com apoio e orgulho à todas as pequenas conquistas, sem julgamentos, mesmo com todas as dificuldades para finalização da graduação.*

*Agradeço a injeção constante de entusiasmo depositada em minha formação ao meu marido Alef, que sempre esteve presente me apoiando e incentivando para a conclusão desse trabalho.*

*Agradeço a minha orientadora Luciana, a qual não desistiu desse trabalho desde o início, mesmo com todos os percalços para sua conclusão, e aos importantes complementos da mestranda Mayara, que me auxiliou muito no direcionamento e foco dessa pesquisa.*

*A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, amigos da graduação que sempre serão lembrados, Eduardo, Cleber, Rebeca, Núbia, Mirelle, Helen, Tamires, Daniel Merguizo e José Carlos, o meu muito obrigada. Meus sinceros agradecimentos à equipe da Escola Técnica Estadual de Mairinque, em particular a professora Talita A. Camargo Benassi, a qual é inspiração para mim, pois ensina com carinho e me motivou a seguir na área da educação.*

## RESUMO

O alumínio é um metal versátil e possui características notáveis, como boa aparência, resistência à corrosão e baixa densidade, utilizado em diversas aplicações como construção civil, transportes e embalagens. A utilização do alumínio primário extraído de recursos minerais ainda é expressiva, mas devido sua alta reciclabilidade, baixa perda das propriedades físico-químicas e a redução do consumo energético, o processo de reciclagem é fundamental para a economia e para a sustentabilidade. Desse modo, as latas de bebidas têm papel fundamental nesse mercado, já que uma lata percorre todo o ciclo de processamento, consumo, descarte e reciclagem em apenas alguns meses. Apesar da reciclagem das latas de alumínio apresentar grande relevância, existem poucos estudos experimentais que relacionem os métodos de controle químico e metalográfico dos parâmetros de fundição na recuperação da reciclagem do alumínio. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é o levantamento bibliográfico das técnicas de análise química e metalográfica realizadas durante o processo de reciclagem de latas de alumínio e a elaboração de uma apostila técnica direcionada para o ensino superior. Os resultados foram obtidos a partir da consulta de normas técnicas nacionais (ABNT) e internacionais (ASTM), livros técnicos da coleção Metals Handbook, da ASM, e artigos específicos disponíveis nos periódicos da CAPES. Aborda-se a avaliação das ligas que compõem a lata de alumínio, por meio da análise da composição química por Espectroscopia de Emissão Óptica e a análise microestrutural da liga metálica, utilizando técnicas de metalografia. O resumo dessas melhores práticas foi disponibilizado em uma apostila, com o intuito de aplicação e utilização no ensino superior. O tema proposto é de grande importância para o desenvolvimento do conhecimento profissional e acadêmico no controle de qualidade na reciclagem das latas de alumínio para bebidas.

Palavras-chave: Reciclagem; Ligas de alumínio; Espectrometria; Microscopia; Apostila.



## **ABSTRACT**

Aluminum is a versatile metal and has remarkable characteristics, such as good appearance, corrosion resistance and low density, used in several applications such as civil construction, transport and packaging. The use of primary aluminum extracted from mineral resources is still expressive, but due to its high recyclability, low loss of physical-chemical properties and reduced energy consumption, the recycling process is fundamental for economy and sustainability. Thus, beverage cans play a key role in this market, since a can goes through the entire cycle of processing, consumption, disposal, and recycling in just a few months. Although aluminum can recycling has great relevance, there are few experimental studies that relate chemical and metallographic control methods of smelting parameters in aluminum recycling recovery. In this context, the objective of the present work is the bibliographical research of the techniques of chemical and metallographic analysis carried out during the recycling process of aluminum cans and the elaboration of a technical apostille aimed in higher education. The results were obtained from the consultation of national (ABNT) and international (ASTM) technical standards, technical books from ASM's Metals Handbook collection, and specific articles available in CAPES journals. It approaches the evaluation of the alloys that compose the aluminum can, through the analysis of the chemical composition by Optical Emission Spectroscopy and the microstructural analysis of the metallic alloy, using metallographic techniques. The summary of these best practices was made available in a apostille, with the aim of application and use in higher education. The proposed theme is of great importance for the development of professional and academic knowledge in quality control in the recycling of aluminum beverage cans.

**Keywords:** Recycling; Aluminum Alloys; Spectrometry; Microscopy; Apostille

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 - Ciclo de vida das latas de alumínio .....	13
Figura 2 - Processo de fabricação do alumínio primário.....	14
Figura 3 – Processo de fabricação de alumínio secundário.....	15
Figura 4 – Modelo de Espectrômetro de Emissão Óptica, Spectrolab S com ampliação da câmara de queima .....	23
Figura 5 – Descarga elétrica aplicada em uma amostra a partir do eletrodo.....	24
Figura 6 – Sequência analítica do EEO.....	25
Figura 7 – Padrão de qualidade do corpo de prova para análise. ....	26
Figura 8 – Molde e amostra com formato padronizado pela Norma ASTM E716 para análise em OEE. ....	27
Figura 9 – Análise visual de defeito na lata de alumínio.....	30
Figura 10 – Etapas de preparação metalográfica.....	31
Figura 11 – Fotomicrografia de uma superfície com os contornos dos grãos em tons mais escuros.....	35
Figura 12 – Influência do acabamento da superfície da amostra. ....	36
Figura 13 – Presença de inclusão micrografia da liga 3104.....	37
Figura 14 – Microestrutura da liga 3104 com precipitados de segunda fase .....	38
Figura 15 - Microestrutura da liga 5182 com precipitados de segunda fase.....	38
Tabela 1 - Nomenclatura e elementos característicos de Ligas de alumínio forjado.....	20
Tabela 2 - Composições químicas em porcentagem (m/m) das ligas utilizadas na fabricação da lata de alumínio. ....	21

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Produção de alumínio primário e reciclagem .....	12
<b>2. METODOLOGIA.....</b>	<b>18</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>19</b>
3.1 Composição química da lata de alumínio.....	19
3.2 Funcionalidade e operação de um Espectrômetro de Emissão Óptica .....	23
3.3 Estudo metalográfico .....	28
3.4 Preparação de amostras para análise metalográfica .....	29
3.4.1 Corte do corpo de prova .....	31
3.4.2 Embutimento do corpo de prova .....	32
3.4.3 Lixamento .....	33
3.4.4 Polimento.....	34
3.4.5 Ataque químico .....	34
3.5 Microscopia .....	35
3.6 Microscópio Eletrônico de Varredura .....	36
3.7 Defeitos estruturais visualizados na microscopia.....	37
3.8 Aprovação do metal para produção da lata de alumínio .....	38
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>39</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>
<b>APÊNDICE A: APOSTILA ELABORADA .....</b>	<b>44</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Apresentando uma grande diversidade de solos, o Brasil possui recursos minerais em abundância presentes em seu território, podendo ser utilizado para o benefício da população e para a competitividade na economia global, de forma eficiente e sustentável. Nesse cenário, na mineração existem diversas possibilidades de exploração de recursos minerais, dos quais se destaca o alumínio (CARDOSO et al., 2011). Considerado o elemento mais abundante entre os metálicos e o terceiro elemento mais encontrado na crosta terrestre, o alumínio possui diversas aplicações, como nas indústrias de ligas metálicas, laminados e extrudados (ROOY, 1997). Além disso, o setor de reciclagem desse metal é totalmente ativo, uma vez que o alumínio é infinitamente reciclável, isto é, não ocorrem perdas de suas propriedades físico-químicas e de sua qualidade no processo de reaproveitamento. A alta reciclabilidade torna este metal essencial para a economia e para a sustentabilidade (CARDOSO et al., 2011).

O alumínio possui características notáveis, como baixa densidade ( $2,7 \text{ g cm}^{-3}$ ), comparada com a densidade do aço ( $7,83 \text{ g cm}^{-3}$ ), resistência física e à corrosão, impermeabilidade e maleabilidade elevada, viabilizando a fabricação de moldes e lâminas. Essas são algumas das propriedades importantes que permitem a utilização do alumínio na construção civil, em veículos aéreos e terrestres, no setor energético e no segmento de embalagens, em substituição a materiais como vidro e plástico, além de diversas outras aplicações (ROOY, 1997; ASHKENAZI, 2019).

Mesmo apresentando toda essa versatilidade, o alumínio é o metal mais jovem utilizado em escala industrial. Comparado com o aço, que começou a ser industrializado no começo dos anos 1800 (Gerdau Aços S/A), o alumínio ganhou visibilidade nos processos industriais e passou a ser comercializado há apenas 150 anos (ABAL, 2021). Em milênios passados, os persas, babilônios e egípcios utilizavam a argila que continha o óxido de alumínio para produzir vasos e recipientes, trazendo sofisticação e modernidade em diversos artefatos, porém não havia o conhecimento sobre os métodos de extração em maiores escalas, os quais surgiram posteriormente (ABAL, 2021).

A partir de 1800, começaram a surgir diversos processos, entre eles o descobrimento da bauxita, o minério mais comum do alumínio, e o isolamento a partir de seu cloreto. Anos mais tarde, em 1886, realizou-se o patenteamento do processo de obtenção do alumínio por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita, desenvolvido por um norte-americano e um francês, conhecido atualmente como processo Hall-Héroult, o qual permitiu o estabelecimento da indústria global do alumínio (ABAL, 2021).

Conseqüentemente a essa descoberta, e impulsionado pela Primeira Guerra Mundial, o alumínio passou a ser produzido industrialmente, para compor produtos mais leves, abastecendo todos os setores da economia. No Brasil, a comercialização em nível industrial do alumínio só ocorreu em 1944, no período da Segunda Guerra Mundial, consolidando uma grande expansão. No ano de 1955, foi fundada a Companhia Brasileira de Alumínio, a CBA, na cidade de Alumínio, São Paulo. Apesar de não possuir reservas de bauxita para extração, a cidade de Alumínio possui grande capacidade energética, insumo muito exigido para a transformação desse minério em metal com alto grau de pureza. A CBA realiza a extração da bauxita na cidade de Poços de Caldas, em Minas Gerais, e em sua unidade fabril, realiza o beneficiamento, produzindo a alumina e o alumínio primário (CBA, 2021).

O Brasil é um grande produtor mundial de alumínio primário, o qual é obtido após o processamento das matérias-primas bauxita e alumina, por meio de uma série de processos químicos, ocupando o décimo quinto lugar no ranking mundial, em 2019 (ABAL, 2019). Diferentemente do alumínio primário, o alumínio secundário é proveniente do metal resultante da reciclagem da sucata de alumínio (CARDOSO et al., 2011).

### **1.1 Produção de alumínio primário e reciclagem**

Analisando o perfil da indústria brasileira do alumínio, segundo a ABAL (2019), foram gerados cerca de 485 milhões de empregos diretos e indiretos relacionados ao setor do alumínio, com participação de 6,4% em relação ao faturamento do PIB industrial brasileiro. Devido ao crescimento e participação expressiva desse mercado, faz-se necessário o aperfeiçoamento do controle de qualidade no mercado metalúrgico de produção e reciclagem (ABAL, 2019).

Há muitos debates sobre a produção de alumínio primário, pois desde o processo de extração até a produção do metal, a demanda energética é muito alta. No Brasil, devido a abundância de água, foram construídas hidrelétricas para suprir essa necessidade, sendo que de toda energia elétrica produzida, aproximadamente 6% representam a utilização para o mercado de alumínio. Mesmo com todos os esforços para que seja disponibilizada energia, seus altos valores acabam inviabilizando a produção de alumínio, fazendo com que grandes unidades fabris produzam quantidades menores em relação a sua capacidade produtiva máxima (CARDOSO et al., 2011).

Desse modo, existem muitas vantagens no mercado de reciclagem do alumínio secundário, já que esse processo fornece uma economia energética de 95% em relação ao processo de produção de alumínio primário (ABAL, 2019). Além disso, o impacto ambiental

em relação a reciclagem do alumínio é menor, comparados ao processo do metal primário, que emite menos gases do tipo estufa como o CO<sub>2</sub> e gases como os CFC (clorofluorcarbono), substâncias que não são formadas no processo de reciclagem. Outros componentes altamente tóxicos são gerados para a produção do alumínio, como o coque e piche de petróleo, fluoretos e criolita, substâncias essas não produzidas durante o processo de reciclagem (CARDOSO et al., 2011).

Materiais de vários segmentos do alumínio são reciclados, dependendo de sua aplicabilidade. Cada segmento possui um tempo de vida do alumínio diferente, como por exemplo, no setor de construção civil e de abastecimento de energia elétrica, a média para que o alumínio seja reciclado é de 35 anos, devido ao seu tempo de vida longo e baixa degradação. Por outro lado, na indústria de embalagens, o retorno do metal para a reciclagem é de apenas alguns meses. Nesse sentido, o setor mais expressivo considerando embalagens, é o de latas, com nomenclatura convencionada de UBC (do inglês *use beverage can* – lata de bebida usada) (NIERO & OLSEN, 2016).

Figura 1 - Ciclo de vida das latas de alumínio



Fonte: Adaptado de LCA Consultores, (2020)

A reciclagem de latas de alumínio vem sendo realizada desde 1959 e foi introduzida no mercado em 1967 (ELMORE, 2012). No ano de 2019, foram recicladas 97,6% das embalagens de alumínio comercializadas no Brasil (ABRALATAS, 2020).

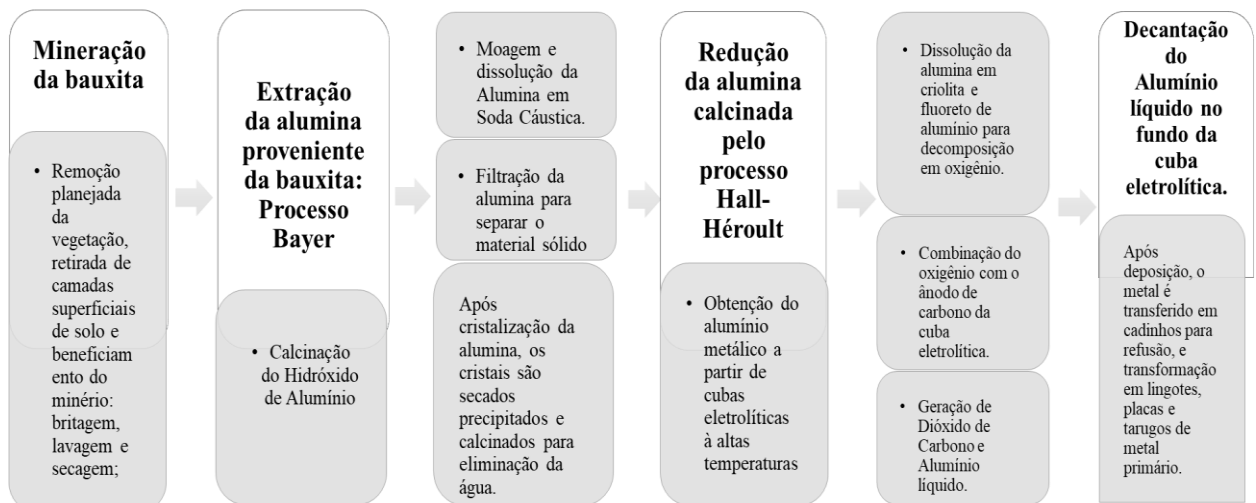
Considerando a reciclagem de latas, esse mercado representa um papel social significativo, uma vez que proporciona a geração de renda para milhares de trabalhadores e famílias (PINTO, 2019)

Para Calderoni (2003),

“A atividade da reciclagem assume diversas funções, apresentando relevância ambiental, econômica e social, com implicações que se desdobram em esferas como as seguintes: organização espacial, preservação e uso racional dos recursos naturais, conservação e economia de energia, geração de emprego e renda, desenvolvimento de novos produtos, finanças públicas, saneamento básico e proteção de saúde pública, além de redução de desperdício.”

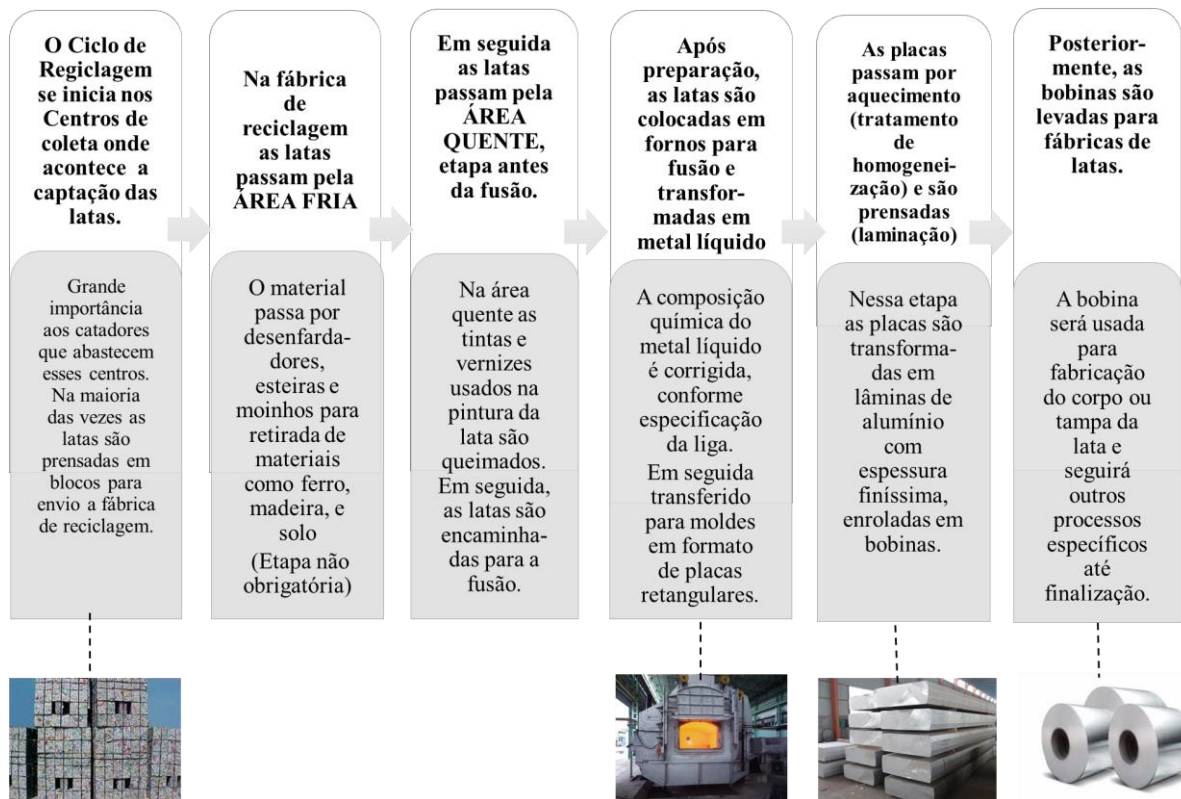
Seguindo essa tendência, comparando o processo produtivo para o alumínio primário, desde a sua extração, com o processo de reciclagem do alumínio secundário, é possível notar de modo simplista que várias etapas não são realizadas, denotando a importância do segmento de alumínio secundário. O processo de produção do alumínio primário é apresentado na Figura 1 e o processo de reciclagem da lata de alumínio é apresentado na Figura 2. Muitas etapas do processo de reciclagem com relação a produção do alumínio primário não são necessárias, como a extração inicial do minério bauxita para obtenção do alumínio, bem como as etapas que envolvem produtos químicos, utilizados nos processos Bayer e Hall-Héroult.

