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

NELMA CRISTIANE SIQUEIRA DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES QUÍMICA, MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS LIGAS 3004, RECICLADAS DAS LATAS DE ALUMÍNIO, COM E SEM A ADIÇÃO DE 3 % DE NÍQUEL, SOLIDIFICADAS EM MOLDE DE COBRE

ANANINDEUA
2023

NELMA CRISTIANE SIQUEIRA DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES QUÍMICA, MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS LIGAS 3004, RECICLADAS DAS LATAS DE ALUMÍNIO, COM E SEM A ADIÇÃO DE 3 % DE NÍQUEL, SOLIDIFICADAS EM MOLDE DE COBRE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do Grau de Bacharela em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientadora: Ma. Brenda Thayssa Figueira Daniel

ANANINDEUA
2023

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

S586a Silva, Nelma Cristiane Siqueira da.
Análise comparativa das propriedades química, microestrutural e mecânica das ligas 3004, recicladas das latas de de alumínio, com e sem adição de 3% de níquel, solidificadas em molde de cobre / Nelma Cristiane Siqueira da Silva. — 2023.
DXXXV, 85 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Profª. MSc. Brenda Thayssa Figueira Daniel
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2023.

1. Reciclagem. Liga de alumínio 3004. Fundição. Microestrutura. I. Título.

CDD 620.11

NELMA CRISTIANE SIQUEIRA DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES QUÍMICA, MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS LIGAS 3004, RECICLADAS DAS LATAS DE ALUMÍNIO, COM E SEM A ADIÇÃO DE 3 % DE NÍQUEL, SOLIDIFICADAS EM MOLDE DE COBRE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do Grau de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Data da Avaliação: 29 / 05 / 2023.

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA:

Deibson Silva da Costa

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

Brenda Thayssa F. Daniel

Ma. Brenda Thayssa Figueira Daniel
(PPGEM - ITEC - UFPA - Coorientadora)

Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMat - UFPA - Campus Ananindeua - Examinador Interno)

Emerson Rodrigues Prazeres

Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres
(FEMat - ITEC - UFPA - Examinador Externo)

ANANINDEUA
2023

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não serão suficientes para expor todo meu agradecimento às pessoas, as quais Deus gentilmente colocou no meu caminho, que de alguma maneira fizeram parte dessa trajetória tão importante em minha vida. Mas, deixo nestas linhas minha completa gratidão; e em especial quero agradecer:

Primeiramente, a Deus pelo dom da vida, onde estive constantemente sob a sua proteção e misericórdia, partilhando de sua bondade e pela intercessão de Nossa Senhora para a conclusão deste trabalho. Pois, todas as manhãs acordo porque o Senhor me desperta para novas batalhas, novas vivências, novas vitórias.

A minha mãe, Mª de Lourdes Siqueira da Silva, mulher guerreira e de fibra. Obrigada pelo amor incondicional, pelas orações nos momentos de aflição e por sempre acreditar na minha vitória.

Ao meu pai, João Santa Helena Gomes da Silva, pela força e incentivo durante todo esse percurso. Obrigada por não me desamparar mediante a tantas dificuldades.

Aos meus irmãos e irmãs, que foram fundamentais para que eu chegasse até o final desta jornada, me apoiando, incentivando, desejando força (e nunca sorte) e me fazendo crer que o sol brilha depois da tempestade!

Aos meus filhos: Camila, Gabriel, Felipe e esposo Natalino, por toda parceria, incentivo durante todo esse trajeto e por sempre estarem ao meu lado.

À minha cunhada Walquíria, a minha sobrinha Juliana e ao amigo Cristiano, pela generosidade e apoio para vencer as dificuldades durante esta longa caminhada.

Ao meu orientador Professor Dr. Deibson Silva da Costa, pela sua disponibilidade, dedicação e compromisso com que me orientou.

À minha coorientadora Ma. Brenda Thayssa Figueira Daniel, pela orientação, disponibilidade, paciência, confiança e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que conquistei ao longo do curso de engenharia de materiais, em especial ao Mathaus Moraes, Rute Nara, Juliana Barbosa, Lucas Rezende, Josilene Bonifácio e Carlos Cícero, pela amizade, companheirismo e pela grande ajuda para vencer todos os obstáculos no decorrer da minha formação acadêmica.

Ao Laboratório de Metalografia do Grupo de Pesquisa GPEMAT, da Faculdade de Engenharia Mecânica, em especial aos amigos, Emerson Prazeres, Mateus José

Souza, Greg Miranda e Eric Espíndola, por toda a ajuda, ensinamentos, paciência e tempo cedidos.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos – LCAM, em especial aos amigos Tárcio Cabal e Francisco Ferreira, pela disponibilidade e ajuda preciosa para o andamento da pesquisa.

Ao Laboratório de Máquinas e Operatrizes – LABMAQ, em especial ao técnico Paulo Sérgio Siqueira Monteiro, pela generosidade e grande ajuda que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

A UFPA, campus Ananindeua em especial a Faculdade de Engenharia de Materiais.

Por fim, agradeço aos que por aqui repousarem um olhar curioso e atento. Espero que este caminho possa ser percorrido mais vezes, como foi por mim e pela maioria dos autores que alicerçaram este trabalho, trazendo assim, novas experiências e percepções à justa natureza das coisas.

A todos meu muito obrigada!!

“Senhor, quero dar-te graças de todo o coração e falar de todas as tuas maravilhas”. (Salmos 9:1)

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois, o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”. (Josué 1:9)

RESUMO

A reciclagem de materiais é um dos fatores que contribuem para o desenvolvimento sustentável no planeta. A reciclagem do alumínio é referência para a indústria mundial, especialmente a de embalagens. Neste trabalho foi realizado a obtenção de dois lingotes de alumínio reciclados de latas de bebidas pós-consumo, liga AA3004, com o objetivo de comparar suas propriedades química, microestrutural e mecânica, sendo que o segundo lingote foi modificado por teor de 3 % Níquel. Os materiais coletados foram higienizados, cominuídos, prensados e submetidos à fusão. Optou-se em utilizar o molde de cobre para a solidificação dos lingotes 1 (3004) e 2 (3004 + 3 % Ni). Para a caracterização química utilizou-se as técnicas de Espectrometria de Emissão Óptica (EEO) e microscopia eletrônica de varredura por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (MEV/EDS). As amostras obtidas dos dois lingotes foram preparadas por meio de caracterização metalográfica. As microestruturas foram analisadas através de Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura com sistema de Energia Dispersiva (MEV/EDS). Na caracterização mecânica foram realizados os ensaios de microdureza Vickers e de tração. Como resultado do estudo, observou-se que para a caracterização química por EEO do lingote 1, apenas o elemento Mn apresentou valor inferior (0,83 %), mas não discrepante do apresentado pela norma ABNT NBR ISO 209:2010. Para o resultado por EEO do lingote 2, constatou-se que o elemento Mn também apresentou percentual inferior (0,84 %) e o valor encontrado para elemento Fe foi superior (> 1,00 %) segundo a norma ABNT NBR ISO 209:2010. As microestruturas obtidas são típicas para as ligas Al-Mn e Al-Mn-Ni. A microdureza obtida para o lingote 1 foi de 55,76 HV e para o lingote 2 foi de 56,32 HV. O limite de resistência a tração (LRT) mostrou que o valor médio geral para o lingote 1 foi de 109 MPa e para o lingote 2 o valor médio geral do limite de resistência a tração foi de 140 MPa. Por fim, os valores obtidos evidenciam que o lingote 2 apresentou um melhor resultado devido a presença do elemento Ni.