Figura 2 - Processo de fabricação do alumínio primário.



Fonte: Adaptado de CBA (2021)

Figura 3 – Processo de fabricação de alumínio secundário.



Fonte: Adaptado de Zumba (2016)

As principais etapas da reciclagem das latas de alumínio baseiam-se na seleção da sucata e no processamento. Na seleção, realiza-se a retirada de materiais ferrosos, não-ferrosos e do revestimento da lata. Já no processamento, algumas indústrias trituram a sucata, porém outras realizam somente a fusão e fundição. Em seguida, faz-se o ajuste da composição química da liga, adicionando os elementos que foram perdidos nas etapas anteriores e outros elementos necessários para ajuste dos requisitos da faixa, adicionando alumínio puro (virgem) ou secundário, de acordo com a liga final (WANG, 2007).

A reciclagem de latas no Brasil, além de ser uma fonte de renda de diversos trabalhadores que realizam sua coleta, mostra-se como um fator econômico importante, uma vez que sua demanda em relação a insumos, principalmente o energético, é reduzida consideravelmente se comparado ao processo de produção de alumínio primário. Segundo o Instituto Internacional do Alumínio, na reciclagem de 1 Kg de latas de alumínio para bebidas, economiza-se até 8 Kg de bauxita, 4 Kg de produtos químicos e 14 kWh de eletricidade (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2007).



A sucata de alumínio possui valor considerável e movimentada um grande mercado, o qual busca redução dos gastos energéticos para produzir o metal primário, optando pela reciclagem do metal secundário. Como a extração em massa de recursos naturais vai contra o desenvolvimento sustentável, pensar no caminho inverso à extração, ou seja, a reutilização, torna-se muito atrativo e viável (ELMORE, 2012).

Por esse motivo, a reciclagem de latas de bebidas usadas possui expressiva atenção e contribui para a sustentabilidade. O termo sustentabilidade tem ganhado visibilidade durante reuniões de órgãos importantes como a ONU, o qual contemplou a necessidade de não apenas o conhecimento da palavra, mas principalmente sua aplicação e implantação na sociedade. (PINTO, 2019) O termo sustentabilidade no dicionário Novo Aurélio, significa a ação a ser realizada, “*de conservar, manter, proteger, nutrir, alimentar, fazer prosperar, subsistir, viver.*” (FERREIRA, 1999)

Para Boff (2016), a sustentabilidade “[...] representa os procedimentos que tomamos para permitir que a Terra e seus biomas se mantenham vivos, protegidos, alimentados de nutrientes a ponto de estarem sempre bem conservados e à altura dos riscos que possam advir.” Desse modo, desconsiderando as questões puramente econômicas desse mercado de reciclagem, o mercado de alumínio secundário possui suas particularidades positivas em prol ao desenvolvimento da sociedade, contribuindo desse modo para a sustentabilidade (BOFF, 2016)

Portanto, devido à necessidade e opção de mercado atrativa, a reciclagem das latas de alumínio está em alta e promete permanecer. Estando cada vez mais em evidência as questões referentes a impactos ambientais e em como é possível colaborar para a sua diminuição, vários setores vêm se desenvolvendo, com o objetivo de criar e aprimorar metodologias que agreguem valor ao processo, para se manterem viáveis e seguirem políticas públicas, as quais exigem ações que contribuam para que a manufatura seja sustentável (ZUMBA, 2016)

Dentro desse contexto, a reciclagem das latas de alumínio contribui para o setor econômico de modo significativo. Por esse motivo, as indústrias investem em controles para o acompanhamento da qualidade do metal produzido, com o objetivo de manter as propriedades do alumínio tão estimadas. No caso da refusão das latas de alumínio, para serem convertidas em novas latas e outros produtos, é necessário o controle da composição química para confirmação da liga produzida, detecção de elementos contaminantes e a avaliação da estrutura metálica, por meio de técnicas de metalografia (ZUMBA, 2016)

Apesar da relevância da atividade de reciclagem das latas de alumínio, a literatura mostra poucos estudos experimentais a respeito da influência dos parâmetros de fundição na

recuperação após a reciclagem de latas de alumínio (VERRAN et al., 2008). Desse modo, o objetivo deste trabalho é o levantamento bibliográfico das técnicas de análise química e metalográfica de reciclagem de latas de alumínio e a elaboração de uma apostila técnica direcionada para o ensino superior, com o material encontrado.

## 2. METODOLOGIA

Utilizando como referência as normas nacionais da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), normas internacionais da ASTM (American Society for Testing and Materials), livros técnicos relacionados a ciência dos materiais e fundição e a coleção de livros Metals Handbook, da ASM, elaborou-se o presente trabalho reunindo as principais metodologias no controle da composição química e técnicas metalográficas utilizadas para monitoramento da qualidade do metal na produção das latas de alumínio.

Além dos materiais mencionados, foi consultado o portal de periódicos da CAPES, acessando bases nacionais e internacionais, como Scielo, Science Direct, Scopus e Web of Science. Nessas bases, adotou-se a procura de materiais técnicos com os termos palavras-chaves: “aluminum can recycling”, “chemical composition of aluminum can” e “aluminum can metallography”, utilizando a aplicação de filtros, voltados para documentos específicos que citassem essas palavras chaves.

A partir do levantamento bibliográfico das técnicas de controle da qualidade das latas de alumínio recicladas, elaborou-se uma apostila (APÊNDICE A) com orientações voltadas para laboratórios metalúrgicos, exemplificando métodos e melhores práticas utilizadas nesse segmento, e pouco difundida em cursos de graduação em química. A apostila possui vários conteúdos para serem aplicados no ensino superior, como suplemento a disciplina de química ambiental e correlatas, possuindo também vasta aplicação no mercado de trabalho.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos processos de produção e reciclagem do alumínio, verifica-se uma tendência a atividades dos setores de laboratórios metalúrgicos de fundição de ligas com enfoque no controle de qualidade. Nota-se essa preocupação, principalmente por grandes empresas do setor do alumínio, as quais estão aumentando as pesquisas e desenvolvimentos relacionados à reciclagem, investindo em novas tecnologias e equipamentos. Além de tecnologia de produção avançada, investe-se no desenvolvimento do nível técnico, com o intuito de produzir alumínio de alta qualidade (ZHOU et al., 2021).

O objetivo do acompanhamento dos parâmetros de análise química e metalografia nesses processos é minimizar as perdas devido a incompatibilidade entre as composições químicas do material secundário, verificando a existência de impurezas, contaminantes e a realização do balanço de massa para a adição de elementos de liga ou alumínio primário no ajuste da especificação desejada. Nesses casos, adiciona-se o alumínio de alta pureza para reduzir a concentração de contaminantes presentes no metal secundário, buscando cumprir os requisitos específicos da composição da liga (NIERO & OLSEN, 2016).

A técnica mais comumente utilizada para quantificação de ligas metálicas é a Espectrometria de Emissão Óptica (FARNSWORTH, 1997; VERRAN et al., 2008). O espectrômetro de emissão óptica é um equipamento específico e pouco abordado pelos cursos de química. Esse equipamento, apesar de ser um investimento alto para compra e manutenção, é bastante encontrado e utilizado em laboratórios de controle da qualidade da produção de ligas de metal reciclado como o alumínio, assim como exposto por Verran & Kurzawa (2008) e Zhou et al. (2021), que utilizam a espectrometria de emissão óptica no controle de qualidade na recuperação de latas de alumínio.

Dentro do contexto da composição química de ligas de alumínio, especificamente para as latas utilizadas no armazenamento de refrigerantes e cervejas, por exemplo, mostra-se extremamente necessária a avaliação dos elementos presentes na composição para verificação dos intervalos de concentração e se estão seguindo as normativas estabelecidas, relacionando esses valores com a influência dos elementos químicos na liga de alumínio.

#### 3.1 Composição química da lata de alumínio

Para a produção de latas de alumínio, é muito importante o controle da composição química, pois existem elementos nocivos que podem contaminar a liga e causar danos ao produto. Do mesmo modo, há os elementos de liga, que possuem controle de especificação

mínima e máxima, e são adicionados ao metal líquido antes de ser transformado em produto (ZUMBA, 2016)

Para a fabricação das latas de alumínio, utiliza-se principalmente as ligas com nomenclaturas das séries 3000 e 5000. Essas ligas possuem elementos específicos predominantes, e são fabricadas a partir de processamentos distintos, por duas partes essenciais: o corpo e a tampa da lata (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2007) Para o corpo da lata, utiliza-se a liga de alumínio AA 3004 e para a tampa, a liga AA 5182 (VERRAN et al., 2005; NIERO & OLSEN, 2016)

A denominação de “ligas” refere-se ao alumínio puro com o acréscimo de outros elementos em menor quantidade, com o objetivo de melhorar suas propriedades, principalmente para aumentar a resistência mecânica. O alumínio destaca-se em relação à resistência mecânica em função da massa, comparado com o aço, sendo superior nesse quesito. Os principais elementos acrescentados para essa função são o magnésio, cobre, manganês, silício e zinco (VIJAYAKUMAR et al., 2021).

A nomenclatura das ligas de alumínio é padronizada com 4 dígitos, em que o primeiro indica a classe geral ou série, caracterizada pelos principais elementos de liga. As denominações das séries das ligas e os principais elementos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Nomenclatura e elementos característicos de Ligas de alumínio forjado.

Série	Principais elementos:
1xx.x	Alumínio puro $\geq 99,0\%$
2xx.x	Cobre
3xx.x	Manganês
4xx.x	Silício
5xx.x	Magnésio
6xx.x	Magnésio e Silício
7xx.x	Zinco
8xx.x	Ferro e Silício
9xx.x	Série não utilizada

Fonte: Adaptado de Cayless (1990)

Referente aos tipos de liga de alumínio, a classe 1xxx refere-se ao metal comercialmente puro, acima de 99%. A classe 2xxx as ligas que necessitam de tratamento térmico e as ligas da classe 3xxx são as que não são tratáveis termicamente. Para a produção de latas utiliza-se a liga 3004, e não há necessidade do tratamento térmico. Porém, são reforçadas por trabalho a frio, que ocorrem durante as etapas de laminação ou forjamento, aumentando desse modo sua resistência. Essa liga é utilizada para produção do corpo da lata,

uma vez que possui força moderada e boa capacidade de trabalho (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2021)

A composição das ligas de alumínio que constituem a lata são padronizadas e controladas pela norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas, a NBR ISO 209, a qual define o sistema de classificação e especifica as designações que indicam a composição química do alumínio e suas ligas (ABNT, 2010) Na Tabela 2 são apresentadas as composições químicas das ligas utilizadas na fabricação da lata de alumínio.

Tabela 2 - Composições químicas em porcentagem (m/m) das ligas utilizadas na fabricação da lata de alumínio.

Liga	% (m/m)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Outros (cada)	Outros (total)	Al
Al 3004 (Corpo)	Máximo	0,3	0,7	0,25	1,5	1,3	0,25	-	-	0,05	0,15	Restante
	Mínimo	-	-	-	1	0,8	-	-	-	-	-	
Al 5182 (Tampa)	Máximo	0,2	0,35	0,15	0,5	5	0,25	0,1	0,1	0,05	0,15	Restante
	Mínimo	-	-	-	0,2	4	-	-	-	-	-	

Fonte: ABNT NBR ISO 209 (2010)

Estudos como o de Verran e Kurzawa (2008), exemplificam que a separação correta das latas de alumínio, sem outros metais contaminantes misturados, apresenta uma composição química muito próxima ao intervalo de especificação da liga de alumínio 3004 normatizada, sendo necessário apenas adição de alguns elementos para acerto de composição.

Em relação as propriedades atribuídas aos elementos químicos presentes na lata de alumínio, para a liga 3004 destaca-se o elemento de liga manganês, o qual é responsável pela maior resistência da liga comparando com as da série 1xxx. Na liga 5182 o elemento em destaque é o magnésio, o qual melhora expressivamente a resistência da liga. Ligas contendo magnésio como elemento de liga também são utilizadas em ambientes marinhos, devido a boa resistência à corrosão (DAVIS, 2001).

Segundo Davis (2001), para as ligas de alumínio em geral, a quantidade de elementos de liga adicionados constitui cerca de até 10% da composição da liga. Já para os elementos contaminantes, normalmente representa menos de 0,15% cada um. A maioria das impurezas são provenientes de contaminações do metal ou da própria estrutura química, e são representadas por traços. Os elementos contaminantes das ligas que compõem a estrutura da

lata são: cromo, ferro, silício, titânio e chumbo (LØVIK & MÜLLER, 2014). Já os elementos de liga, ou seja, elementos que possuem uma faixa de composição com valores mínimos e máximos estipulados e que são adicionados a liga, são o manganês e magnésio.

Em relação aos contaminantes, o ferro é o contaminante mais comum encontrado no alumínio puro, proveniente do excedente do refino da bauxita nos processos de extração. O ferro reduz o tamanho dos grãos em produtos forjados, mas em contrapartida, em ligas como as da série 8006, combinado com manganês, fornece a liga resistência e ductilidade. (VIJAYAKUMAR et al., 2021).

Outro contaminante encontrado é o cromo, prejudicial para as ligas de alumínio, pois possui característica de se unir a outras impurezas como o manganês, ferro e titânio, formando partículas muito grosseiras, que prejudicam a qualidade da lata. O elemento silício é o segundo principal contaminante do alumínio comercial eletrolítico. Esse elemento é utilizado em outras ligas como elemento principal adicionado, como no caso das ligas da série 4xxx e 6xxx, que produzem as rodas de ligas leves, sendo responsável por melhorar a capacidade de fundição e a fluidez. (DAVIS, 2001)

O titânio também é uma impureza comum do alumínio comercial e seu excesso pode prejudicar na condutividade elétrica do alumínio em ligas da série 1xxx. Nas latas de bebida, encontra-se titânio proveniente da tinta utilizada no recobrimento da lata, e o controle da especificação máxima ocorre na liga Al 5182, a qual compõe a tampa da lata (OOSUMI, 1994).

O magnésio é o principal elemento de liga na série 5xxx, com porcentagens em torno de 5,0%. Na liga 5182, a adição de magnésio aumenta significativamente a resistência do alumínio a corrosão e soldabilidade. Quando as latas são refundidas, ocorrem maiores variações com relação a composição inicial do elemento magnésio (< 4,0%), sendo necessário realizar correções com a adição desse metal ao banho da liga. Por ser um elemento químico extremamente reativo com o oxigênio, o magnésio sofre perdas em sua composição no processo de fusão e refusão, aumentando a importância do acompanhamento da análise química nessa etapa (VIJAYAKUMAR et al., 2021, VERRAN et al., 2008).

O zinco é um elemento controlado em ambas as ligas que constituem a lata de alumínio, e seu excesso pode causar corrosão e craqueamento. Em outras ligas da série 7xxx, utiliza-se o zinco com pequenas adições de estanho para aumentar a resistência da liga, já que se eleva o potencial de solução. Utiliza-se ligas da série 7xxx como proteção para revestimentos e em ânodos de sacrifício em ambientes marinhos (BRAY, 1997)

O manganês é uma impureza comum encontrada no alumínio primário, e em concentrações acima de 50 ppm diminui a resistividade do metal. Na liga 3104, referente ao corpo da lata, em conjunto com o magnésio, o manganês aumenta a resistência da liga, conformabilidade e resistência à corrosão. O manganês também é utilizado para controlar a estrutura dos grãos e está presente na forma sólida no alumínio em solução, em partículas submicroscópicas de precipitado. Esses constituintes não afetam o início da corrosão já que são quase iguais aos da matriz de solução sólida. Porém, em quantidades acima de cerca de 2,0% há formação de precipitados em forma de cristais intermetálicos que afetam e contribuem para o início da corrosão (DAVIS, 2001).

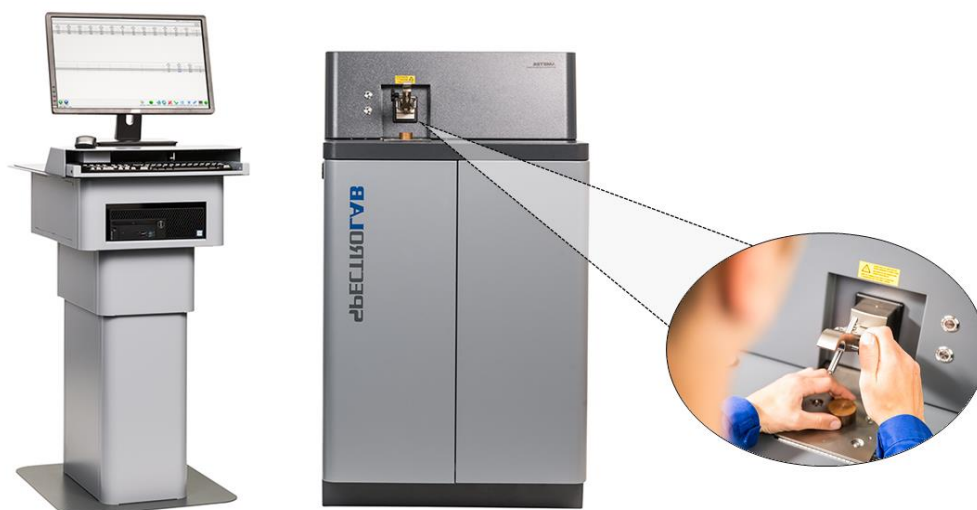
É importante ressaltar que a característica de cada elemento presente na composição química se relaciona ao tipo de liga em questão, uma vez que, para outros segmentos, alguns elementos são utilizados para promover melhorias ao processo, como controlar a estrutura de grãos, evitar a recristalização, diminuir corrosão, entre outras aplicações. É necessário entendimento dessas características únicas para cada liga e processo.

### **3.2 Funcionalidade e operação de um Espectrômetro de Emissão Óptica**

Bastante utilizado no setor metalúrgico, o Espectrômetro de Emissão Óptica (EEO) é um equipamento robusto, que em poucos minutos consegue identificar a composição química de metais previamente selecionados em uma amostra sólida. O EEO é utilizado em diversos segmentos das indústrias metalúrgicas fabricantes de alumínio, zinco, cobre, aço, entre outros metais. Essa técnica baseia-se em aplicar uma fonte externa de energia em uma amostra sólida, onde será medida a radiação emitida pelos átomos dos elementos presentes nessa amostra e em seguida quantificada (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2007)

Figura 4 – Modelo de Espectrômetro de Emissão Óptica, Spectrolab S com ampliação da câmara de queima

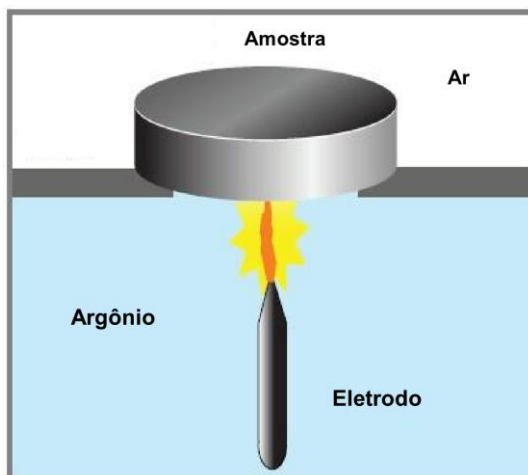




Fonte: Adaptado de Spectro Analytical Instruments (2022)

A amostra a qual se deseja descobrir a composição química, deve ser posicionada na câmara de queima acima do eletrodo. O equipamento possui um sistema que aciona uma descarga elétrica de baixa tensão (queima) entre a superfície da amostra condutora e o eletrodo (Figura 5), ocorrendo a excitação dos átomos das espécies que compõem a amostra, levando seus elétrons a níveis mais elevados de energia. Quando esses elétrons retornam ao estado fundamental, a energia recebida é liberada na forma de radiação eletromagnética (luz) com comprimento de onda característico do átomo, e por meio de sistemas de dispersão, separa-se esses comprimentos de onda específicos de cada elemento químico. Os fotomultiplicadores são utilizados para a detecção da intensidade da luz de cada um dos comprimentos de onda emitidos, determinando assim os elementos presentes e sua concentração. Cada elemento tem uma estrutura eletrônica única, e o comprimento de onda de uma radiação emitida é uma propriedade característica de cada elemento individual. Toda essa informação é convertida por meio de sistemas e softwares computadorizados, que resumem os resultados na tela do computador (SLICKERS, 1993).

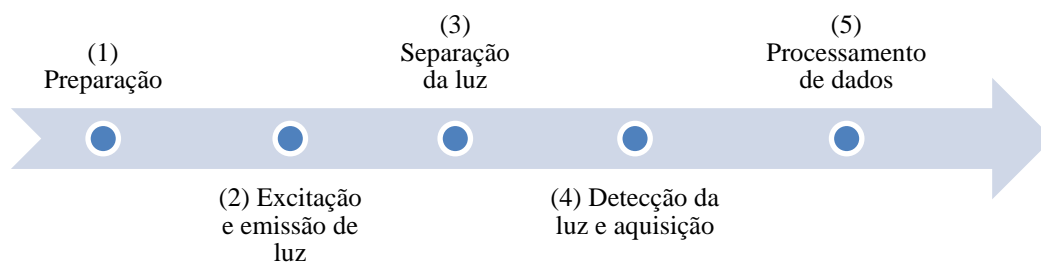
Figura 5 – Descarga elétrica aplicada em uma amostra a partir do eletrodo.



Fonte: Adaptado de Martins (2006)

A sequência analítica resumida do Espectrômetro de Emissão Óptica (EEO) está descrita na Figura 6.

Figura 6 – Sequência analítica do EEO.



Fonte: Adaptado de Martins (2006)

No Espectrômetro de Emissão Óptica (EEO), a excitação da amostra ocorre a partir da descarga de uma centelha elétrica, produzindo intensidades de radiação emitida pelos átomos dos elementos químicos. A intensidade de cada comprimento de onda é quantificada e correlacionada com a concentração do elemento a partir da curva de calibração do equipamento.

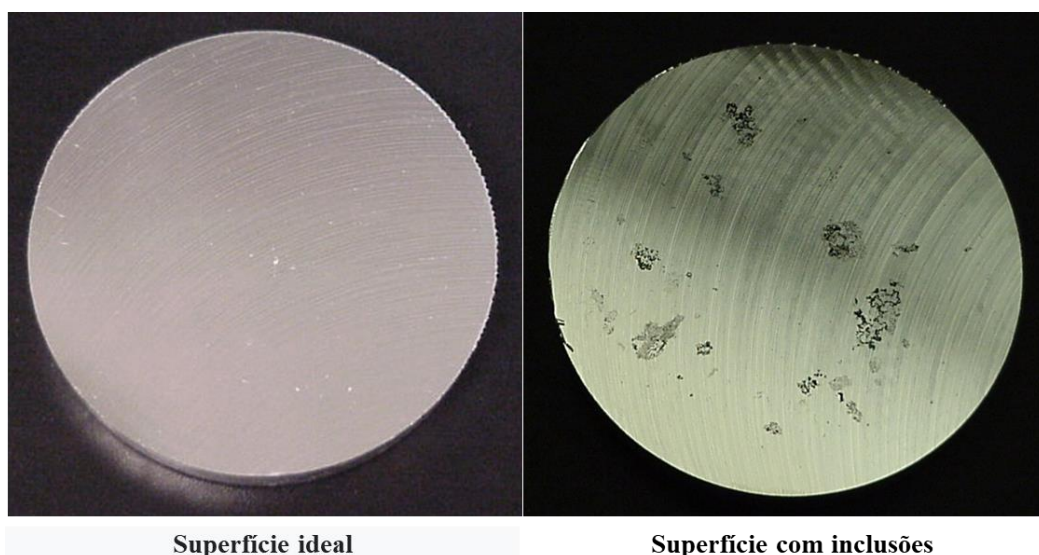
A curva de calibração funciona para maior confiabilidade dos resultados obtidos, e utilizam-se materiais de referência, chamados de padrões, os quais possuem homogeneidade com relação a sua composição química e física. Normalmente, os padrões de referência são fornecidos pelo fabricante do equipamento, e recomenda-se a realização da calibração regularmente. A calibração correlaciona a intensidade da luz emitida com sua concentração, enviando pelo sistema eletrônico para o computador o processamento dos dados analíticos

(MARTINS, 2006). Desse modo, o OEE compara as concentrações da curva pré-instalada com a amostra que está sendo analisada, identificando o elemento em questão e sua porcentagem em massa (MURTA, 2013).

Em relação aos elementos a serem analisados, a funcionalidade do equipamento depende da quantidade de fendas instaladas. Essas fendas fazem parte dos recursos de dispersão, portanto a análise simultânea de elementos é resultante da instalação dessas fendas secundárias, as quais são fixas para cada linha analítica selecionada. O equipamento já está pré-determinado a realizar análises em uma base específica, e caso ocorram elementos que não estejam instalados nas fendas, esses serão quantificados como “Outros elementos”, porém não serão identificados individualmente. A base do equipamento refere-se aos elementos predominantes da liga metálica a ser analisada: alumínio, zinco, magnésio, ferro, entre outras bases, e alguns equipamentos possuem mais de uma base instalada, sendo necessário um conhecimento prévio da amostra que será analisada para selecionar o método apropriado (MARTINS, 2006).

Após as configurações do equipamento, é necessária uma preparação cuidadosa da amostra a ser analisada, deixando-a com uma superfície plana, livre de inclusões, arranhões e sujeiras causadas pelo manuseio (ASTM, 2016). O padrão de qualidade do corpo de prova para análise é apresentado na Figura 8.

Figura 7 – Padrão de qualidade do corpo de prova para análise.



Fonte: Acervo da autora (2021)

O Espectrômetro de Emissão Óptica possui algumas limitações, em relação a determinação de alguns elementos, como o nitrogênio, oxigênio e hidrogênio. O formato da amostra deve ser compatível com o tamanho da câmara para realização da queima e os métodos precisam ser previamente instalados, pois fornecem respostas que são dependentes da composição da matriz a ser analisada (FARNSWORTH, 1997).

Orientações sobre o formato padronizado da amostra para testes em espectrômetros estão disponíveis na norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas “ABNT NBR 14939 Alumínio e suas ligas: coleta e preparação de amostras para análise química por espectrometria de emissão óptica”, publicada em janeiro de 2021. A norma brasileira é uma publicação recente e uma adaptação das normas internacionais. As normas internacionais sempre foram referência para consulta: a norma ASTM E716, que disponibiliza as práticas padrão para amostragem e preparação de amostras de alumínio e suas ligas para determinação de composição química por Espectrometria de Emissão Atômica (ASTM, 2016) e a norma ASTM E1251, sobre o método de teste padrão para análise de alumínio e ligas de alumínio por Espectrometria de emissão atômica (ASTM, 2018).

A norma ASTM E716 recomenda moldes para confecção da amostra, confeccionados de ferro maciço ou aço. Outros moldes de diferentes tipos, materiais e dimensões podem ser substituídos, desde que haja uniformidade das amostras obtidas (ASTM, 2016).

Figura 8 – Molde e amostra com formato padronizado pela Norma ASTM E716 para análise em OEE.



Fonte: Acervo da autora (2022)

Além dos espectrômetros de emissão óptica, utilizam-se outros tipos de equipamentos para quantificação da composição química, como a Fluorescência de Raios-X, a

Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente e Espectroscopia de Absorção Atômica (CALLISTER, 2016). A Fluorescência de raios-X, semelhante a espectrometria de emissão óptica, é utilizada para análise elementar de constituintes em concentrações menores. A Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente, é uma técnica instrumental com detecção em níveis baixíssimos, em que a amostra precisa estar no estado líquido e totalmente solubilizada. Por fim, a Espectroscopia de Absorção Atômica, também com a amostra no estado líquido, possui sensibilidade e precisão favoráveis para a maioria dos elementos, porém a maioria dos equipamentos disponíveis possuem método de análise único, sendo ineficiente para análise de multielementos (FARNSWORTH, 1997).

Na indústria de reciclagem de alumínio utilizam-se espectrômetros de emissão para controle da composição química na etapa de refusão das latas. É realizada a produção das ligas para o corpo e tampa da lata, as quais são ligas de composições diferentes. Nessa etapa, é necessário garantir as especificações normalizadas, identificando qualquer possível interferência proveniente da coleta das latas, como peças de composição diferente do alumínio que possam contaminar aquela porção de metal (banho). O EEO também é utilizado para corrigir os elementos de liga, adicionando ou não algum elemento que esteja desbalanceado e fora da especificação estabelecida. A falta de controle sobre a composição química pode promover um efeito maléfico para as indústrias que trabalham com a reciclagem de alumínio, causando perda em suas propriedades físicas e conseqüentemente latas de baixa qualidade, fazendo com que estas retornem para a refusão (PINTO, 2019).

### **3.3 Estudo metalográfico**

Campo muito importante da Ciência de Materiais, a metalografia é o estudo da morfologia e estrutura dos metais. Técnicas metalográficas permitem a observação de seções bidimensionais de materiais que possuem estrutura tridimensional. A importância do estudo metalográfico está na relação dos dados com a composição química, estrutura metalúrgica e propriedades físicas e mecânicas das ligas metálicas. Uma vez conhecendo e mapeando essas características, o estudo metalográfico contribui para o controle da qualidade do processo de fabricação de um material, fornece informações importantes para engenharia de processo, podendo ser executado por profissionais da engenharia, técnicos e químicos, já que é um exame rápido e de custo relativamente baixo para as empresas (COLPAERT, 2008).

A aplicação da metalografia é utilizada para identificação e caracterização da estrutura do material, tipos de fases, tamanhos e contornos de grãos; divide-se em técnicas

macroscópicas e microscópicas, podendo ser qualitativa, com observação da microestrutura, identificação de inclusões, contornos de grãos e microconstituintes, ou quantitativa, com a determinação desses constituintes, o tamanho dos grãos e contagem de número de inclusões. A micrografia está relacionada a influência a certas propriedades de metais e ligas, utilizada para atender controles normativos ou requisitos microestruturais específicos (NORMA E3-95, 1993). A técnica metalográfica requer cuidados, uma vez que é necessário a criteriosa seleção da área a ser analisada até a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios (COLPAERT, 2008).

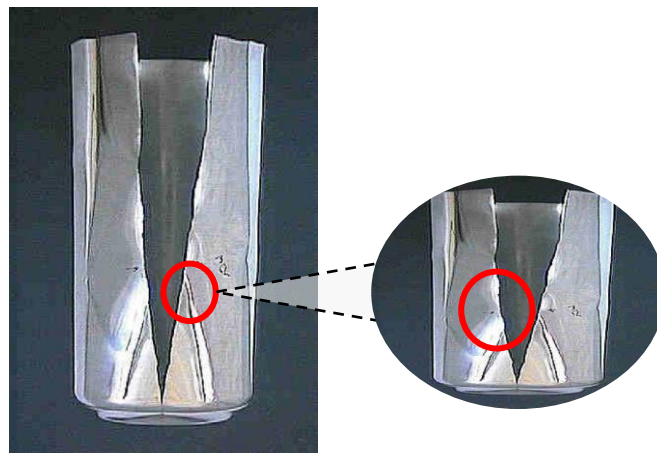
### **3.4 Preparação de amostras para análise metalográfica**

Com base no produto acabado, é possível a interpretação de muitos defeitos de liga a partir da avaliação de sua estrutura, sendo necessário a preparação de amostras para análise metalográfica. Para a análise da microestrutura da amostra, utiliza-se as técnicas macrográfica e micrográfica. Ambas as técnicas consistem na avaliação do aspecto de uma peça ou amostra metálica a partir de uma sessão previamente preparada, plana e em alguns casos polida com reativo adequado. Utiliza-se a manipulação mecânica como método mais usual de preparação de amostras para análises em microscópios, sendo que o requisito específico para a superfície é determinado pelo tipo particular de análise ou exame. As amostras podem ser preparadas com um acabamento perfeito, revelando a verdadeira estrutura metálica, ou a preparação pode ser interrompida quando a superfície for aceitável para um exame específico (STRUERS INC., 2021) A técnica de macrografia é realizada visualmente em tamanho natural, com o auxílio de uma lupa ou um microscópio estéreo, não requerendo equipamento sofisticado, já que para esse caso é necessária uma ampliação de no máximo 10 vezes. Amostras que necessitam de ampliação acima de 10 vezes, é requerido o uso de microscópios, utilizando a técnica de micrografia (COLPAERT, 2008).

As etapas de preparação de uma amostra ou corpo de prova para ensaios de metalografia baseiam-se na escolha e localização da seção a ser estudada, a preparação da superfície plana e polida e, se necessário, o ataque químico da superfície. A norma ASTM E3-95, sobre a Prática Padrão para Preparação de Amostras Metalográficas, especifica a seção de análise, porém a determinação da área para ser realizado o ensaio é livre, podendo selecionar várias regiões com o intuito de relacionar a microestrutura com as propriedades físicas e o processo de fabricação (ASTM, 1993).

Na metalografia de ligas de alumínio, primeiramente aplica-se a avaliação visual para verificação de falhas de componentes mecânicos, defeitos superficiais ou corrosão. Interpreta-se o aspecto da superfície de um material após realização das etapas básicas da metalografia: corte, lixamento ou usinagem e ataque com reagente, se necessário. Essa etapa é muito importante, já que fornece resultados iniciais e ajuda na determinação das seções a serem analisadas (SARTORI, 2020).

Figura 9 – Análise visual de defeito na lata de alumínio.