Palavras-chave: Reciclagem. Liga de alumínio 3004. Fundição. Microestrutura.

ABSTRACT

Recycling materials is one of the factors that contribute to sustainable development on the planet. Aluminum recycling is a benchmark for the world industry, especially the packaging industry. In this work, two aluminum ingots recycled from post-consumer beverage cans, alloy AA3004, were obtained in order to compare their chemical, microstructural and mechanical properties, with the second ingot being modified by a 3% nickel content. The collected materials were sanitized, comminuted, pressed and subjected to melting. It was decided to use the copper mold for the solidification of ingots 1 (3004) and 2 (3004 + 3 % Ni). For the chemical characterization, Optical Emission Spectrometry (EEO) and Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive System (SEM/EDS). The samples obtained from the two ingots were prepared through metallographic characterization. The microstructures were analyzed using Optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive System (SEM/EDS). In the mechanical characterization, the Vickers microhardness and tensile tests were performed. As a result of the study, it was observed that for the chemical characterization by EEO of ingot 1, only the element Mn presented a lower value (0,83 %), but not discrepant from that presented by the ABNT NBR ISO 209:2010 standard. For the EEO result of ingot 2, it was found that the element Mn also presented a lower percentage (0,84 %) and the value found for element Fe was higher according to the ABNT NBR ISO 209:2010 standard. The microstructures obtained are typical for Al-Mn and Al-Mn-Ni alloys. The microhardness obtained for ingot 1 was 55.76 HV and for ingot 2 its was 56.32HV. The ultimate tensile strength (TRL) showed that the overall average value for ingot 1 was 109 MPa and for ingot 2 the overall average value of the tensile strength limit was 140 MPa. Finally, the values obtained show that the ingot 2 presented a better result due to the presence of the element Ni.

Keywords: Recycling; 3004 aluminum alloy; Casting; Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo do alumínio primário.....20
Figura 2 - Bauxita.....23
Figura 3 - Etapas de mineração de Bauxita.....24
Figura 4 - Processo *Bayer*.....25
Figura 5 - Fluxograma simplificado do processo Bayer.....26
Figura 6 - Processo de redução do alumínio.....27
Figura 7 - Fluxograma das etapas da reciclagem do alumínio secundário.....28
Figura 8 - Gráfico do índice de reciclagem de latas de alumínio para bebidas de 2009 a 2020.....29
Figura 9 - Ciclo de vida das latas de Alumínio.....30
Figura 10 - Latas de alumínio.....32
Figura 11 - Fundição do alumínio.....36
Figura 12 - Processo de nucleação e crescimento.....38
Figura 13 - Representação esquemática da zona coquilhada.....40
Figura 14 - Representação esquemática da zona colunar.....40
Figura 15 - Representação esquemática da zona equiaxial.....41
Figura 16 - Representação esquemática das três zonas da macroestrutura de solidificação.....42
Figura 17 - Representação esquemática da formação das microestruturas de solidificação: SRC: Super-resfriamento; VL: Velocidade da Isoterma *liquidus*; GL: Gradiente Térmico; CO: Concentração de Soluto.....43
Figura 18 - Representação de uma microestrutura dendrítica: espaçamentos primários (λ1) e secundários (λ2).....43
Figura 19 - Diagrama binário do sistema Al-Ni.....44
Figura 20 - Detalhe da parte rica em (Al) + Al_3Ni do diagrama Al-Ni.....45
Figura 21 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa.....46
Figura 22 - (a) Material coletado, (b) remoção da tinta, (c) corte dos corpos da lata e (d) material cortado e pesado.....47
Figura 23 - Bases das latas de alumínio prensadas.....48
Figura 24 - Cadinho de carbeto de silício preparado para fundição.....48

Figura 25 - (a) Forno tipo mufla utilizado e (b) molde de cobre utilizado no vazamento dos lingotes. 49
Figura 26 - (a) Injeção de argônio, (b) vazamento do metal líquido e (c) obtenção do lingote 1. 50
Figura 27 - (a) Vazamento do metal líquido e (b) obtenção do lingote 2. 50
Figura 28 - Cortadora CMR-60. 51
Figura 29 - (a) Lingote 1(corpos das latas), (b) lingote 2 (bases das latas + Ni) e (c) modelo de corte das amostras. 51
Figura 30 - Desenho esquemático do corte longitudinal. 52
Figura 31 - Espectrômetro óptico 53
Figura 32 - (a) amostra do lingote 1 e (b) amostra do lingote 2. 53
Figura 33 - Equipamento MEV/EDS. 54
Figura 34 - Politriz elétrica. 54
Figura 35 - Microscópio óptico 55
Figura 36 - (a1) amostra lixada, polida e (a2) atacada do lingote 1 (corpos das latas); (b1) amostra lixada, polida e (b2) atacada do lingote 2 (bases das latas + Ni). 56
Figura 37 - (a) Cuba ultrassônica e (b) Equipamento MEV/EDS. 57
Figura 38 - Amostra do lingote 1. 57
Figura 39 - Amostra do lingote 2. 57
Figura 40 - Microdurômetro HV-1000B. 58
Figura 41 - (a) Imagem esquemática da amostra do lingote 1 e (b) do lingote 2 com as suas respectivas marcações. 59
Figura 42 - Máquina de ensaio de tração. 60
Figura 43 - Desenho esquemático dos corpos de prova, dimensões em milímetros. 60
Figura 44 - (a) padronização dos corpos de prova do lingote 1 e (b) do lingote 2. 61
Figura 45 - Microestrutura do lingote 1, sentido transversal (a) 5x e (b) 10x. 64
Figura 46 - Microestrutura da amostra do lingote 2, sentido transversal (a) 5x e (b) 10x. 64
Figura 47 – Micrografias do lingote 1: (a) e (b) matriz geral, (c) e (d) detalhes dos intermetálicos. 66
Figura 48 - Micrografia da amostra do lingote 2: (a) e (b) matriz geral, (c) e (d) detalhes dos intermetálicos. 67
Figura 49 - Lingote 1: Micrografia 1, respectivos espectros e tabelas (a) intermetálicos nos contornos dos braços dendríticos 1 e (b) matriz Al-α 1. 68