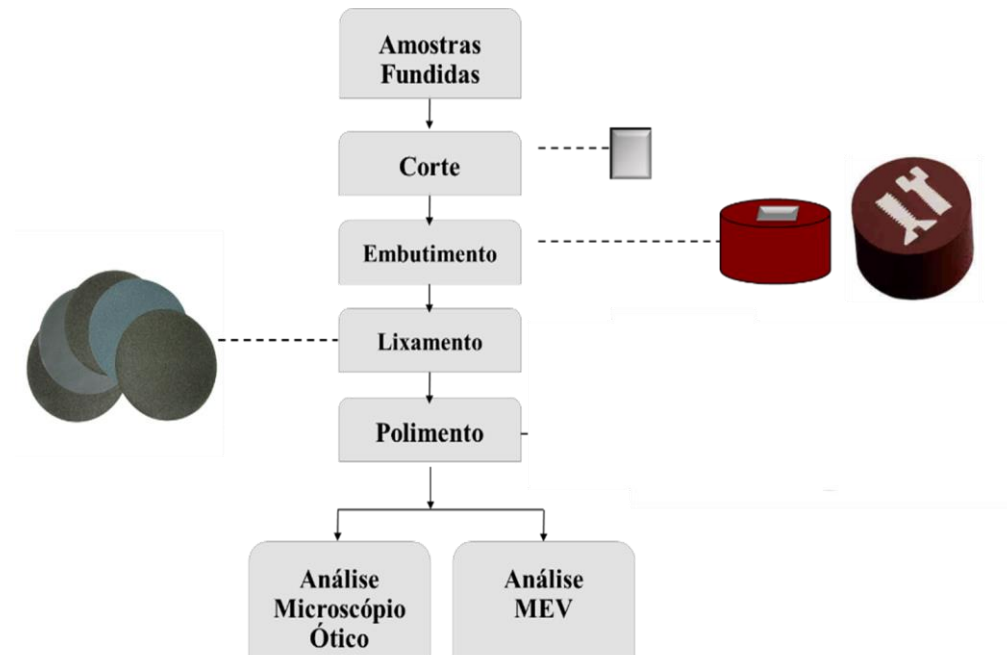
Fonte: Adaptado de Sartori (2020)

Análises mais específicas se fazem necessárias, utilizando a análise micrográfica, aprofundando a avaliação da microestrutura do material. Nessa análise, a amostra deve seguir com as etapas básicas de preparação, devendo estar plana, polida e atacada com reagente adequado. São requeridos equipamentos de Microscopia Óptica, processamento e análise de imagem e, em alguns casos, Microscopia Eletrônica de Varredura (STRUERS INC., 2021).

As etapas de preparação metalográfica para as ligas de alumínio seguem uma sequência, na qual cada passagem é de suma importância para o resultado da análise. O processo básico de preparação manual do corpo de prova é a remoção superficial de imperfeições, utilizando partículas abrasivas em etapas sucessivamente mais finas para remover o material da superfície, até que o resultado desejado seja alcançado. Inicialmente, realizam-se cortes sem grande rigor e quantos necessários na amostra ou corpo de prova, garantindo uma boa região para análise e um tamanho que se adeque ao microscópio. Na etapa do embutimento, a amostra é colocada em um molde, o qual é preenchido com resina sintética para que a área a ser analisada fique sem arestas cortantes que possam machucar o analista ou danificar as lixas e panos de polimento. Com a amostra embutida nesse molde,

procede-se à etapa de lixamento, utilizando lixas d'água de granulometrias cada vez mais finas, que irão retirar as marcas mais profundas do corte. Por fim, realiza-se o polimento utilizando panos especiais e próprios para o acabamento da peça, retirando todo e qualquer risco que possa atrapalhar na visualização da microestrutura e defeitos da liga (SARTORI, 2020).

Figura 10 – Etapas de preparação metalográfica.



Fonte: Adaptado de ABAL (2020)

### 3.4.1 Corte do corpo de prova

O início da metalografia se dá a partir do corte do corpo de prova, realizando a escolha da melhor seção e localização para a análise. Nos corpos de prova, para a avaliação da liga da lata de alumínio, realiza-se o corte longitudinal, pois esse abrange toda a geometria regular com possibilidade para análise (COLPAERT, 2008).

Para realização do corte do corpo de prova, utilizam-se serras-fita manuais ou equipamentos específicos para metalografia, como as cortadeiras metalográficas, policortes ou “Cutt-Off”. Essas máquinas podem ser de bancada ou suspensas. O corte se dá a partir de discos de cortes de materiais abrasivos e refrigeração contínua com água ou outros reagentes, evitando assim deformações da superfície do corpo de prova devido ao aquecimento (ROHDE, 2010). Essa é uma das maiores preocupações, já que a superfície a ser analisada não deve ter alterações significativas, como danos profundos de difícil remoção durante a etapa de polimento (ASTM, 1993).



A escolha do disco de corte também é importante. No mercado existem modelos adequados para ligas específicas, dependendo da natureza e dureza dos grãos do material a ser cortado. De modo geral, discos abrasivos de óxido de alumínio são utilizados para ligas ferrosas e discos de carbetto de silício para ligas não-ferrosas (ASTM, 1993).

Durante o corte, é possível interceptar o corpo de prova em várias seções, de acordo com a necessidade do ensaio. Comumente, utiliza-se uma amostra com tamanho entre 12 e 25 mm<sup>2</sup> de área ou esse mesmo valor para diâmetro (em amostras arredondadas) para realização da análise. Em casos de peças muito grandes, o ideal é sempre cortá-las, uma vez que quanto maior a amostra, mais difícil é a realização de sua preparação. Em amostras menores utiliza-se a etapa de embutimento, sem a necessidade de corte (ASTM, 1993).

Ainda durante o corte, busca-se o mínimo de perturbação na superfície da amostra, executando o corte idealmente em velocidade moderada e contínua. Desse modo, evita-se que a refrigeração seja insuficiente, minimizando possíveis modificações na estrutura superficial da amostra, como rebarbas de metal. (ROHDE, 2010).

#### ***3.4.2 Embutimento do corpo de prova***

O embutimento da amostra é opcional, mas comumente aplicado, pois além de contribuir para a qualidade do lixamento, facilita no manuseio de peças pequenas, retira as arestas cortantes do corpo de prova e seleciona uma área de interesse que ficará em total evidência, envolta por um material adequado, como as resinas poliméricas. O embutimento pode ser a frio ou a quente e suas principais diferenças estão nos insumos utilizados (ROHDE, 2010)

No embutimento a quente faz-se o uso de um equipamento denominado *prensa de embutimento*, onde ocorre uma pressão e aquecimento para efetuar a polimerização do material termoplástico, geralmente a baquelite. A baquelite é um material de baixo custo, boa dureza e confere resistência e proteção a possíveis choques em torno da amostra selecionada durante as etapas de lixamento e polimento. (COLPAERT, 2008)

A prensa de embutimento possui um êmbolo na parte inferior e a amostra fica posicionada em um compartimento específico onde adiciona-se a resina recomendada. Em seguida, aplica-se uma pressão e temperatura para que ocorra a polimerização da resina; a amostra fica envolta dessa resina sólida, ou seja, se transforma em uma peça com a superfície livre para realização da preparação metalográfica (ROHDE, 2010)

No embutimento a frio utilizam-se moldes fabricados, geralmente de silicone. A amostra é inserida na cavidade do molde e preenchida com resinas sintéticas de polimerização

rápida e um catalisador. Nesse processo ocorre uma reação exotérmica, chegando a temperaturas de até aproximadamente 120°C. Essa técnica é utilizada para embutimento de peças frágeis e com morfologia complexa (SARTORI, 2020). Nesse tipo de embutimento não é necessário equipamento, porém requer um tempo maior para aguardar a polimerização da resina sintética, que em casos de amostras em grande escala, torna-se ineficiente. Para aplicações na universidade, é um método com preço e materiais mais acessíveis.

Em alguns casos, o corpo de prova possui dimensões da superfície para análise relativamente grandes, não havendo a necessidade de realizar o embutimento (ROHDE, 2010).

### ***3.4.3 Lixamento***

O lixamento do corpo de prova é uma etapa que necessita de tranquilidade e escolha de insumos adequados. Comumente aplica-se o uso de lixas d'água, folhas de material abrasivo, semelhante às lixas utilizadas na preparação de paredes para pinturas. A granulometria das lixas dá-se de forma numérica, e quanto mais baixa essa numeração, mais abrasivos serão seus grãos (mais grossa será a lixa). Os abrasivos mais utilizados são o óxido de alumínio, Diamante e Carbetto de Boro (ROHDE, 2010).

Essa operação baseia-se na retirada de riscos e marcas profundas provenientes do corte, preparando a superfície para o polimento, podendo ser realizada manual ou automaticamente. O método manual foi muito utilizado no início do desenvolvimento de técnicas de metalografia, e atualmente, em escala industrial, não é recomendado. O processo de lixamento manual demanda um tempo considerável e depende da habilidade do operador, agregando muitas fontes de erro e diferenças devido a maneira operacional aplicada. Para fins didáticos, essa técnica é funcional e pode ser aplicada em laboratórios de ensino, já que não é necessário investimentos na aquisição de uma lixadeira politriz (ASTM, 1993).

As lixas d'água para as lixadeiras politriz possuem formato redondo e são posicionadas em um disco de mesmo formato, presas com um anel para fixação. Esse disco pode ser controlado e se mantém em movimento giratório, com adição ou não de água ou outro consumível (ROHDE, 2010).

A execução do lixamento ocorre a partir de uma sequência com lixas de diferentes granulometrias, partindo da mais grossa para mais fina, sempre alternando a direção quando substituída uma lixa nova e girando 90° a posição da amostra. (ASTM, 1993).

Para a metalografia do alumínio e suas ligas, a sequência de granulometria normalmente usada são as lixas de 100, 220 e 320 grãos para retirada de marcas profundas

advindas do corte por cisalhamento e depois a aplicação de lixas de 400, 600, 800 e 1200 grãos, para acabamento da superfície. Cada lixa terá a função de retirar a marca da anterior, objetivando deixar a amostra o mais plana possível. Importante ressaltar que esse processo e escolha das granulometrias de lixas podem variar conforme a disponibilidade no local e precisão exigida no processo (FOGAZZI, 2013).

#### ***3.4.4 Polimento***

A execução do polimento dá-se após a realização do lixamento, utilizando-se panos em formato circular que também podem ser acoplados no disco da politriz com o auxílio de um anel de fixação. Os panos usados variam de acordo com a liga, normalmente são confeccionados de tecidos felpudos, como náilon ou camurça sintética. Quanto mais macios forem, melhor será o acabamento superficial da amostra. Porém, há casos em que se utilizam panos de materiais específicos e sem maciez. Também acompanham esse processo insumos como pasta de diamante, sílica coloidal e alumina, que usadas com água destilada, melhoram a lubrificação entre o pano, o corpo de prova e a superfície, retirando os últimos riscos provenientes do lixamento e deixando a amostra com aspecto espelhável (ASTM, 1993).

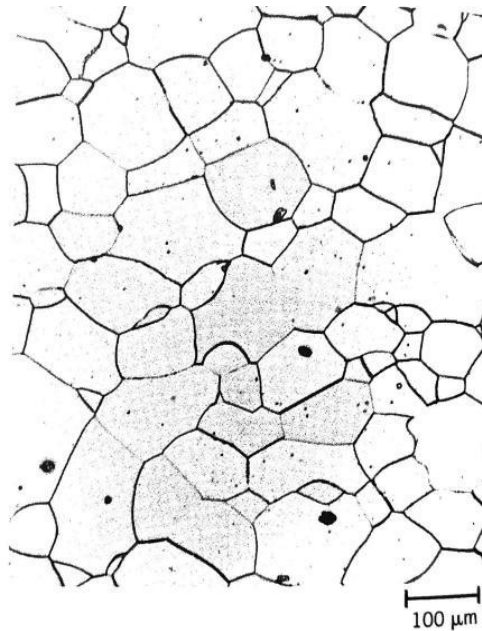
O método de polimento pode ser realizado manualmente ou automaticamente. No método manual, segura-se a amostra com as mãos, apoiando-a sobre o disco giratório em movimento com o pano de polimento regado com o abrasivo a ser utilizado. É importante a execução de movimentos elípticos, em volta de seu próprio eixo, com segurança e firmeza no apoio a amostra. Essa etapa deve ser rápida, com o objetivo de retirar os últimos riscos provenientes da lixa de malha mais fina (ROHDE, 2010). Métodos automáticos são utilizados em indústrias com alto volume de análises e que necessitem de parâmetros operacionais estritamente controlados. Nesse caso, o equipamento é capaz de acoplar várias amostras e realizar movimento e pressão sobre o pano de polimento, em um tempo estipulado, sempre objetivando o acabamento da amostra para realização da análise (SARTORI, 2020).

#### ***3.4.5 Ataque químico***

O ataque químico é utilizado para permitir a identificação dos diferentes tipos de grãos e das fases presentes na microestrutura da amostra. Com a exposição da luz do microscópio sobre a superfície metálica, a reação do ataque químico irá modificar a estrutura, criando contrastes que irão diferenciar os detalhes microestruturais, deixando-os facilmente visualizáveis por meio do sistema óptico (ROHDE, 2010).

Nesse contexto, escolhe-se um reagente que produza uma textura diferente para cada fase, podendo distingui-la uma da outra. Os átomos localizados em volta da região de contorno dos grãos são quimicamente mais reativos e se dissolvem facilmente em comparação aos átomos localizados no interior dos grãos, formando pequenos sulcos, os quais refletem a luz em ângulos diferentes dos grãos e são identificados na imagem microscópica em linhas mais escuras (Figura 12) (CALLISTER, 2016).

Figura 11 – Fotomicrografia de uma superfície com os contornos dos grãos em tons mais escuros.



Fonte: Callister (2016)

O reagente universal mais utilizado para ligas de alumínio é o ácido fluorídrico em concentrações baixíssimas, em torno de 0,5%. Reagentes como os ácidos clorídrico e nítrico também são utilizados como reativos macrográficos para ligas de alumínio (ASTM, 1999).

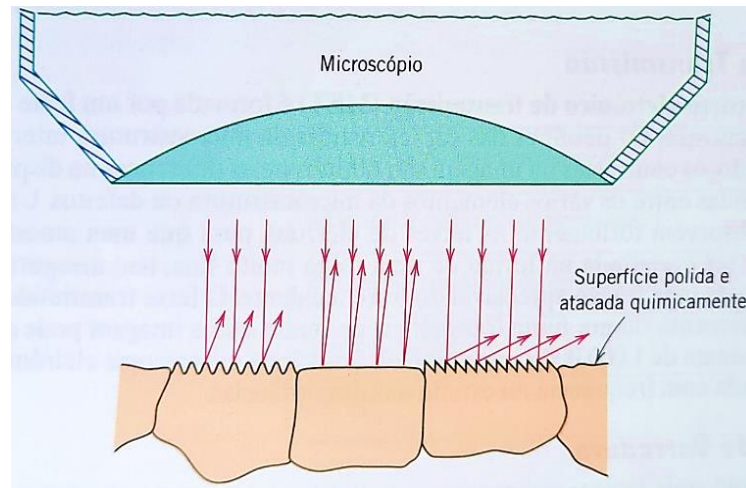
### 3.5 Microscopia

Após todas as etapas de preparação metalográfica do corpo de prova, finaliza-se a análise com a microscopia. Equipamentos ópticos de macro ou microscopia demandam investimentos e são essenciais para a precisão das análises, por serem altamente especializados, tornando a visualização da estrutura muito mais nítida (ROHDE, 2010).

Devido ao campo focal do microscópio ser relativamente baixo, a superfície do corpo de prova deve estar perfeitamente plana e com um polimento de qualidade, com acabamento liso e espelhado. Quando a superfície não possui um bom acabamento superficial (Figura 14),

não há reflexão da luz, desta forma o microscópio não consegue detectar as características estruturais ocasionando na falta de revelação de detalhes importantes da microestrutura (CALLISTER, 2016).

Figura 12 – Influência do acabamento da superfície da amostra.



Fonte: Callister (2016)

A medida dos grãos contribui para verificação de propriedades mecânicas, sendo uma das principais medidas da metalografia quantitativa, muito utilizada na análise estrutural de aços. Normalmente, utiliza-se a medição de número de grãos, realizando a contagem desses por unidade de área em uma seção (COLPAERT, 2008).

Na microscopia do alumínio, avalia-se a presença de falhas no produto que possam comprometer sua qualidade, como inclusões, corrosões e defeitos superficiais, como incrustações, fragilidade e fratura por fadiga (SARTORI, 2021).

### 3.6 Microscópio Eletrônico de Varredura

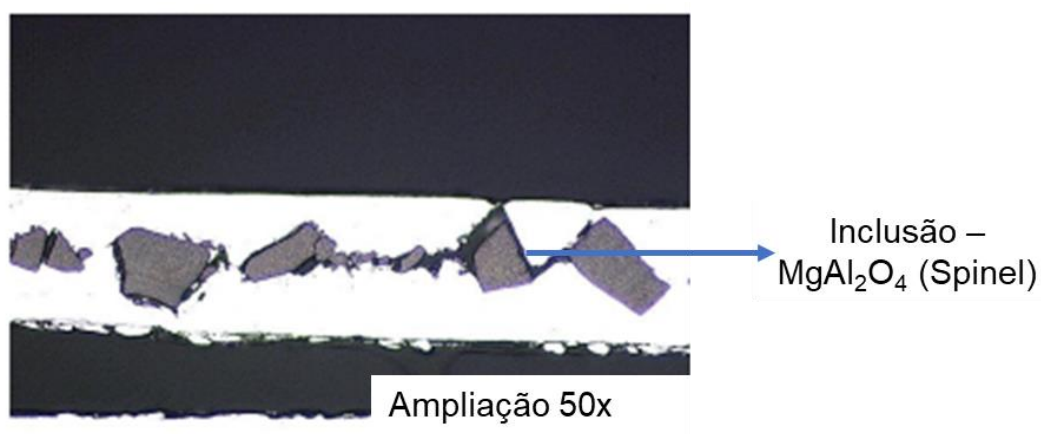
O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é muito utilizado em análises de ligas para caracterização da amostra, identificação da morfologia e contorno de grãos. Esse microscópio produz imagens utilizando um feixe de elétrons (incidência de elétrons retro espalhados, *Back Scattered Electrons – BSE*, e elétrons secundários *Secondary Electrons – SE*), o qual varre a superfície de uma amostra, fixando-a em um compartimento chamado *stubs*, e realizando uma preparação semelhante ao polimento de amostras para microscopia óptica: lixamento, polimento com alumina e se necessário ataque químico (FOGAZZI, 2013). Uma imagem é produzida pelos feixes de elétrons que são refletidos, sendo possível um exame sob grandes ampliações obtendo características da superfície e/ou da microestrutura.

São possíveis ampliações de 10 a 50.000 vezes e alcance de profundidade de campo muito grande, além da possibilidade de adaptação de acessórios que permitem análises qualitativas e semiquantitativas da composição química elementar em áreas selecionadas da superfície (CALLISTER, 2016).

### 3.7 Defeitos estruturais visualizados na microscopia

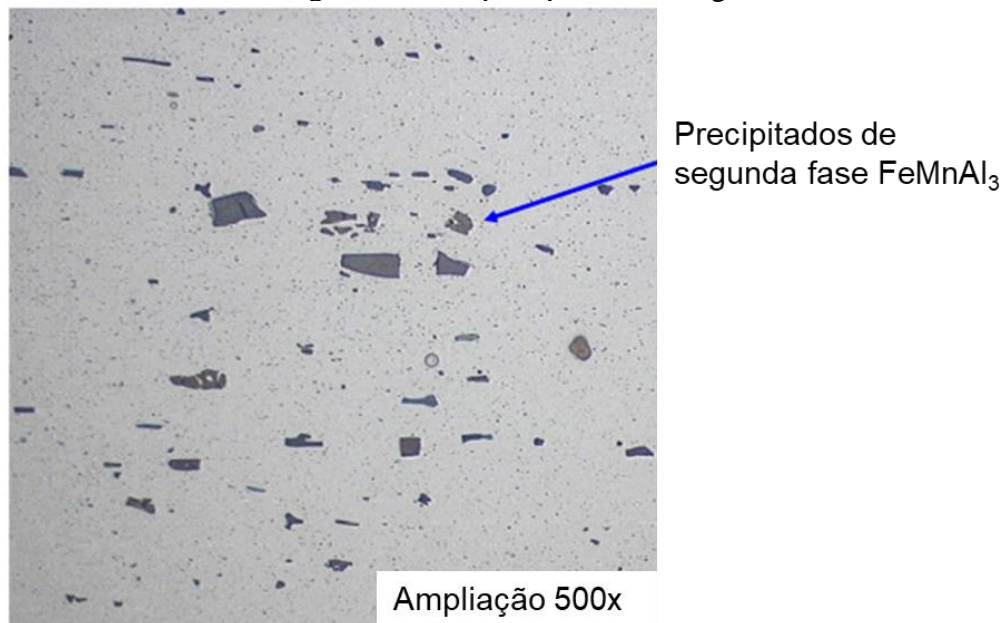
Após realizar a preparação da amostra para testes metalográficos, parte-se para a avaliação utilizando equipamentos de microscopia, com o objetivo de obter informações detalhadas a nível macro ou microscópico da estrutura do material. Nestes testes, são avaliados defeitos da chapa de alumínio, tamanho de grãos, presença de inclusões, conforme exemplificado na Figura 14, e presença de precipitados, conforme exposto nas Figuras 15 e 16. Com a avaliação da imagem, é possível realizar a aprovação ou reprovação daquele lote, garantindo a qualidade do metal produzido (SARTORI, 2021).

Figura 13 – Presença de inclusão micrografia da liga 3104



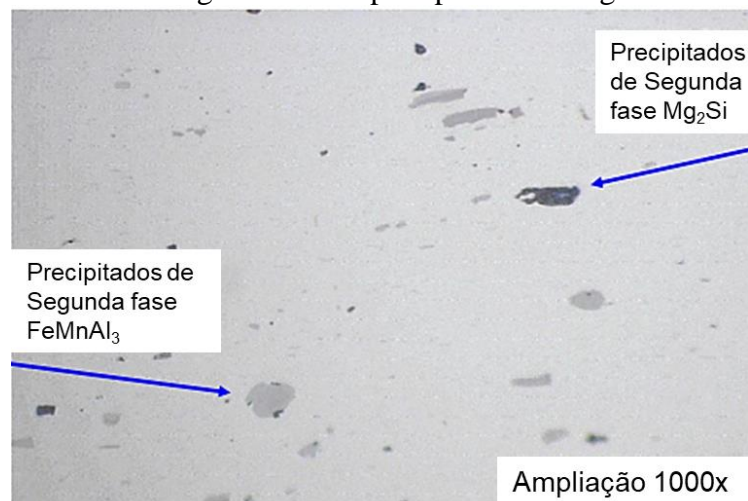
Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

Figura 14 – Microestrutura da liga 3104 com precipitados de segunda fase



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

Figura 15 - Microestrutura da liga 5182 com precipitados de segunda fase



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

### 3.8 Aprovação do metal para produção da lata de alumínio

As diversas etapas presentes no controle de qualidade da lata de alumínio, desde a fase da reciclagem, análise química e metalografia, asseguram ao final do processo maior confiabilidade na liberação do produto para o consumidor. Desse modo, a liga produzida proveniente da fusão das latas de alumínio será transferida para moldes de placas, e após solidificação, encaminha-se essas placas para outras unidades fabris. Posteriormente, as placas

passam pelos processos de transformação em chapas, resultando em laminados de alumínio de espessura finíssima, enroladas em bobinas, para posteriormente se transformarem em novas latas (SARTORI, 2021; ZUMBA, 2016).

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Percorrendo as principais etapas do processo de recuperação das latas de alumínio, é possível notar a importância desse tema no que tange a sustentabilidade e a possibilidade infinita de reciclagem do alumínio. Comparando os processos produtivos do alumínio primário com o secundário, diversas etapas são reduzidas quando se utiliza metal reciclado, denotando viabilidade econômica e sustentável para utilização de metal secundário, entre esses, a lata de alumínio.

Nesse caso, a importância do controle da análise química e metalográfica do metal aumenta de maneira significativa, uma vez que se faz necessário o monitoramento periódico em relação a composição química do metal de retorno, evitando contaminação provenientes de peças de outros metais (ferro, aço, zinco) e a inspeção da estrutura metálica, para avaliação de defeitos como precipitados e inclusões, por intermédio das técnicas de metalografia.

A apostila elaborada (Apêndice A) reúne as melhores práticas na realização de análises químicas e introdução a técnicas de preparação metalográfica, colaborando para o desenvolvimento do conhecimento profissional e ingresso a temática de laboratórios metalúrgicos no que se refere a reciclagem das latas de alumínio no ensino superior. As caracterizações do material, tanto químicas como metalográficas são enriquecedoras para o conhecimento do processo atual de controles para a qualidade da alta produção de latas de alumínio para bebidas.



## 5. REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Reciclagem: História do alumínio. Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>>. Acesso em março 2021.

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Estatísticas Nacionais: Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio. Disponível em: <<https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>>. Acesso em julho 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14939**: Alumínio e suas ligas: coleta e preparação de amostras para análise química por espectrometria de emissão óptica. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISSO 209**: Alumínio e suas ligas: Composição Química. Rio de Janeiro, ABNT, 2010. 4 p.

AROTEC INDÚSTRIA E COMÉRCIO- Cortadora Metalográfica COR80. Cotia, SP. Disponível em: <<http://www.arotec.com.br/2-uncategorised/29-art-cor80>>. Acesso em: 30 jan. 2022.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E3-95**: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA, 1993.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-716**: Standard Practices for Sampling and Sample Preparation of Aluminum and Aluminum Alloys for Determination of Chemical Composition by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-1251**: Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-407**: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA, 1999. 23 p.

ASHKENAZI, Dana. How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 143, p. 101-113, 2019.

ABRALATAS – Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio. Brasil reciclou mais de 97% das latas de alumínio para bebidas. Disponível em: <<https://www.abralatas.org.br/brasil-reciclou-mais-de-97-das-latas-de-aluminio-para-bebidas/>>. Acesso em março 2021.

BOFF, L. Sustentabilidade, o que é o que não é. Editora Vozes. Petrópolis, Rio de Janeiro, 2016.

BRAY, J. W. In: ASM Metals Handbook, v. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys. USA, ASM International (American Society for Metals), p. 44, 45, 138 1997.

CALDERONI, S. Os bilhões perdidos no lixo. 4. Ed. São Paulo: Humanitas / FFLCHUSP. P. 34. 2003.

CALLISTER Jr, W.D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARDOSO, J.G.R. *et al.* A indústria do alumínio: estrutura e tendências. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 43-88, 2011. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2499>>. Acesso em abril 2021.

CAYLESS, B. In: ASM Metals Handbook, v. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys. USA, ASM International (American Society for Metals), p. 39-42, 1997.

CBA – Companhia Brasileira de Alumínio. Nossa trajetória. Disponível em: <<https://cba.com.br/cba/nossa-trajetoria/>>. Acesso em março 2021.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. Editora Edgard Blucher: São Paulo, 2008, 676 p.

DAVIS, J.R. Light Metals and Alloys. In: ASM SPECIALTY HANDBOOK. Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio, ASM International, p. 351-416, 2001.

ELMORE, Bartow J. A indústria americana de bebidas e o desenvolvimento de programas de reciclagem de Curbside, 1950-2000. Business History Review, v. 86, n. 3, pág. 477-501, 2012.

FARNSWORTH, P.B. In: ASM Metals Handbook, v. 10, Materials Characterization. USA, ASM International (American Society for Metals), 1997.

FERREIRA, A. B. H. (1999). Minidicionário Eletrônico Aurélio Século XXI. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira e Lexikon Informática, 1999.

FOGAZZI, W. *et al.* Análise microestrutural da liga AA3104 H19. 2013. Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

GERDAU AÇOS. Início da Fabricação do Aço. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/inicio-da-fabricacao-do-aco>>. Acesso em março 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2021. Disponível em: <<http://www.world.aluminium.org>>. Acesso em dezembro 2021.

LCA CONSULTORES. Análise da viabilidade técnica e econômica da Logística Reversa de Latas de alumínio para bebidas Avaliação econômica das propostas de Contrapartidas para eventual Termo de Compromisso, 2020. Disponível em: <[https://alimentusconsultoria.com.br/wp-content/uploads/2020/08/Anexo-3\\_EstudoViabTecEcon\\_TC-Latas-Aluminio.pdf](https://alimentusconsultoria.com.br/wp-content/uploads/2020/08/Anexo-3_EstudoViabTecEcon_TC-Latas-Aluminio.pdf)>. Acesso em fevereiro 2022.

LØVIK, A.N.; MÜLLER, D.B. A material flow model for impurity accumulation in beverage can recycling systems. In: Light Metals. Springer, Cham, p. 907-911, 2014.

MARTINS. Espectrômetro de Emissão Ótica. Belo Horizonte: DAC Instrumentos Científicos, 2006.

MURTA, M. C. J. Análise de inclusões não metálicas em aço por espectrometria de emissão óptica associada ao sistema Spark-DAT. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2013.

NIERO, M.; OLSEN, S.I. Economia circular: estar ou não em um ciclo fechado de produtos? Uma avaliação do ciclo de vida de latas de alumínio com inclusão de elementos de liga. Recursos, Conservação e Reciclagem, v. 114, p. 18-31, 2016.

OOSUMI, K. Influência da tinta na reciclagem de latas de bebidas de alumínio usadas. Ecomaterials. Elsevier, p. 197-200, 1994.

PEREIRA, T.N.D. *et al.* A reciclagem de alumínio no Brasil e o mercado Internacional: uma análise quantitativa. Revista Planejamento e Políticas Públicas (PPP), Brasília, n. 47, p. 289-303, 2016. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/582>. Acesso em março 2021.

PINTO, C. G. Estudo sobre o efeito do tratamento de recuperação nas propriedades mecânicas da liga AA 5182 utilizada na fabricação de tampas de latas de bebidas. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ROHDE, R.A. Metalografia Preparação de Amostras: uma abordagem prática. Laboratório de Ensaio Mecânicos e Materiais – LEMM. Universidade Regional Integrada do Alto e das Missões. 2010, 30 p. Disponível em:

<[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod\\_resource/content/1/APOSTILA\\_METALOGRAFIA.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf)>. Acesso em maio 2021.

ROOY, E.L. In: ASM Metals Handbook, v. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys. USA, ASM International (American Society for Metals), p.17, 1997.

SARTORI, A. Metalografia de ligas de Alumínio: Curso ABAL. São Paulo, SP. set. 2020. Apresentação de Power Point. 48 slides. color. Acesso em maio 2021.

SARTORI, A. Macrografia e Micrografia: Notas de aula Fatec Metalurgia. Pindamonhangaba, SP. mai. 2021. Apresentação de Power Point. 29 slides. color. Acesso em maio 2021.

SLICKERS, K. Automatic Atomic Emission Spectroscopy. Editora Brühlshe Universitätsdruckerei, Griessen, 1993.

SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS. Spectrosul Americana. Schematics Spectrolab. Alemanha. Disponível em: <https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/arc-spark-stationary-oes-working-principle>. Acesso em 22 janeiro 2022.

SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS GMBH. SPECTROLAB S - A True Revolution in High-End Metal Analysis. Disponível em: <<https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/spectrolab-s-metal-analysis>>. Acesso em março 2021.

SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS GMBH. Aluminum Recycling: Adding Value by Analysis. Disponível em: <<https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/spectrolab-s-metal-analysis>>. Acesso em abril 2021.

TECLAGO, TECNOLOGIA EM MÁQUINAS METALOGRÁFICAS. Molde de Silicone para embutimento a frio. Disponível em: <<https://www.teclago.com.br/produtos/consumiveis-para-embutimento/molde-de-silicone-de-30mm-para-embutimento/>>. Acesso em fevereiro 2022.

The Aluminum Association. Aluminum Alloys 101. Disponível em: <<https://www.aluminum.org/aluminum-advantage/infographic-gallery/aluminum-alloys-101>>. Acesso em abril 2021.

The Aluminum Association. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys. Disponível em: <<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Teal%20Sheets.pdf>>. Acesso em abril 2021.

THERMO FISCHER SCIENTIFIC. Analysis of Aluminum and its Alloys by Optical Emission. ARL 3460 Metals Analyzer: Application Note: 41201, Ecublens, Suíça, 2007, 4p.

VERRAN, G.O.; KURZAWA, U.; PESCADOR, W.A. Reciclagem de Latas de Alumínio Visando Melhor Rendimento e Qualidade Metalúrgica no Alumínio Obtido. Revista Matéria, Santa Catarina, v. 10, n. 1, pp. 72 – 79, 2005. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10635>>. Acesso em abril 2021.

VERRAN, G.O; KURZAWA, U. Um estudo experimental da reciclagem de latas de alumínio usando fusão em forno de indução. Recursos, Conservação e Reciclagem, v. 52, n. 5, p. 731-736, 2008.

VIJAYAKUMAR, M.D. *et al.* Experimental study of chemical composition of aluminium . Materials Today: Proceedings, v. 37, p. 1790-1793, 2021.

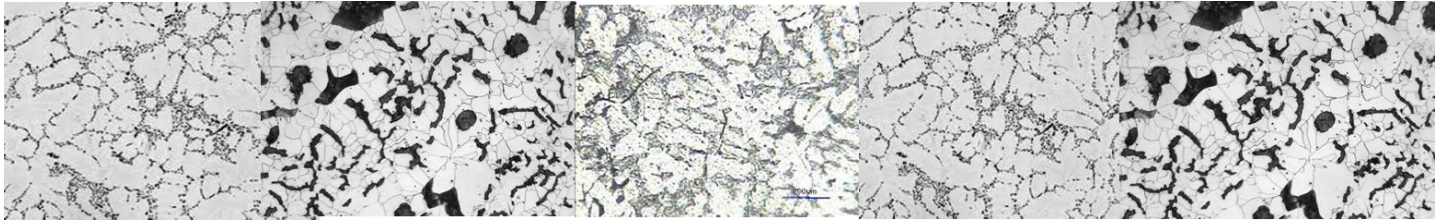
WANG, M. *et al.* Estudo sobre a remoção do revestimento de latas de bebidas usadas com ácido sulfúrico espesso para reciclagem. Conversão e gestão de energia, v. 48, n. 3, p. 819-825, 2007.

ZHOU, B. *et al.* Evolução da microestrutura da liga de alumínio 7075 reciclado e suas propriedades mecânicas e de corrosão. Journal of Alloys and Compounds, p. 160407, 2021.

ZUMBA, A. A. F. Estudo de redução do tempo de ciclo de homogeneização da liga AA5182. 74 p. 2016. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

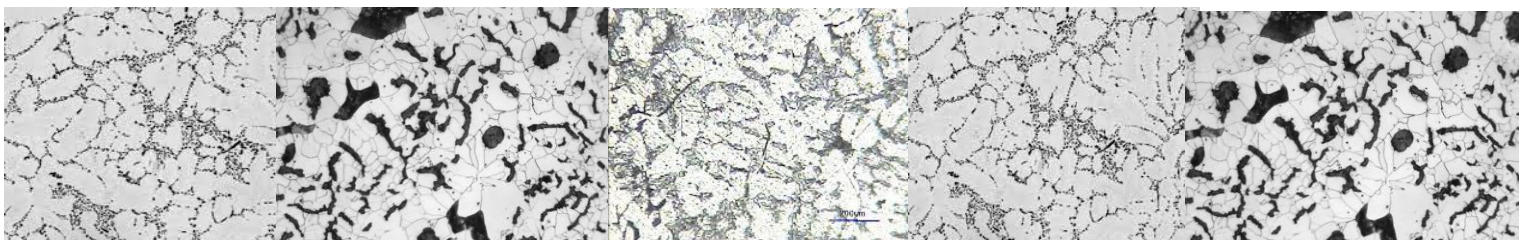
## **APÊNDICE A: APOSTILA ELABORADA**

### **METODOLOGIA DE ANÁLISE QUÍMICA E TÉCNICAS DE METALOGRAFIA NA RECICLAGEM DA LATA DE ALUMÍNIO**



# **APOSTILA DE METODOLOGIA DE ANÁLISE QUÍMICA E TÉCNICAS DE METALOGRAFIA NA RECICLAGEM DA LATA DE ALUMÍNIO**

Apostila elaborada como parte integrante do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física, Química e Matemática (DFQM) da UFSCar, campus Sorocaba.