Figura 50 - Lingote 1: Micrografia 2, respectivos espectros e tabelas (a) intermetálico no contorno do braço dendrítico 2 e (b) matriz Al-α 2. 69
Figura 51 - Lingote 2: Micrografia 1, espectros e tabelas (a) intermetálico no contorno do braço dendrítico 1 e (b) matriz Al-α 1. 70
Figura 52 - Lingote 2: Micrografia 2, espectros e tabelas (a) intermetálico no contorno do braço dendrítico 2 e (b) matriz Al-α 2. 70
Figura 53 - Gráfico com a média da microdureza HV para o lingote 1. 71
Figura 54 - Gráfico com a média da microdureza HV para o lingote 2. 73
Figura 55 - Corpos de prova tracionados: (a) do lingote 1 e (b) do lingote 2. 74
Figura 56 - Desenho esquemático da parte superior (A e B) e parte inferior (C e D) dos lingotes 1 e 2. 75
Figura 57 - Comparação dos resultados do LRT do lingote 1 ((a1) parte superior e (a2) inferior); do lingote 2 ((b1) parte superior e (b2) inferior). 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura das ligas de alumínio. 34
Tabela 2 - Composição química da liga AA3004.....62
Tabela 3 – Resultados da composição química por EEO e EDS do lingote 1 e do lingote 2.....62
Tabela 4 - Média da microdureza HV do lingote 1. 71
Tabela 5 - Média da microdureza HV do lingote 2. 72
Tabela 6 - Média geral com desvio padrão da microdureza HV dos lingotes 1 e 2....73
Tabela 7 - Mostra os resultados do limite resistência a tração (LRT) com o desvio padrão da parte superior (A e B) e parte inferior (C e D) dos lingotes 1 e 2. 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aluminato de sódio ($Na(Al(OH)_4$)

Associação Brasileira do Alumínio (ABAL)

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio (ABRALATAS)

American Society for Testing and Materials (ASTM)

Concentração de Soluto (CO)

Espectrometria de Emissão Óptica (EEO)

Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS)

Fluoreto duplo de sódio e alumínio ($3NaF.AlF_{3\,(s)}$)

Gradiente Térmico (GL)

Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPMAT)

Hidróxido de sódio (NaOH)

Libra força por polegada quadrada (lbf/in^2)

Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM)

Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM)

Micrômetro (µm)

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Microscópio Óptico (MO)

Milímetro (mm)

Norma Técnica (NBR)

Óxido de Alumínio (Al_2O_3)

Óxido de Cálcio (CaO)

Sólido e o Líquido (S/L)

Super-resfriamento constitucional (SRC)

Velocidade da Isoterma *liquidus* (VL)

Universidade Federal do Pará (UFPA)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 Justificativa 17
1.2 Objetivos 18
1.2.1 Objetivo Geral 18
1.2.2 Objetivos Específicos 18
1.3 Estrutura do trabalho 18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
2.1 Alumínio 20
2.2 Alumínio Primário 22
2.2.1 Bauxita 23
2.2.2 Processos para obtenção do alumínio primário 24
2.2.2.1 Mineração de bauxita 24
2.2.2.2 Refino da alumina 25
2.2.2.3 Redução do alumínio 26
2.3 Alumínio Secundário 27
2.3.1 Reciclagem das latas de alumínio 28
2.3.2 Fabricação das latas de alumínio no Brasil 30
2.4 Ligas de alumínio 32
2.4.1 Ligas Al-Mn-Mg (3XXX ou 3XX.X) 34
2.5 Fundição 36
2.6 Solidificação 37
2.6.1 Formação da macroestrutura 38
2.6.1.1 Zona Coquilhada 39
2.6.1.2 Zona Colunar 40
2.6.1.3 Zona Equiaxial 41
2.6.2 Formação da microestrutura 42
2.7 Elemento de liga 44
2.7.1 Níquel (Ni) 44
3 MATERIAIS E MÉTODOS 46
3.1 Materiais 46
3.1.1 Coleta seletiva 46
3.1.2 Preparação da matéria-prima 47

3.2 Métodos 48
3.2.1 Fundição 48
3.2.2 Obtenção do corpo de prova 50
3.3 Caracterização das amostras 52
3.3.1 Caracterização química 52
3.3.1.1 Espectrometria de emissão óptica (EEO) 52
3.3.1.2 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia MEV/EDS. 53
3.3.2 Caracterização microestrutural 54
3.3.2.1 Microscopia óptica (MO) 55
3.3.2.2 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (MEV/EDS) 56
3.3.3 Caracterização Mecânica 58
3.3.3.1 Microdureza Vickers (HV) 58
3.3.3.2 Ensaio de tração 59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 62
4.1 Caracterização química 62
4.2 Caracterização microestrutural 63
4.2.1 Microscopia óptica 63
4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (MEV/EDS). 65
4.3 Caracterização Mecânica 71
4.3.1 Microdureza 71
4.3.2 Ensaio de tração 74
5 CONCLUSÕES 78
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 80
REFERÊNCIAS 81

1 INTRODUÇÃO

É crescente o apelo mundial por um novo tipo de desenvolvimento que leve em consideração a harmonia entre os aspectos sociais, ambientais e econômicos de novos materiais. Esta é a base do conceito de Desenvolvimento Sustentável (SANTOS, 2019). Para a engenharia de materiais essa questão ambiental ganha relevância e estratégia, dispondo-se como novo parâmetro para diversas pesquisas (COUTINHO, 2018).

Segundo Diniz (2018), o alumínio é um metal de recente entrada no mercado, sua produção industrial ocorreu apenas no final do século XIX. Além do mais, ele possui uma combinação de propriedades que o torna um material muito útil para a engenharia, dentre as quais se destacam resistência à corrosão, baixa densidade, elevadas condutividades térmica e elétrica e facilidade de processamento através de diversos métodos de fabricação.