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LATA DE ALUMÍNIO .....</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DOS CORPOS DE PROVA.....</b>	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>ESPECTRÔMETRO DE EMISSÃO ÓPTICA .....</b>	<b>6</b>
<b>5.</b>	<b>EQUIPAMENTOS PARA METALOGRAFIA .....</b>	<b>9</b>
<b>6.</b>	<b>PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
6.1.	Corte do corpo de prova.....	10
6.2.	Embutimento do corpo de prova.....	12
6.3.	Lixamento .....	14
6.4.	Polimento .....	15
6.5.	Ataque Químico .....	16
<b>7.</b>	<b>MICROSCOPIA.....</b>	<b>16</b>
7.1.	Imagens estruturais obtidas por microscopia.....	18
7.2.	Tipos de inclusões encontradas na microscopia .....	20
<b>8.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>23</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>24</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A reciclagem das latas de alumínio contribui para o setor econômico de modo significativo e o processo de retorno do metal para a reciclagem com conversão em novas latas é de apenas alguns meses. Por esse motivo, as indústrias investem em controles para o acompanhamento da qualidade do metal produzido, com o objetivo de manter as propriedades do alumínio tão estimadas.

O TCC “**Metodologia de análise química e técnicas de metalografia na reciclagem da lata de alumínio**” abordará de modo mais aprofundado a revisão sistemática sobre a reciclagem do alumínio, e a apostila elaborada as melhores práticas na realização de análises químicas e introdução a técnicas de preparação metalográfica, colaborando para o desenvolvimento do conhecimento profissional e ingresso a temática sobre laboratórios metalúrgicos de reciclagem das latas de alumínio voltados para o ensino superior. As caracterizações do material, tanto químicas como metalográficas são enriquecedoras para o conhecimento do processo atual de controle para a qualidade da alta produção de latas de alumínio para bebidas.



Bons Estudos!



## 2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LATA DE ALUMÍNIO

A composição das ligas de alumínio que constituem a lata são padronizadas e controladas pela norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas, a NBR ISO 209, a qual define o sistema de classificação e especifica as designações que indicam a composição química do alumínio e suas ligas (ABNT, 2010). Na Tabela 1 são apresentadas as composições químicas das ligas utilizadas na fabricação da lata de alumínio.

Tabela 1 - Composições químicas em porcentagem (m/m) das ligas utilizadas na fabricação da lata de alumínio.

Liga	% (m/m)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Outros (cada)	Outros (total)	Al
Al 3004 (Corpo)	Máximo	0,3	0,7	0,25	1,5	1,3	0,25	-	-	0,05	0,15	Restante
	Mínimo	-	-	-	1,0	0,8	-	-	-	-	-	
Al 5182 (Tampa)	Máximo	0,2	0,35	0,15	0,5	5,0	0,25	0,1	0,1	0,05	0,15	Restante
	Mínimo	-	-	-	0,2	4,0	-	-	-	-	-	

Fonte: ABNT NBR ISO 209 (2010)

## 3. PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DOS CORPOS DE PROVA

Antes da realização da análise química via Espectrômetro de Emissão Óptica, é necessário a confecção de um corpo de prova, e a preparação de sua superfície. Com o metal ainda em estado líquido, recolhe-se uma porção desse metal no molde para que se tenha o formato padrão de amostra para realização da análise no espectrômetro.

A norma ASTM E716 recomenda moldes para confecção da amostra, confeccionados de ferro maciço ou aço, conforme exemplificado na Figura 1 (ASTM, 2016). Orientações sobre o formato padronizado da amostra para testes em espectrômetros estão disponíveis na norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas “ABNT NBR 14939 Alumínio e suas ligas: coleta e preparação de amostras para análise química por espectrometria de emissão óptica”, publicada em janeiro de 2021.

Figura 1 – Molde e amostra com formato padronizado pela Norma ASTM para análise em Espectrômetro de Emissão óptica (OEE)

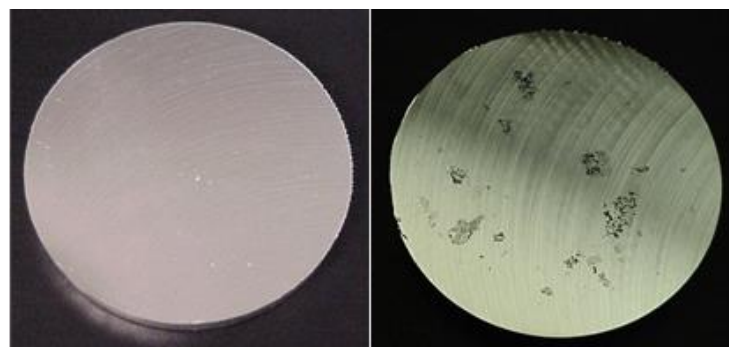


Fonte: Acervo da autora (2022)

- a) Após solidificação do metal, retira-se o corpo de prova do molde e realiza-se sua preparação;
- b) No caso do alumínio e suas ligas, realiza-se uma usinagem na superfície do corpo de prova, com o auxílio de tornos ou fresas, deixando a superfície limpa, plana e sem nenhum tipo de marca aparente (ASTM, 2016).
- c) Deve-se inspecionar a superfície usinada, não podendo apresentar inclusões (escória), sujeiras, arranhões e impressões digitais, pois poderá prejudicar a precisão do resultado da análise.

O padrão de qualidade do corpo de prova para análise é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Comparação de superfície ideal para ensaio por Espectrometria de Emissão Óptica



**Superfície ideal**

**Superfície com inclusões**

Fonte: Acervo da autora (2022)

#### 4. ESPECTRÔMETRO DE EMISSÃO ÓPTICA

Bastante utilizado no setor metalúrgico, o Espectrômetro de Emissão Óptica (EEO) é um equipamento robusto, que em poucos minutos consegue identificar a composição química de metais previamente selecionados em uma amostra sólida. O EEO é utilizado em vários segmentos das indústrias metalúrgicas fabricantes de alumínio, zinco, cobre, aço, entre outros metais. Essa técnica baseia-se em aplicar uma fonte externa de energia em uma amostra sólida, onde será medida a radiação emitida pelos átomos dos elementos presentes nessa amostra e em seguida quantificada (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2007).

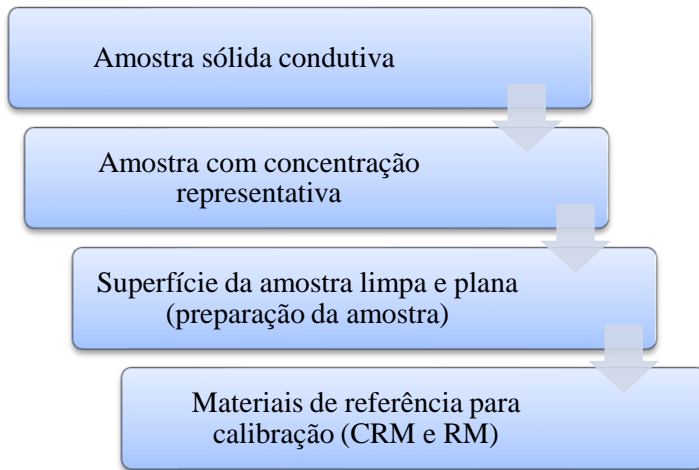
Figura 3 – Modelo de Espectrômetro de Emissão Óptica modelo SPECTROLAB 9006/1997



Fonte: Acervo da autora (2022)

A seguir, um resumo de alguns pré-requisitos para a análise em espectrômetro é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Pré-requisitos para análises em EEO

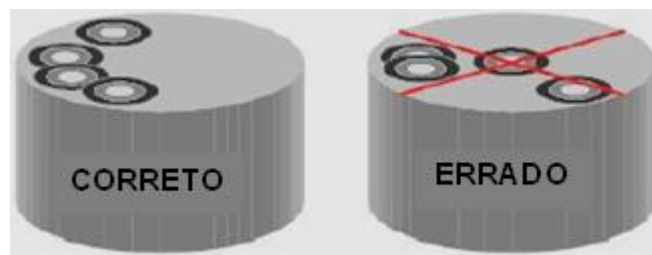


Fonte: Adaptado de Martins (2006)

Para realização da análise do corpo de prova, posiciona-se a amostra de modo que a “queima” seja realizada nas suas laterais, onde a composição química é mais homogênea.

- a) Manter o suporte do espectrômetro fixo sobre o corpo de prova, e evitar realizar a análise no centro do corpo de prova. Direcionar a ponta do eletrodo nas laterais da amostra.
- b) Realizar as queimas na área disponível (evitar sobrepor queimas), quantas forem necessárias, sempre nas laterais da face superior do corpo de prova.

Figura 5 – Posicionamento correto das “queimas” na amostra.



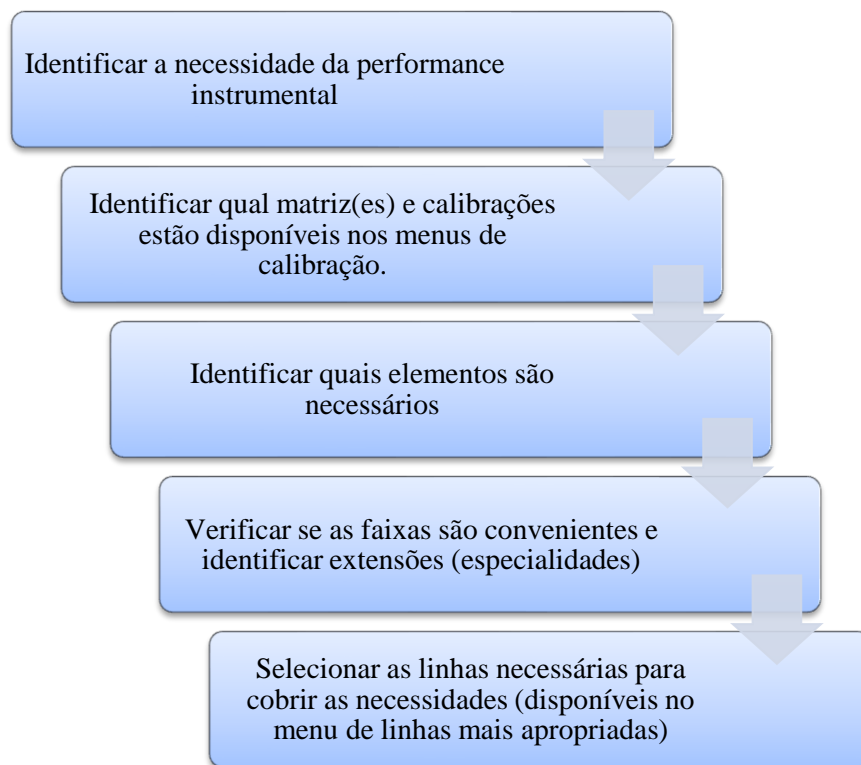
Fonte: Adaptado de Martins (2006)

Para maior confiabilidade dos resultados obtidos, utiliza-se um material de referência para calibração, chamados de padrões, os quais possuem o formato regular e homogeneidade com relação a sua composição química e física. (MARTINS, 2006).

**Características importantes:**

As principais recomendações para utilização do Espectrômetro de Emissão Óptica:

Figura 6 - Recomendações para utilização do EEO



Fonte: Adaptado de Martins (2006)

- Atenção ao argônio utilizado, este deve ser de procedência conhecida, e possuir alto grau de pureza. Não utilizar mistura de gases contendo argônio.
- Atenção as conexões fixas de tubulações, recomenda-se a instalação de tubos de cobre.

## 5. EQUIPAMENTOS PARA METALOGRAFIA

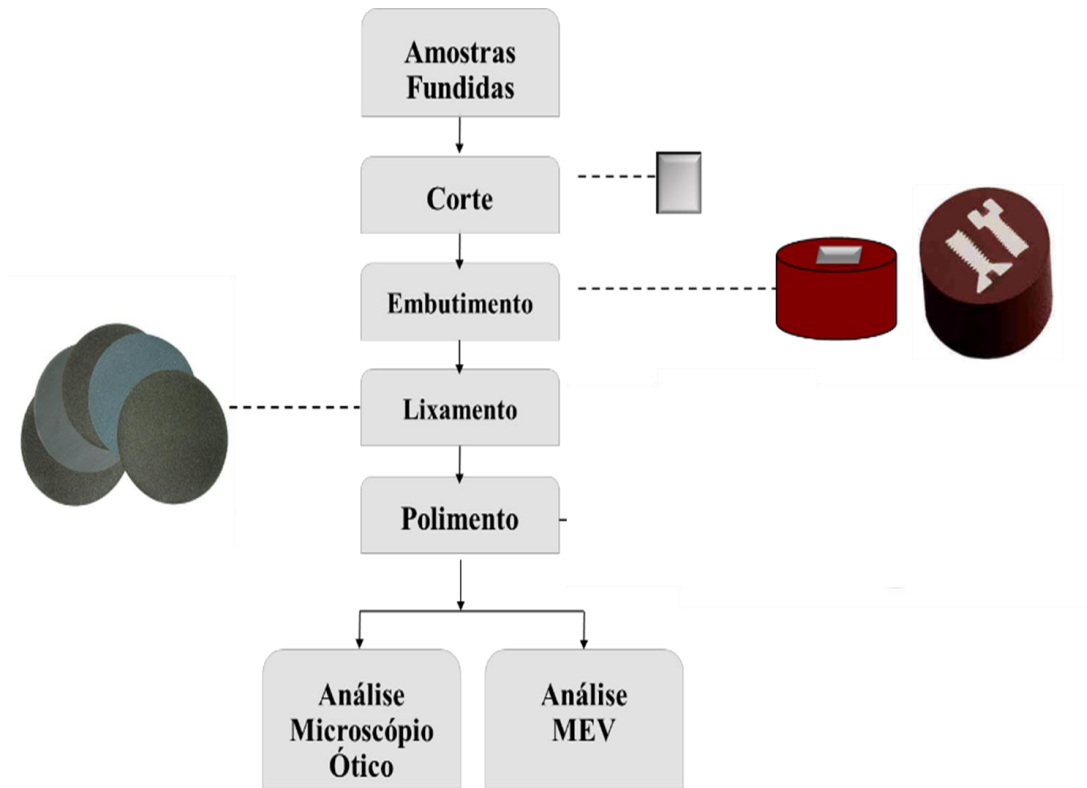
A aplicação da metalografia é utilizada para identificação e caracterização da estrutura do material, tipos de fases, tamanhos e contornos de grãos; divide-se em técnicas macroscópicas e microscópicas, podendo ser qualitativa, com observação da microestrutura, identificação de inclusões, contornos de grãos e microconstituintes, ou quantitativa, com a determinação desses constituintes, o tamanho dos grãos e contagem de número de inclusões. A metalografia está relacionada a influência a certas propriedades de metais e ligas, e é utilizada para atender controles normativos ou requisitos microestruturais específicos (NORMA E3-95, 1993). A técnica metalográfica requer cuidados, uma vez que é necessário a criteriosa seleção da área a ser analisada até a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios (COLPAERT, 2008).

Para realização da metalografia, são necessários equipamentos para preparação das amostras antes de serem analisadas. Os principais são:

- Cortadeira Metalográfica ou Serra Fita Horizontal
- Embutidora
- Lixadeira automática ou manual
- Microscópios óptico

## 6. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA

Figura 7 - Esquema de demonstração de preparação metalográfica



Fonte: Adaptado de ABAL (2020)

- Inicialmente realiza-se cortes, sem grande rigor e quantos necessários na amostra ou corpo de prova, garantindo uma boa região para análise e um tamanho que se adeque ao microscópio.
- Na etapa do embutimento, a amostra é colocada em um molde, o qual é preenchido com resina sintética para que a área a ser analisada fique sem arestas cortantes que possam machucar o analista ou danificar as lixas e panos de polimento.
- Com a amostra embutida nesse molde, procede-se à etapa de lixamento, utilizando lixas d'água de granulometrias cada vez mais finas, que irão retirar as marcas mais profundas do corte.
- Por fim realiza-se o polimento, utilizando panos especiais e próprios para o acabamento da peça, retirando todo e qualquer risco que possa atrapalhar na visualização da microestrutura e defeitos da liga.

### 6.1. Corte do corpo de prova

Para realização do corte do corpo de prova, utiliza-se serras-fita manuais ou equipamentos específicos para metalografia, como as cortadeiras metalográficas, policortes ou

“Cutt-Off”. Essas máquinas podem ser de bancada ou suspensas. O corte se dá a partir de discos de cortes de materiais abrasivos e refrigeração contínua com água ou outros reagentes, evitando assim deformações devido ao aquecimento, não danificando a superfície do corpo de prova a ser cortado (ROHDE, 2010). Essa é uma das maiores preocupações, já que a superfície a ser analisada precisa estar sem alterações significativas, como danos profundos de difícil remoção durante a etapa de polimento (ASTM, 1993)

Figura 8 - Modelo de Cortadeira Metalográfica COR300



Fonte: Acervo da autora (2021)

Procedimentos básicos para operação de corte das amostras, utilizando uma cortadeira metalográfica:

- a) Colocar a amostra no centro da mesa de fixação. O centro da mesa também é o centro do disco.
- b) Fixar firmemente o corpo de prova com ambas às morsas.
- c) Após ter se certificado da correta fixação do corpo de prova, posicionar o protetor acrílico do disco;
- d) Verificar se o disco se encontra em sua posição de descanso, sem encostar nas amostras.
- e) Ligar o motor de acionamento do disco. Isto faz com que a bomba de fluido de corte também seja ligada (no caso de equipamentos automáticos).



- f) Verificar se a amostra está sendo resfriada pelo fluido de corte.
- g) Aplicar uma carga moderada do disco sobre o corpo de prova (evitando solavancos que possam romper o disco de corte), até que o corpo de prova esteja cortado.
- h) Retornar o disco a sua posição de descanso e desligar o motor;
- i) Soltar o corpo de prova da mesa de fixação.
- j) Efetuar a limpeza do equipamento.

### 6.2.Embutimento do corpo de prova

O embutimento da amostra é opcional, mas comumente aplicado, pois além de contribuir para a qualidade do lixamento, facilita no manuseio de peças pequenas, retira as arestas cortantes do corpo de prova e seleciona uma área de interesse que ficará em total evidência, envolta por um material adequado, como as resinas poliméricas. O embutimento pode ser a frio ou a quente e suas principais diferenças estão nos insumos utilizados (ROHDE, 2010)

Figura 9 - Modelo de prensa para embutimento a quente PRE40Mi



Fonte: Acervo da autora (2021)

A seguir, o procedimento comum para embutir as amostras com a baquelite utilizando uma prensa para embutimento a quente:

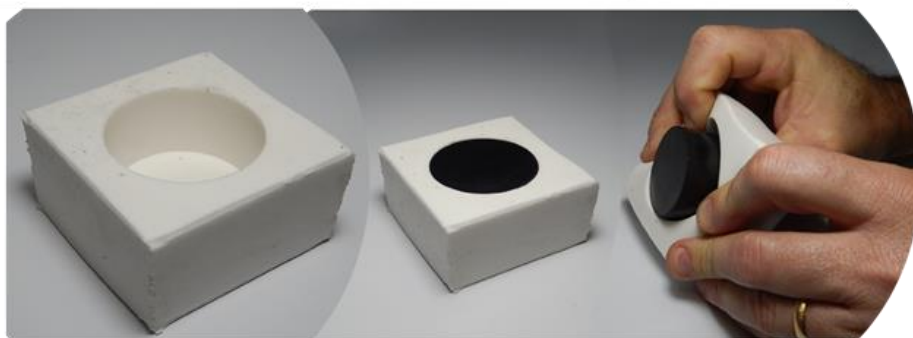
- a) Utilizar desmoldante no êmbolo inferior, para evitar que a baquelite fique presa ao êmbolo.
- b) Colocar a amostra com a face que se quer analisar para baixo (em contato com o êmbolo).

- c) Inserir cuidadosamente uma porção de baquelite em pó.
- d) Baixar o êmbolo lentamente, desse modo a amostra e o pó da baquelite não saem da posição.
- e) Manter a pressão durante o processo constante, conforme orientação do manual.
- f) Após término do aquecimento e resfriamento, abrir a válvula de pressão.
- g) Remover a tampa da prensa e fechar a válvula de pressão.
- h) Retirar o corpo de prova da prensa de embutimento com um papel, para evitar queimadura.

A técnica de embutimento a frio é utilizada para peças frágeis, com morfologia complexa e amostras de tamanhos maiores (SARTORI, 2020). Nesses casos utiliza-se moldes fabricados de silicone. Seguir conforme orientação:

- a) Inserir a amostra com a face para baixo, dentro da cavidade do molde;
- b) Preencher o molde com resinas sintéticas de polimerização rápida (normalmente resinas epóxi ) e um catalisador.
- c) Aguardar a reação exotérmica (temperaturas de até aproximadamente 120°C) e tempo de polimerização de 2 a 24h.
- d) Para dar coloração ao embutimento, opcional utilizar pigmentos.

Figura 10 - Molde de silicone para embutimento a frio



Fonte: Adaptado de Teclago, 2021.

No embutimento a frio não é necessário equipamento, porém requer um tempo maior para aguardar a polimerização da resina sintética. Para aplicações na universidade, é um método com preço e materiais mais acessíveis.

### 6.3. Lixamento

O lixamento do corpo de prova é uma etapa que necessita de tranquilidade e escolha de insumos adequados. Comumente aplica-se o uso de lixas d'água, folhas de material abrasivo, semelhante às lixas utilizadas na preparação de paredes para pinturas. A granulometria das lixas dá-se de forma numérica, e quanto mais baixa essa numeração, mais abrasivos serão seus grãos (mais grossa será a lixa). Os abrasivos mais utilizados são o Óxido de Alumínio, diamante e carbetto de boro (ROHDE, 2010).

Para a metalografia do alumínio e suas ligas, a sequência de granulometria normalmente usada são as lixas de 100, 220 e 320 grãos, para retirada de marcas profundas advindas do corte por cisalhamento e depois a aplicação de lixas de 400, 600, 800 e 1200 grãos, para acabamento da superfície. Cada lixa terá a função de retirar a marca da anterior, objetivando deixar a amostra o mais plana possível. (FOGAZZI, 2013) Importante ressaltar que esse processo e escolha das granulometrias de lixas podem variar conforme a disponibilidade no local e precisão exigida no processo.

Figura 11 - Modelo de Lixadeira Politriz AROPOL 2V

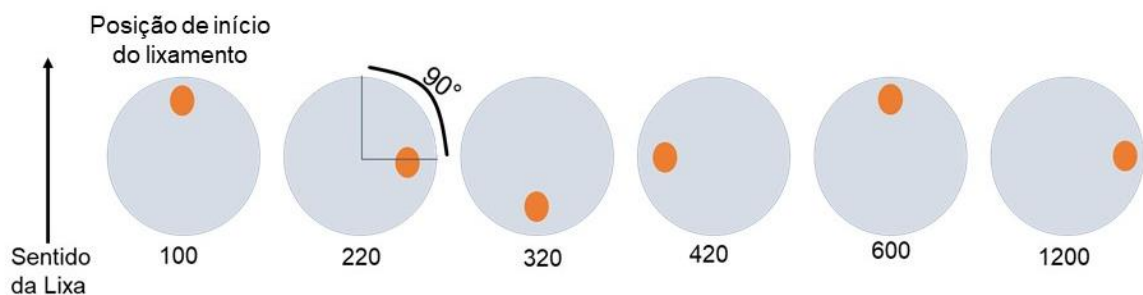


Fonte: Acervo da autora (2021).

- a) Escolha adequadamente o material de lixamento em relação à amostra e ao tipo de exame final.
- b) A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície;
- c) As lixas podem ser acopladas no disco da politriz com o auxílio de um anel de fixação para realização do lixamento.

- d) Elimine os riscos profundos que surgirem durante o lixamento;
- e) Metais diferentes não devem ser lixados com a utilização da mesma lixa.
- f) Posicione o corpo de prova em um ponto fixo e mantenha durante a utilização da lixa.
- g) Avançar em sequência crescente de granulometria das lixas (partir da mais fina para a mais grossa), conforme os riscos da amostras vão ficando mais suaves.
- h) Adicionar lentamente água sobre a lixa para lubrificar e limpar resíduos;

Figura 12 - Representação esquemática do método de lixamento com sentidos alternados



Fonte: Adaptado de ROHDE (2010)

#### 6.4. Polimento

Análogo ao processo de lixamento, o polimento é a etapa final do tratamento da amostra para análise micrográfica. A execução do polimento dá-se após a realização do lixamento, utilizando-se panos em formato circular que também podem ser acoplados no disco da politriz com o auxílio de um anel de fixação.

- a) Utilizar panos em formato circular que podem ser acoplados no disco da politriz com o auxílio de um anel de fixação.
- b) No método manual, segurar a amostra com as mãos, apoiando-a sobre o disco giratório em movimento.
- c) Umedecer com abrasivo o pano de polimento.
- d) Realizar a execução de movimentos elípticos, em volta do próprio eixo da amostra
- e) Realizar essa etapa rapidamente, com o objetivo de retirar os últimos riscos provenientes da lixa de malha mais fina
- f) A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de materiais provenientes das lixas d'água.

- g) No polimento automático, utiliza-se a politriz. Esse equipamento é capaz de acoplar várias amostras e realizar movimentos e pressão sobre o pano de polimento, em um tempo estipulado;

### **6.5. Ataque Químico**

O ataque químico é utilizado para permitir a identificação dos diferentes tipos de grãos e das fases presentes na microestrutura da amostra. Com a exposição da luz do microscópio sobre a superfície metálica, a reação do ataque químico irá modificar a estrutura, criando contrastes que irão diferenciar os detalhes microestruturais, deixando-os facilmente visualizáveis através do sistema óptico (ROHDE, 2010).

Reativos comumente usados:

- Solução de ácido nítrico a 1% em álcool etílico – Nital.
- Solução de ácido pícrico a 4% em álcool etílico – Picral.
- Solução de Picrato de sódio.

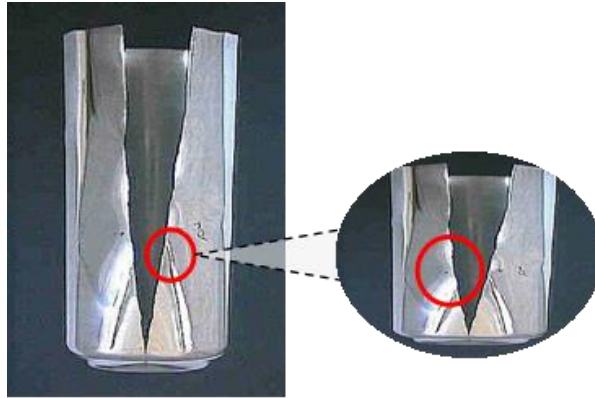
O reativo universal mais utilizado para ligas de alumínio é o ácido fluorídrico em concentrações baixíssimas, em torno de 0,5%. Reagentes como os ácidos clorídrico e nítrico também são utilizados como reativos macrográficos para ligas de alumínio (ASTM, 1999).

## **7. MICROSCOPIA**

Com base no produto acabado, é possível a interpretação de muitos defeitos de liga a partir da avaliação de sua estrutura, sendo necessário a preparação de amostras para análise metalográfica.

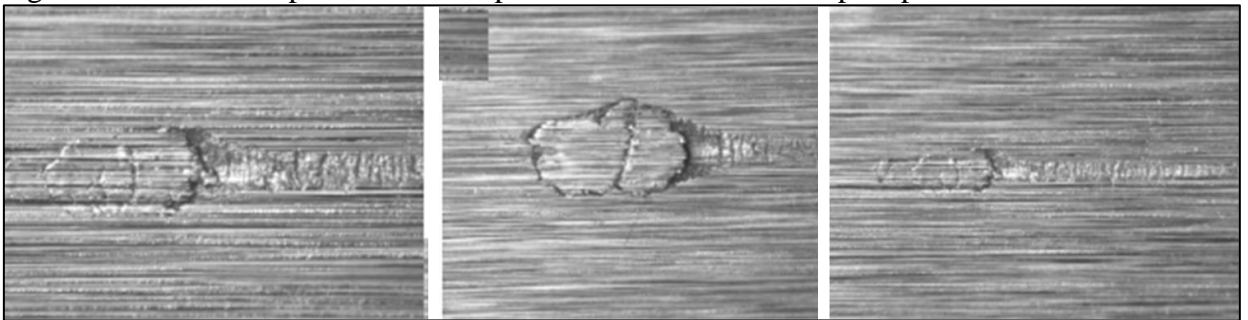
Na metalografia de ligas de alumínio, primeiramente aplica-se a avaliação visual para verificação de falhas de componentes mecânicos, defeitos superficiais ou corrosão. Essa etapa é muito importante, já que fornece resultados iniciais e ajuda na determinação das seções a serem analisadas (SARTORI, 2020).

Figura 13 - Análise visual de defeito na lata de alumínio



Fonte: Adaptado de Sartori (2020)

Figura 14 - Defeito Superficial em chapa de alumínio – Microscopia óptica



Fonte: Adaptado de Sartori (2020)

Após realizar a preparação da amostra para testes metalográficos, parte-se para a avaliação utilizando equipamentos de microscopia, com o objetivo de obter informações detalhadas a nível macro ou microscópico da estrutura do material. Nestes testes, são avaliados defeitos da chapa de alumínio, tamanho de grãos, presença de inclusões e precipitados. Com a avaliação da imagem, é possível realizar a aprovação ou reprovação daquele lote, garantindo a qualidade do metal produzido (SARTORI, 2021).

Devido ao campo focal do microscópio ser relativamente baixo, a superfície do corpo de prova deve estar perfeitamente plana e com um polimento de qualidade, com acabamento liso e espelhado. Quando a superfície não possui um bom acabamento superficial, não há reflexão da luz, desta forma o microscópio não consegue detectar as características estruturais, ocasionando na falta de revelação de detalhes importantes da microestrutura (CALLISTER, 2016).

Figura 15 – Modelos de Microscópio Estéreo [1] e Óptico [2]



Fonte: Adaptado de Sartori (2020)

### 7.1. Imagens estruturais obtidas por microscopia

A partir da preparação e tratamento das amostras para realização do exame microscópicos, é possível obter imagens que revelam características específicas das ligas, como suas microestruturas e presença de partículas indesejáveis presentes no metal, como as inclusões e precipitados.

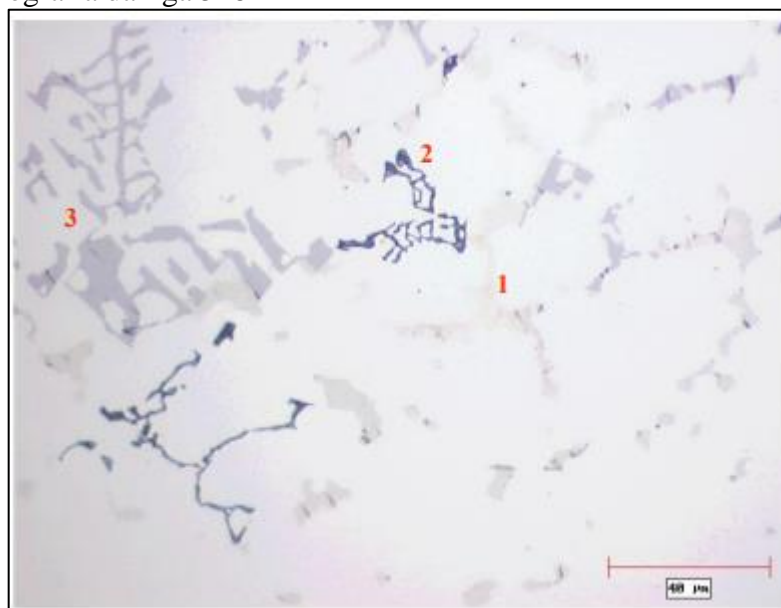
Figura 16 - Microestrutura da liga 3004



Fonte: Adaptado de Sartori (2020)

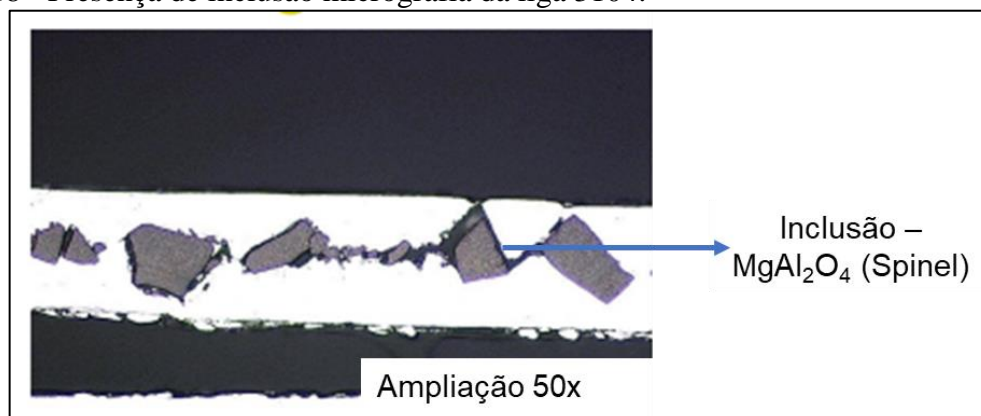


Figura 17 - Micrografia da liga 5182



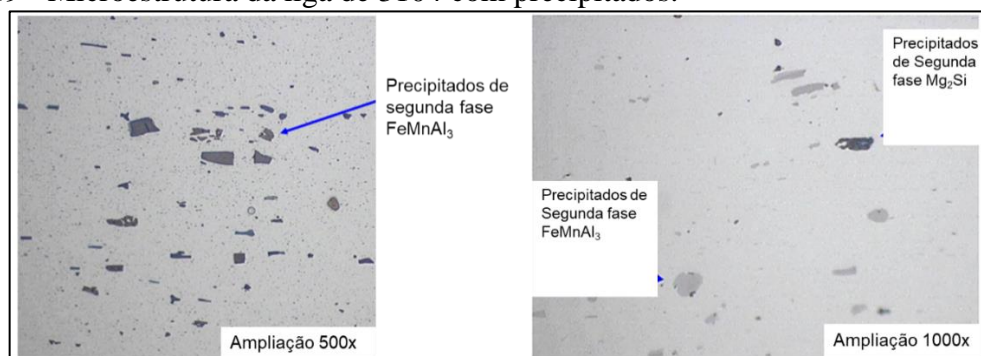
Fonte: Adaptado de Sartori (2020)

Figura 18 - Presença de inclusão micrografia da liga 3104.



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

Figura 19 - Microestrutura da liga de 3104 com precipitados.



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)



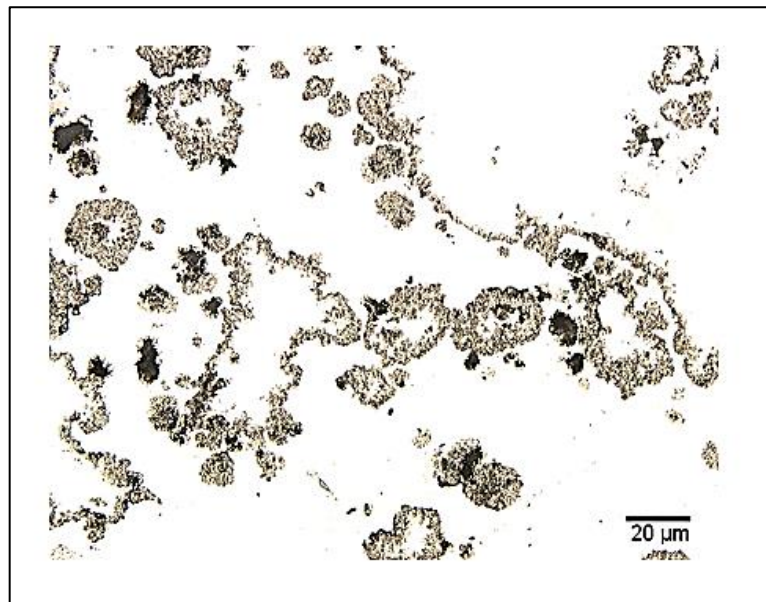
## 7.2. Tipos de inclusões encontradas na microscopia

No alumínio, as inclusões podem ser classificadas quanto a sua origem e composição química, sendo as principais as Exógenas e Endógenas. Diferente do aço, as inclusões são sempre indesejáveis.