Esse metal ocupa posição de destaque no cenário da indústria mundial, sendo o segundo elemento mais utilizado no mundo. Para Souza (2017), a inovação tecnológica é um dos elementos que garantem a competitividade do alumínio, cujo resultado é o seu próprio processo de reciclagem, se tornando uma referência para a indústria de modo geral, e em especial, a de embalagens.

Caldas (2019) menciona em seu trabalho que a reciclagem do alumínio a partir da refusão de latas de bebidas pós-consumo, vem promovendo um crescimento significativo em função da economia de energia e preservação ao meio ambiente. Essa economia energética a partir da reciclagem de 1kg de alumínio representa uma redução no consumo da ordem de 95 %, quando comparado com a produção de alumínio primário que envolve um elevado consumo de energia.

Segundo a revista Alumínio (2021), o Brasil é o terceiro maior mercado de latinhas do mundo. Apesar da pandemia da covid-19, nosso país encerrou o ano de 2020 com o índice de 97,4 % de reciclagem de latinhas de alumínio para bebidas, mantendo-se estável em relação a 2019 e permanecendo entre os líderes mundiais.

O alumínio é um metal utilizado na indústria de fabricação de produtos adquiridos pelo processo mecânico de estampagem e estiramento como ocorre na fabricação dos corpos de latas de alumínio para bebidas que são produzidas com a liga AA3004. Essa liga tem como principal elemento de liga o manganês, este elemento é de grande importância na indústria do alumínio mesmo sendo utilizado em

pequenos teores, inferiores à 1,5 %. Uma vez que, essa liga é classificada como trabalhável e não tratável termicamente e suas propriedades mecânicas são melhoradas a partir da formação de solução sólida e / ou deformação a frio. (CALDAS, 2019).

As latas de bebidas são fabricadas a partir de três diferentes partes: o corpo e a base fabricados através da liga 3004, apresenta boa resistência à corrosão, excelente trabalhabilidade, boa conformabilidade e moderada resistência mecânica, a tampa que é produzida por meio da liga 5182 e por último, o anel que é fabricado com a liga 5082 (CALDAS, 2019).

A morfologia dendrítica é a característica predominante das ligas de alumínio. É válido destacar que, a composição química, os processos de fundição e de solidificação interferem, diretamente, na formação da estrutura do material que podem promover variações nas propriedades finais (SOUZA, 2017).

Então, o escopo deste trabalho é caracterizar e comparar as propriedades mecânicas, microestruturais e químicas da liga base 3004 (corpo da lata) com a liga 3004 (base da lata) modificada com adição de 3 % Ni, ambas recicladas de latas de alumínio para bebidas e fundidas em molde de cobre.

1.1 Justificativa

Justifica-se a relevância deste trabalho, visto que a sociedade está cada vez mais atenta aos problemas causados pela degradação do meio ambiente. O uso indiscriminado dos recursos naturais provoca uma das maiores preocupações da sociedade contemporânea, que é a geração de resíduos sólidos. Assim, visando a necessidade de maior reaproveitamento desses resíduos, é de extrema importância a prática de ações que busquem minimizar esses impactos negativos ao meio ambiente.

A reciclagem do alumínio gera a cultura de combate ao desperdício, difundindo e estimulando o hábito do reaproveitamento de materiais. Produzindo desse modo, reflexos positivos na formação da cidadania e na melhoria da qualidade de vida da população. A crescente utilização do alumínio também é fundamentada na necessidade de se desenvolver produtos mais sustentáveis e que consequentemente, causem um menor impacto ambiental. Assim, as aplicações do alumínio e suas ligas vêm diretamente ao encontro do conceito de sustentabilidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa das propriedades química, microestrutural e mecânica das ligas de alumínio 3004 e 3004 + 3 % Ni, ambas recicladas e fundidas em molde de cobre.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obter um lingote de alumínio reciclado e outro de alumínio reciclado modificado com adição de 3 % de Níquel por fusão, para análise e comparação das duas ligas;
- Analisar a composição química do lingote de alumínio reciclado (corpo da lata), para analisar se a composição química está de acordo com a norma vigente;
- Analisar a composição química do lingote de alumínio reciclado (base da lata + 3 % Ni), para analisar a composição e alterações químicas na liga;
- Caracterizar a microestrutura da liga de alumínio reciclado (corpo da lata) e da liga de alumínio reciclado (base da lata) modificada com a adição de 3 % de Ni, a fim de comparação;
- Realizar ensaios mecânicos de microdureza Vickers e tração nas ligas de alumínio reciclado, a fim de avaliar e comparar o perfil de microdureza e a resistência mecânica.

1.3 Estrutura do trabalho

Na Seção 1, buscou-se enfatizar as motivações, o assunto proposto, os objetivos e a justificativa.

Na Seção 2, realizou-se o levantamento bibliográfico e os termos que fundamentam o estudo sobre a reciclagem de latas de alumínio pós-consumo. Também apresenta o alumínio primário, alumínio secundário, os principais países líderes em reciclagem de latinhas de alumínio, as principais ligas de alumínio,

características mecânicas, ligas Al-Mn-Mg (3XXX ou 3XX.X), bem como a fundição e solidificação, macro e microestruturas de solidificação dos materiais e a adição do elemento de liga Níquel.

O conteúdo da Seção 3 apresenta a metodologia, os materiais e equipamentos utilizados, abordando os procedimentos experimentais desenvolvidos no trabalho e os detalhes de sua execução.

Em seguida, na Seção 4, são apresentadas as análises dos resultados obtidos e sua discussão, em forma de tabelas, gráficos ou imagens comparando-os aos resultados disponíveis na literatura. Os comentários sobre a importância da reciclagem de latas de alumínio pós-consumo são consolidados.

Na Seção 5, são indicadas as conclusões do trabalho, comparando os resultados alcançados com os esperados na literatura.

Na Seção 6, são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, ao final do TCC são listadas as referências bibliográficas que forneceram subsídios para elaboração da revisão da literatura, estabelecimento da abordagem metodológica, e discussão dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Coutinho (2018) menciona em seu trabalho que, devido à enorme diversidade em selecionar materiais para sua melhor aplicabilidade, a engenharia de materiais vem enfrentando um grande desafio no mundo moderno. Dessa forma, a recorrente competitividade industrial e a busca incessante por inovações tecnológicas, aliadas a propriedades específicas de desempenho e baixos custos de produção, formam assim, um ambiente cada vez mais complexo no campo da pesquisa.

Diante desta realidade, Melo *et al.*, (2018) afirma que a engenharia sustentável assume um papel relevante na aplicação de técnicas inovadoras. Além de ser indispensável à necessidade de se conhecer os tipos e o ciclo de vida dos materiais. Por esse motivo, o mais importante não é só produzir mais, no entanto, é preciso criar estratégias para produzir em larga escala de maneira consciente, para que a sustentabilidade faça parte do cotidiano das atuais e futuras gerações.

2.1 Alumínio

O alumínio é o segundo metal não ferroso mais consumido no planeta devido suas múltiplas aplicações. Porém, sua história de comercialização no mundo moderno é relativamente recente (RECICLOTECA, 2020). O processo do alumínio primário pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Processo do alumínio primário.

Fonte: ABAL, 2021.

De acordo com sua cronologia, seus compostos já eram utilizados pela humanidade há mais de 6.000 anos a. C., os povos que ocupavam a região hoje conhecida como Iraque, fabricavam cerâmicas contendo elevado teor de alumínio. Alguns séculos depois, os antigos egípcios e babilônios usavam um dos seus sais (o sulfato de alumínio) como fixador de corantes em tecidos, como também utilizavam outros compostos de alumínio como ingredientes no preparo de vários produtos químicos e medicinais (CALÇADA, 2018).

O químico Sir Humphry Davy finalmente descobriu o alumínio em 1809. Porém, esse metal só foi isolado em 1825 pelo físico Hans-Christian Oersted, produzindo pequenas porções do metal através do aquecimento do cloreto de alumínio com um amálgama de potássio. A primeira conquista industrial do alumínio por via química foi obtida por Henri Sainte-Claire Deville em 1854. Apesar disso, em 1859, Henri Sainte-Claire Deville aprimorou o processo de obtenção, substituindo o potássio por sódio e o cloreto simples pelo duplo.

Posteriormente, esse processo utilizado por Deville foi então substituído com êxito em 1886 pelo processo eletrolítico de Charles Martin Hall (EUA) e Paul L. T. Héroult (França). Esse método consiste em diluir a alumina em criolita fundida que será decomposta eletroliticamente. A partir do processo *Hall-Héroult* foi possível produzir o alumínio primário em larga escala, simplificando e barateando sua extração (MAGALHÃES, 2019).

Nos dias atuais, a população mundial está cada vez mais voltada para a preservação do meio ambiente e seus recursos naturais. Isso ocorre devido ao consumo desenfreado de produtos industrializados, gerando dessa forma, grande demanda de resíduos produzidos no dia a dia pela população (SANJAD, 2018).

Em função disso, a sociedade passa a buscar alternativas que utilizem a adoção de boas práticas para que possam garantir uma melhor qualidade de vida. Assim, a coleta seletiva destaca-se como um dos pilares do reaproveitamento de resíduo para reciclagem, uma vez que, a coleta seletiva consiste na separação de materiais, como plásticos, vidros, papéis, metais, entre outros, nas diversas fontes geradoras como, por exemplo: residências, escolas, comércio, empresas, indústrias, etc. (SANTOS, 2019).

É válido destacar a reciclagem do alumínio, possibilitando dessa forma, a diminuição do volume de resíduos nos aterros sanitários, além de evitar a poluição dos recursos naturais devido à retirada da bauxita (matéria-prima para a fabricação

do alumínio primário), assim como a economia de energia elétrica que chega a 95 % (AFONSO, 2019).

Para Dias (2016), o alumínio é considerado um metal de alta durabilidade, podendo ser reciclado diversas vezes sem perder suas características, possui baixo ponto de fusão (660 °C), elevada resistência a corrosão, baixo peso específico, elevada resistência mecânica entre outros, o que lhe confere ser um elemento altamente versátil. Nesse sentido, são inúmeras as aplicações do alumínio que atua em quase todos os setores fabris da sociedade especialmente o aeroespacial, da construção civil, automobilística, de embalagens, indústria elétrica, etc.

É importante ressaltar que, o alumínio pode ser produzido de duas maneiras, através da produção primária ou secundária. No que diz respeito à produção primária, o alumínio é obtido através da extração da bauxita, posteriormente passando pelo processo Bayer para a obtenção da alumina que por sua vez é reduzida e então é obtido o metal alumínio. Já na produção secundária, são reutilizadas sucatas de alumínio para a obtenção do mesmo (PIMENTA, 2017).

2.2 Alumínio Primário

O minério utilizado comercialmente para a obtenção do alumínio primário é a bauxita (gibsita) (CALDAS, 2019). Geralmente para ter viabilidade comercial esse minério precisa conter de 40 % a 60 % de alumina (Al_2O_3). O alumínio não é encontrado na natureza em seu estado puro, contudo, está sempre combinado com outros elementos, em especial o oxigênio, com o qual forma um óxido de alumínio de extrema dureza (alumina), além de algumas impurezas (MAGALHÃES, 2019).

Assim, para obter o alumínio metálico utiliza-se um método de refino em que a bauxita é transformada em óxido de alumínio (Al_2O_3), em seguida o mesmo é convertido em alumínio metálico através de um processo eletroquímico. Ressalta-se ainda que o método para exploração da bauxita cause nas proximidades fortes impactos no ambiente (RECICLOTECA, 2020).

2.2.1 Bauxita

De acordo com Reis (2015), a bauxita é um produto resultante da decomposição de rochas alcalinas provocado pelo intemperismo e lixiviação, geralmente são localizadas em regiões tropicais e subtropicais. Em relação à composição mineralógica da bauxita, sua composição está especialmente relacionada aos minerais de alumínio, seguida de minerais de silício, ferro e titânio; além da existência de uma significativa variedade de elementos minoritários.

A coloração da bauxita depende da porcentagem de ferro, por exemplo, as chamadas bauxitas brancas apresentam de 2 % a 4 % de óxido de ferro, enquanto as denominadas bauxitas vermelhas contêm até 25 % de óxido de ferro, são as mais indicadas para a produção do alumínio. A bauxita é um material heterogêneo formado por uma mistura de oxi-hidróxidos de alumínio hidratados e impurezas (REIS, 2015).

Segundo o mesmo autor, as bauxitas caracterizadas como metalúrgicas, têm elevado teor de gibsita (matéria-prima na produção de alumínio metálico). Por outro lado, as chamadas bauxitas não metalúrgicas, identificam-se por possuir uma elevada quantidade de diásporo, muito empregadas como matéria-prima em diversos setores da indústria de refratários, abrasivos, cimentos, indústria química, entre outros. Assim, mais de 90 % da produção mundial da bauxita é destinada para a obtenção da alumina, objetivando a produção do alumínio metálico mediante os processos combinados de digestão alcalina (processo *Bayer*) e redução eletrolítica (processo *Hall-Hérolt*). A bauxita pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2 - Bauxita.