- Exógenas (de origem externa, como erosões do refratário do forno/calha e excesso de escória)
- Endógenas (de origem interna, como transformação de óxidos, sulfetos e nitretos...)
- Metálicas (sob a forma de elementos puros)
- Não Metálicas (sob a forma combinada em óxidos, sulfetos, carbonetos...)

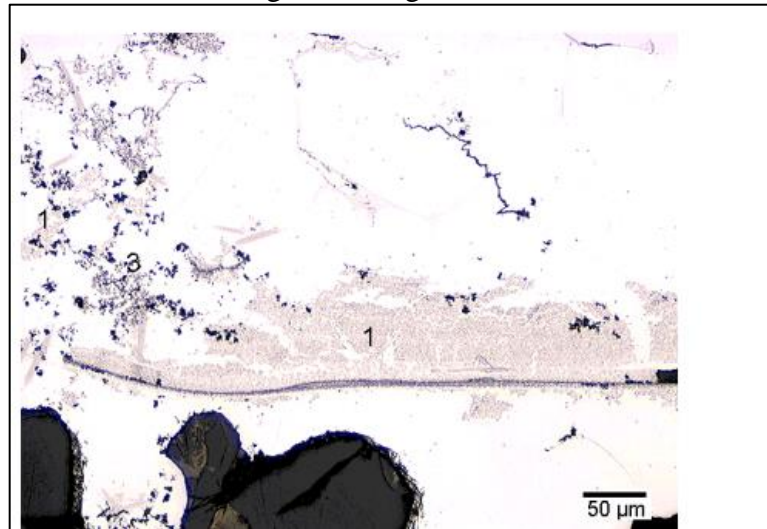
Em relação as inclusões **endógenas**, é possível classificar os óxidos em MgO e  $MgAl_2O_4$  (spinel), que se formam predominantemente em ligas com mais de 2% de magnésio. A forma mais comum é em aglomerados de finas partículas cor marrom claro e de forma irregular, podendo também aparecer na forma finos cristais equiaxiais escuros e de dureza elevada, comumente chamados de MgO cuboide.

Figura 20 - Inclusão de  $MgAl_2O_4$  'spinel' metalúrgico



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

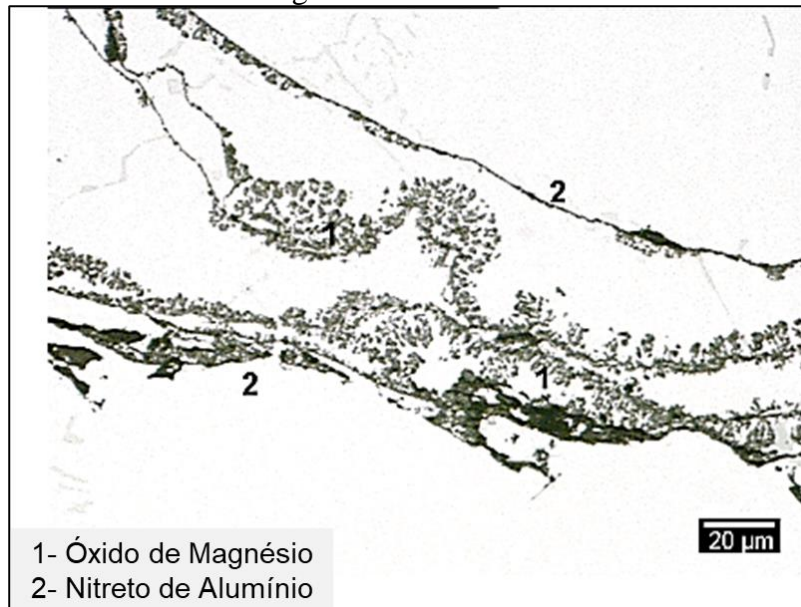
Figura 21 – Inclusão de Óxido de Magnésio - MgO



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

Outro tipo de inclusão são os Nitretos de alumínio (AlN). Normalmente são encontrados agrupados com óxidos de alumínio e são formados pela reação entre o ar e o metal líquido;

Figura 22 - Inclusões de Óxido de Magnésio e Nitreto de Alumínio

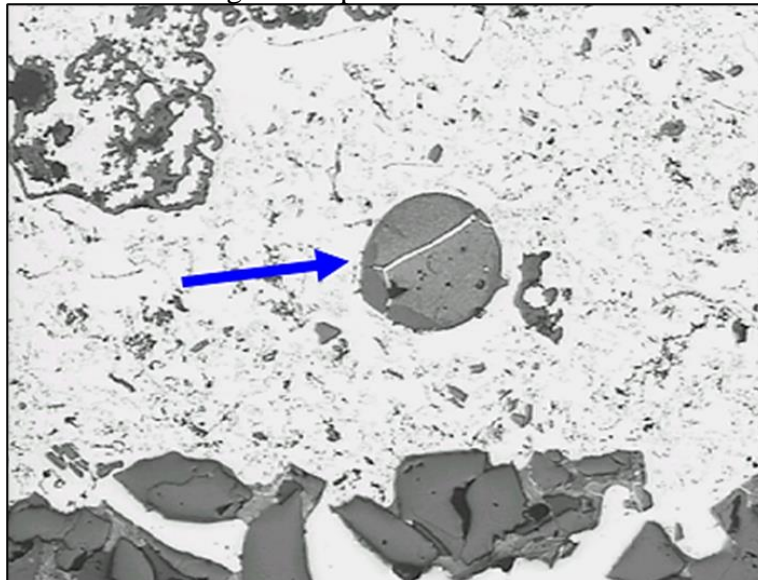


Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

Na classificação das inclusões do tipo **exógenas**, destacam-se as partículas do tipo Refratário  $3Al_2O_3$  e  $2SiO_2$ . Ambas apresentam riscos para o processo, e são acidentalmente introduzidas no metal por algum dano mecânico no refratário do forno ou calha durante o

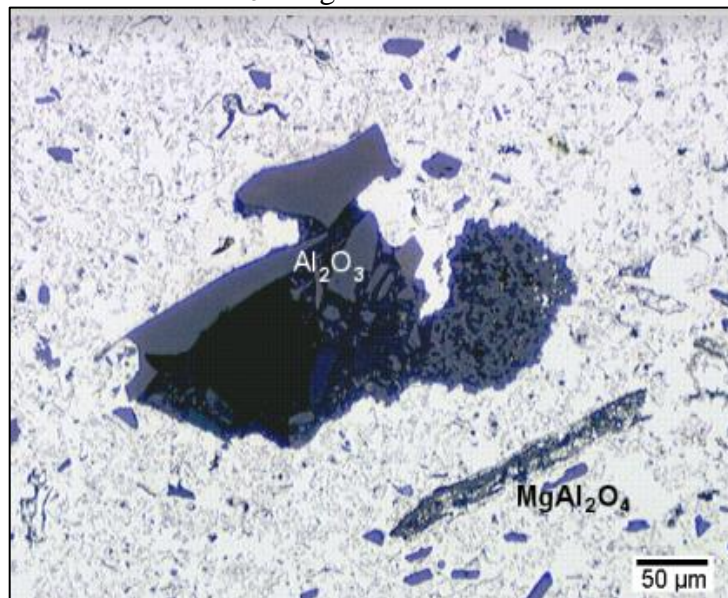
processo de fundição. Após a degradação em contato com o magnésio da liga, essas inclusões podem tomar a forma do spinel metalúrgico ( $MgAl_2O_4$ ), porém, com tamanho maior.

Figura 23 - Inclusões refratárias  $MgAl_2O_4$  spinel



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

Figura 24 - Inclusões refratárias  $Al_2O_3$  e  $MgAl_2O_4$



Fonte: Adaptado de Sartori (2021)

As imagens acima capturadas por microscopia ilustram defeitos e inclusões encontrados em ligas utilizadas na fabricação das latas de alumínio. Importante ressaltar que cada amostra possua uma particularidade de imagens, evidenciando ou não esses tipos de partículas que possam prejudicar o processo de fabricação.

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A reciclagem do alumínio destaca-se no ramo metalúrgico como uma das principais tendências para o futuro. As latas de alumínio são recicláveis durante inúmeros ciclos, retornando ao consumidor em apenas alguns meses. Entretanto, há uma escassez dessa abordagem nas graduações em química. Neste contexto, o presente trabalho possui potencialidade para aplicação no ensino superior, agregando conhecimentos básicos sobre metalurgia para o mercado de trabalho. Além disso, esse conhecimento interdisciplinar, com vários conceitos químicos, é enriquecedor ao currículo, uma vez que possibilita a exploração de diferentes métodos analíticos, relacionando-os a sua real aplicação na indústria.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Reciclagem: História do alumínio. Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>>. Acesso em março 2021.

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Estatísticas Nacionais: Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio. Disponível em: <<https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>>. Acesso em julho 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14939**: Alumínio e suas ligas: coleta e preparação de amostras para análise química por espectrometria de emissão óptica. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISSO 209**: Alumínio e suas ligas: Composição Química. Rio de Janeiro, ABNT, 2010. 4 p.

AROTEC INDÚSTRIA E COMÉRCIO- Cortadora Metalográfica COR80. Cotia, SP. Disponível em: <<http://www.arotec.com.br/2-uncategorised/29-art-cor80>>. Acesso em: 30 jan. 2022.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E3-95**: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA, 1993.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-716**: Standard Practices for Sampling and Sample Preparation of Aluminum and Aluminum Alloys for Determination of Chemical Composition by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-1251**: Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-407**: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA, 1999. 23 p.

ASHKENAZI, Dana. How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 143, p. 101-113, 2019.

ABRALATAS – Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio. Brasil reciclou mais de 97% das latas de alumínio para bebidas. Disponível em: <<https://www.abralatas.org.br/brasil-reciclou-mais-de-97-das-latas-de-aluminio-para-bebidas/>>. Acesso em março 2021.

BOFF, L. Sustentabilidade, o que é o que não é. Editora Vozes. Petropolis, Rio de Janeiro, 2016.

BRAY, J. W. In: ASM Metals Handbook, v. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys. USA, ASM International (American Society for Metals), p. 44, 45, 138 1997.

CALDERONI, S. Os bilhões perdidos no lixo. 4. Ed. São Paulo: Humanitas / FFLCHUSP. P. 34. 2003.

CALLISTER Jr, W.D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARDOSO, J.G.R. *et al.* A indústria do alumínio: estrutura e tendências. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 43-88, 2011. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2499>>. Acesso em abril 2021.

CAYLESS, B. In: ASM Metals Handbook, v. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys. USA, ASM International (American Society for Metals), p. 39-42, 1997.

CBA – Companhia Brasileira de Alumínio. Nossa trajetória. Disponível em: <<https://cba.com.br/cba/nossa-trajetoria/>>. Acesso em março 2021.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. Editora Edgard Blücher: São Paulo, 2008, 676 p.

DAVIS, J.R. Light Metals and Alloys. In: ASM SPECIALTY HANDBOOK. Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio, ASM International, p. 351-416, 2001.

ELMORE, Bartow J. A indústria americana de bebidas e o desenvolvimento de programas de reciclagem de Curbside, 1950-2000. Business History Review, v. 86, n. 3, pág. 477-501, 2012.

FARNSWORTH, P.B. In: ASM Metals Handbook, v. 10, Materials Characterization. USA, ASM International (American Society for Metals), 1997.

FERREIRA, A. B. H. (1999). Minidicionário Eletrônico Aurélio Século XXI. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira e Lexikon Informática, 1999.

FOGAZZI, W. *et al.* Análise microestrutural da liga AA3104 H19. 2013. Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

GERDAU AÇOS. Início da Fabricação do Aço. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/inicio-da-fabricacao-do-aco>>. Acesso em março 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2021. Disponível em: <<http://www.world.aluminium.org>>. Acesso em dezembro 2021.

LCA CONSULTORES. Análise da viabilidade técnica e econômica da Logística Reversa de Latas de alumínio para bebidas Avaliação econômica das propostas de Contrapartidas para eventual Termo de Compromisso, 2020. Disponível em: <[https://alimentusconsultoria.com.br/wp-content/uploads/2020/08/Anexo-3\\_EstudoViabTecEcon\\_TC-Latas-Aluminio.pdf](https://alimentusconsultoria.com.br/wp-content/uploads/2020/08/Anexo-3_EstudoViabTecEcon_TC-Latas-Aluminio.pdf)>. Acesso em fevereiro 2022.

LØVIK, A.N.; MÜLLER, D.B. A material flow model for impurity accumulation in beverage can recycling systems. In: Light Metals. Springer, Cham, p. 907-911, 2014.

MARTINS. Espectrômetro de Emissão Ótica. Belo Horizonte: DAC Instrumentos Científicos, 2006.

MURTA, M. C. J. Análise de inclusões não metálicas em aço por espectrometria de emissão óptica associada ao sistema Spark-DAT. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2013.

NIERO, M.; OLSEN, S.I. Economia circular: estar ou não em um ciclo fechado de produtos? Uma avaliação do ciclo de vida de latas de alumínio com inclusão de elementos de liga. Recursos, Conservação e Reciclagem, v. 114, p. 18-31, 2016.

OOSUMI, K. Influência da tinta na reciclagem de latas de bebidas de alumínio usadas. Ecomaterials. Elsevier, p. 197-200, 1994.

PEREIRA, T.N.D. *et al.* A reciclagem de alumínio no Brasil e o mercado Internacional: uma análise quantitativa. Revista Planejamento e Políticas Públicas (PPP), Brasília, n. 47, p. 289-303, 2016. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/582>. Acesso em março 2021.

PINTO, C. G. Estudo sobre o efeito do tratamento de recuperação nas propriedades mecânicas da liga AA 5182 utilizada na fabricação de tampas de latas de bebidas. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ROHDE, R.A. Metalografia Preparação de Amostras: uma abordagem prática. Laboratório de Ensaio Mecânicos e Materiais – LEMM. Universidade Regional Integrada do Alto e das Missões. 2010, 30 p. Disponível em:

<[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod\\_resource/content/1/APOSTILA\\_METALOGRAFIA.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf)>. Acesso em maio 2021.

ROOY, E.L. In: ASM Metals Handbook, v. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys. USA, ASM International (American Society for Metals), p.17, 1997.

SARTORI, A. Metalografia de ligas de Alumínio: Curso ABAL. São Paulo, SP. set. 2020. Apresentação de Power Point. 48 slides. color. Acesso em maio 2021.

SARTORI, A. Macrografia e Micrografia: Notas de aula Fatec Metalurgia. Pindamonhangaba, SP. mai. 2021. Apresentação de Power Point. 29 slides. color. Acesso em maio 2021.

SLICKERS, K. Automatic Atomic Emission Spectroscopy. Editora Brühlshe Universitätsdruckerei, Griessen, 1993.

SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS. Spectro Sul Americana. Schematics Spectrolab. Alemanha. Disponível em: <https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/arc-spark-stationary-oes-working-principle>. Acesso em 22 janeiro 2022.

SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS GMBH. SPECTROLAB S - A True Revolution in High-End Metal Analysis. Disponível em: <<https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/spectrolab-s-metal-analysis>>. Acesso em março 2021.

SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS GMBH. Aluminum Recycling: Adding Value by Analysis. Disponível em: <<https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/spectrolab-s-metal-analysis>>. Acesso em abril 2021.

TECLAGO, TECNOLOGIA EM MÁQUINAS METALOGRÁFICAS. Molde de Silicone para embutimento a frio. Disponível em: <<https://www.teclago.com.br/produtos/consumiveis-para-embutimento/molde-de-silicone-de-30mm-para-embutimento/>>. Acesso em fevereiro 2022.

The Aluminum Association. Aluminum Alloys 101. Disponível em: <<https://www.aluminum.org/aluminum-advantage/infographic-gallery/aluminum-alloys-101>>. Acesso em abril 2021.

The Aluminum Association. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys. Disponível em: <<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Teal%20Sheets.pdf>>. Acesso em abril 2021.

THERMO FISCHER SCIENTIFIC. Analysis of Aluminum and its Alloys by Optical Emission. ARL 3460 Metals Analyzer: Application Note: 41201, Ecublens, Suíça, 2007, 4p.



VERRAN, G.O.; KURZAWA, U.; PESCADOR, W.A. Reciclagem de Latas de Alumínio Visando Melhor Rendimento e Qualidade Metalúrgica no Alumínio Obtido. *Revista Matéria*, Santa Catarina, v. 10, n. 1, pp. 72 – 79, 2005. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10635>>. Acesso em abril 2021.

VERRAN, G.O; KURZAWA, U. Um estudo experimental da reciclagem de latas de alumínio usando fusão em forno de indução. *Recursos, Conservação e Reciclagem*, v. 52, n. 5, p. 731-736, 2008.

VIJAYAKUMAR, M.D. *et al.* Experimental study of chemical composition of aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, v. 37, p. 1790-1793, 2021.

WANG, M. *et al.* Estudo sobre a remoção do revestimento de latas de bebidas usadas com ácido sulfúrico espesso para reciclagem. *Conversão e gestão de energia*, v. 48, n. 3, p. 819-825, 2007.

ZHOU, B. *et al.* Evolução da microestrutura da liga de alumínio 7075 reciclado e suas propriedades mecânicas e de corrosão. *Journal of Alloys and Compounds*, p. 160407, 2021.

ZUMBA, A. A. F. Estudo de redução do tempo de ciclo de homogeneização da liga AA5182. 74 p. 2016. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.