Fonte: ABAL, 2017.

2.2.2 Processos para obtenção do alumínio primário

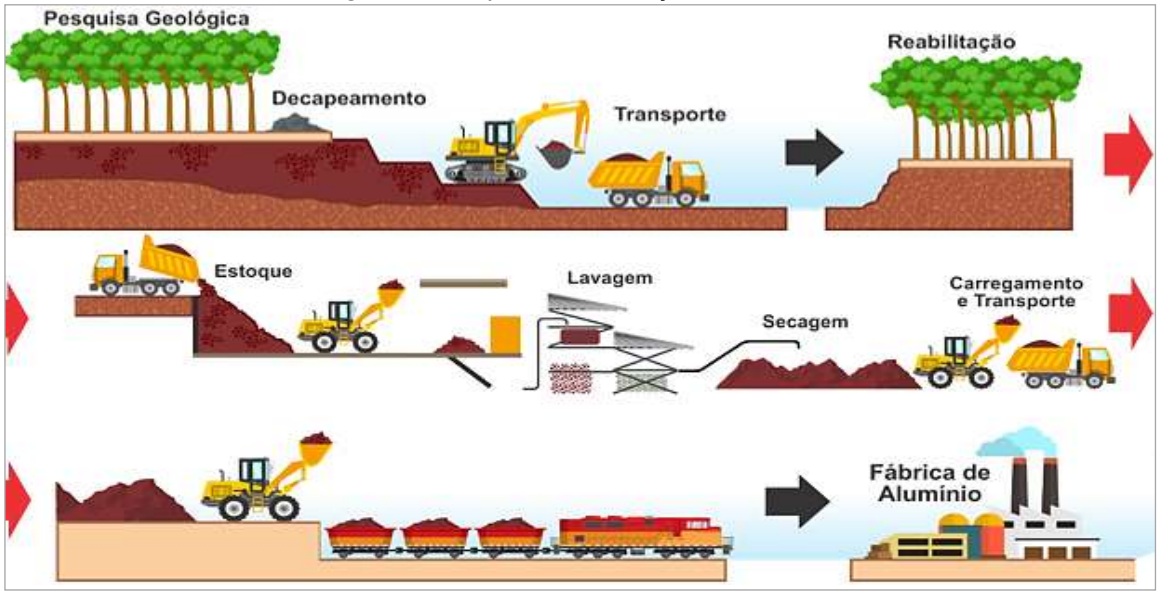
De acordo com Diniz (2018), a obtenção do alumínio metálico a partir da bauxita se dá através de três processos distintos: Mineração, Refinaria e Redução. Estas duas últimas etapas são conhecidas por apresentar elevado consumo de energia.

2.2.2.1 Mineração de bauxita

Inicialmente na mineração ocorre a extração da bauxita. Em seguida ocorre a lavagem da bauxita com água, que pode ser feita para reduzir a quantidade de sílica, se necessário. Posteriormente é feita a britagem, que consiste na redução do tamanho da bauxita e finalizando com a secagem. Então, a bauxita beneficiada é transportada para o processo de refino (SOUZA; LIMA, 2015). Segundo Magalhães (2019), normalmente para conseguir produzir 1 kg de alumínio primário é necessário em média 5 kg de bauxita. As etapas do processo de mineração de bauxita podem ser visualizadas na Figura 3.

.

Figura 3 - Etapas de mineração de Bauxita.

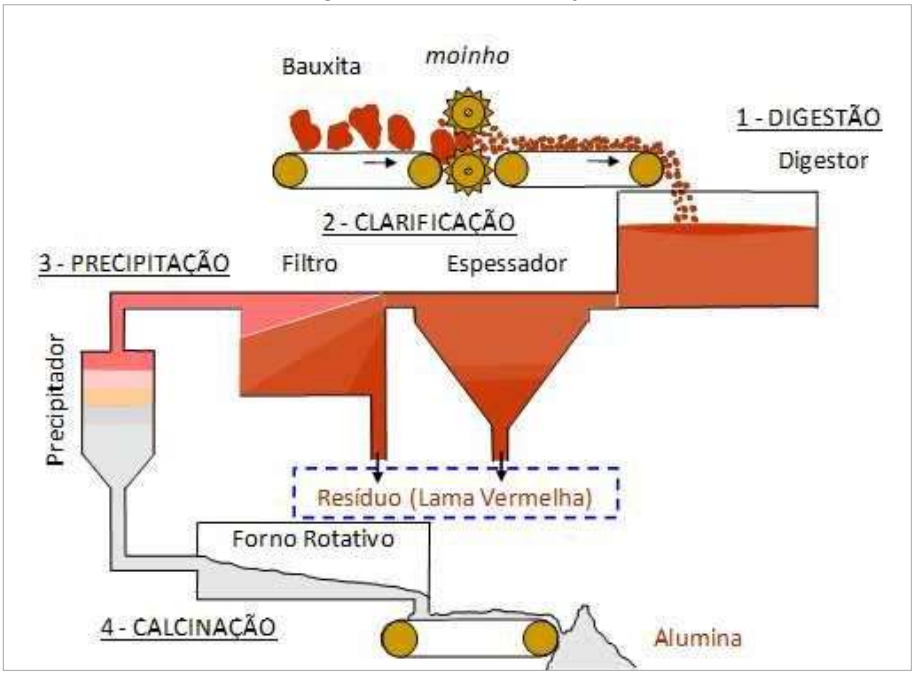


Fonte: VOTORANTIM, 2020.

2.2.2.2 Refino da alumina

Para Calçada (2018), logo após a mineração de bauxita é utilizado o processo *Bayer*, que tem por objetivo refinar a alumina. Produzindo assim, um pó de óxido branco, denominada alumina (Al_2O_3). Esse é o principal método empregado e economicamente viável na produção do óxido de alumínio. Os estágios do processo *Bayer* podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 4 - Processo *Bayer***.**



Fonte: GARCIA, 2012.

Ainda segundo o autor, o processo *Bayer* inicia-se essencialmente misturando a bauxita (cominuída) a uma solução de soda cáustica (NaOH) e cal (CaO), formando uma solução saturada, a qual vai reagir em digestores sob condições moderadas de temperatura e pressão. Diante desta realidade, a bauxita vai dissolver produzindo uma solução de aluminato de sódio ($Na(Al(OH)_4)$) e o rejeito denominado lama vermelha, que continuará na fase sólida.

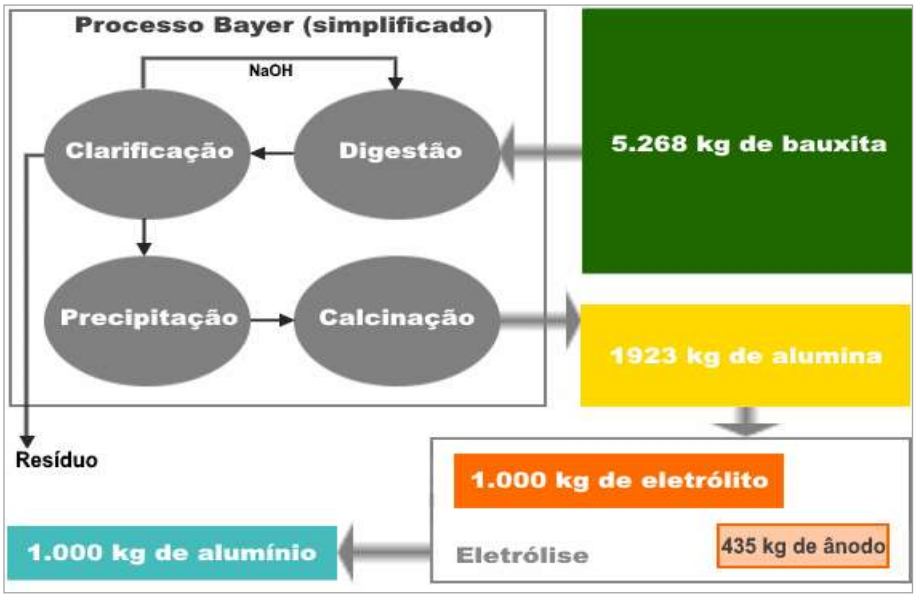
Em sequência, será realizada a etapa de clarificação, onde haverá a separação entre a lama vermelha (rejeito sólido) e o licor rico em aluminato de sódio (fase líquida), as técnicas de decantação e filtração serão utilizadas nessa etapa.

Caldas (2019) ressalta que logo após o resfriamento do licor de aluminato de sódio, ocorrerá a etapa de precipitação, onde é adicionada uma pequena fração de

cristais de alumina (sementes de hidratos). Essas semeaduras vão agir como nucleantes, motivando desse modo, a nucleação e o crescimento dos cristais. Porém, alguns elementos podem influenciar no rendimento da precipitação como, por exemplo, tempo de residência, temperatura do processo, relação alumina/cáustico, área de superfície da semente, além das impurezas do licor.

A calcinação é a última etapa do processo *Bayer*, onde a alumina é lavada, e posteriormente calcinada a uma temperatura aproximada de 1000 °C, produzindo cristais de alumina de elevada pureza. Na sequência, os elementos químicos presentes serão isolados através da eletrólise (SOUZA; LIMA, 2015). Para melhor entendimento das fases do processo *Bayer*, a Figura 5 apresenta um fluxograma resumido destas etapas.

Figura 5 - Fluxograma simplificado do processo Bayer.



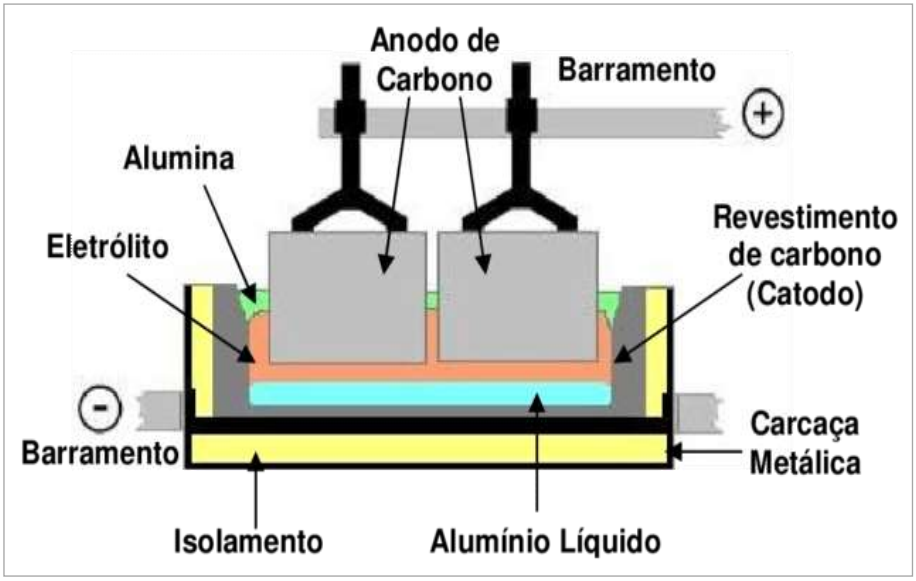
Fonte: GEOLOGIA E MINERAÇÃO, 2018.

2.2.2.3 Redução do alumínio

Calçada (2018) ressalta em seu estudo que o processo *Hall-Héroult* é responsável pela transformação da alumina calcinada em alumínio. Porém, o ponto de fusão da alumina é muito elevado (2060 °C). Assim, utiliza-se uma substância (fundente), que misturada com a alumina reduzirá o seu ponto de fusão para 1000 °C. Desse modo, a alumina é dissolvida em banhos de criolita (fluoreto duplo de sódio e

alumínio, $3NaF.AlF_{3(s)}$), com eletrodos de carbono imersos nessa mistura. Essa etapa se desenvolve em cubas eletrolíticas revestidas de carbono, esses fornos operam a uma temperatura de aproximadamente 960 °C. A cuba é composta de dois itens essenciais: o componente localizado na parte superior (ânodo) e o cátodo (verdadeira cuba), onde é feita a eletrólise. O processo de redução do alumínio pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Processo de redução do alumínio.



Fonte: SILVA, 2010.

Neste processo é utilizada uma enorme quantidade de energia elétrica. A formação do alumínio metálico ocorre através da passagem de corrente elétrica pela solução eletrolítica, neste sentido, o alumínio metálico será produzido por meio da reação dos íons de alumínio diluídos no eletrólito e o bloco anódico. Por fim, o alumínio líquido será transportado regularmente das cubas através de cadinhos até os fornos de espera. Então, o metal seguirá para a fase de lingotamento, onde será conformado e resfriado, produzindo os lingotes (CALÇADA, 2018).

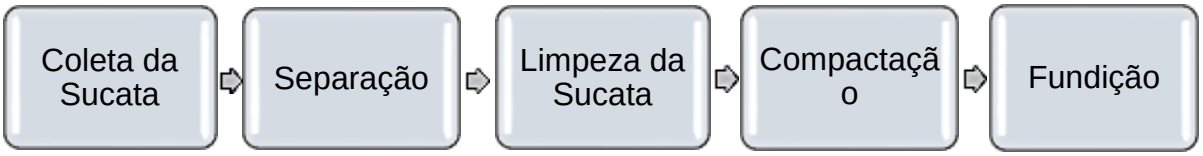
2.3 Alumínio Secundário

O alumínio secundário é obtido a partir de sucatas dele, por isso quando o assunto é reciclagem, o alumínio é o mais solicitado. A reciclabilidade desse metal é

uma ferramenta vital para melhorar a qualidade ambiental e a vida humana, despertando dessa forma, o grande interesse das indústrias na prática da sustentabilidade em relação aos aspectos, econômicos, sociais e ambientais (SOUZA; LIMA, 2015).

A obtenção do alumínio secundário envolve os seguintes processos: a coleta de sucata, separação, limpeza da sucata e prensagem do material selecionado. Por fim, a sucata é levada para os fornos de refusão, onde é produzido o metal líquido que estará pronto para receber os elementos de liga. Assim, a incorporação desses elementos está diretamente associada com a aplicabilidade final desejada para cada material (CALDAS, 2019). Um fluxograma das etapas do processo de reciclagem do alumínio secundário pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma das etapas da reciclagem do alumínio secundário.

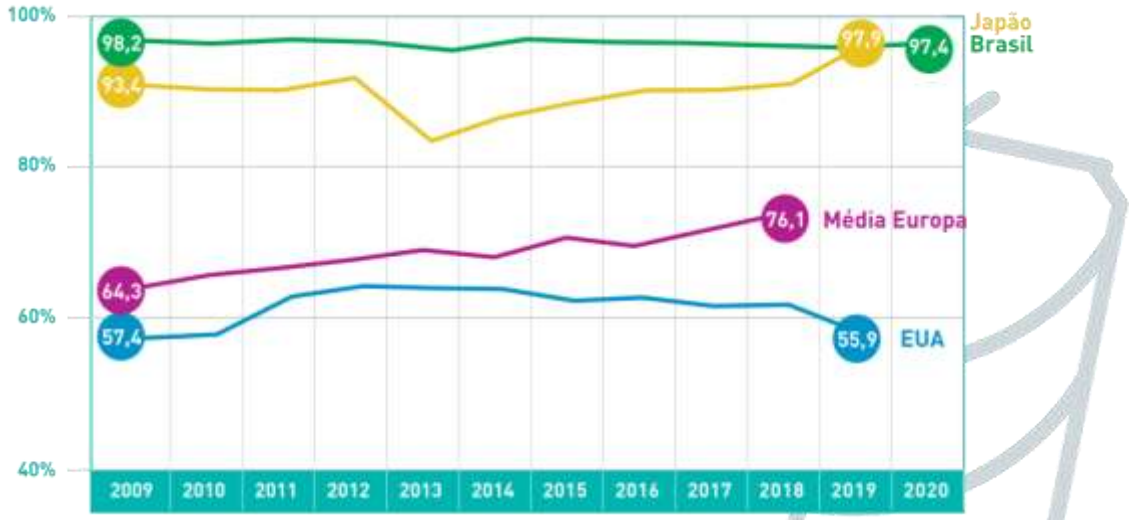


Fonte: Autora, 2023.

2.3.1 Reciclagem das latas de alumínio

Segundo a revista Alumínio (2021), o Brasil é o terceiro maior mercado de latinhas de alumínio do mundo, atrás somente da China e dos Estados Unidos. Apesar da pandemia da covid-19, nosso país encerrou o ano de 2020 com o índice de 97,4 % de reciclagem de latinhas de alumínio para bebidas, mantendo-se estável em relação a 2019 e permanecendo entre os líderes mundiais. Sendo assim, de 402,2 mil toneladas de latinhas vendidas, foram recicladas aproximadamente 31 bilhões de unidades de embalagens. Consolidando a preferência do mercado e do consumidor pela lata de alumínio como a embalagem mais adequada a diversas bebidas e a mais sustentável. Diante desse contexto, o setor de latas apresenta-se como um padrão mundial de excelência em economia circular. O gráfico do índice de reciclagem de latas de alumínio para bebidas de 2009 a 2020 pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 - Gráfico do índice de reciclagem de latas de alumínio para bebidas de 2009 a 2020.



Fonte: ABAL, 2021.

A Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio (Abralatas) e a Associação Brasileira do Alumínio (Abal), assinaram um termo com o Ministério do Meio Ambiente em 2020, com o objetivo de ampliar a gestão de coleta e reciclagem de latinhas de alumínio para bebidas. Dessa forma, a assinatura foi realizada no âmbito do programa Lixão Zero, contemplando melhorias na gestão e nas condições de trabalho dos catadores que atuam no setor. Em vista disso, o aumento na produtividade gera renda para milhares de famílias de catadores envolvidos, além de proporcionar a conservação do meio ambiente pela reutilização das latas em circulação (ABRALATAS, 2021).

Pindamonhangaba é o polo da reciclagem do alumínio no Brasil. Esta cidade reúne duas grandes empresas de reciclagem: a Novelis e a Latasa Reciclagem, que processam aproximadamente 70 % de toda a sucata recuperada no Brasil. Tornando-se assim as principais nesse ramo (MELO; MELO, 2018). Estudos revelam que, nos últimos anos o setor de embalagens de bebidas vem crescendo consideravelmente, isto acontece devido sua tecnologia avançada e alto poder de conformação, possibilitando dessa forma, atingir espessuras muito finas e excelente produtividade (CALDAS, 2019).

Nesse contexto, a reciclagem torna-se mais uma atividade vinculada a prática da sustentabilidade, que está cada vez mais empenhada em conscientizar a população do planeta em minimizar os danos ambientais. As latas de alumínio levam mais de 200 anos para se decompuser no solo, assim, a poluição gerada por elas

seria imensa com grandes prejuízos a natureza. Portanto, a reciclagem destas latas é de fundamental importância para a natureza no que tange à sustentabilidade (RECICLOTECA, 2020). O ciclo de vida das latas de alumínio pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 - Ciclo de vida das latas de Alumínio.

Fonte: AMAZÔNIA ACONTECE, 2015.

2.3.2 Fabricação das latas de alumínio no Brasil

As latas de alumínio para bebidas completaram no ano de 2020, três décadas de produção em nosso país. Sendo considerado o caso de maior sucesso, pois está associado à reciclagem de alumínio, setor no qual o Brasil mantém posição de destaque mundial desde os anos 1990. Diante deste fato, esse produto se consolida como uma embalagem prática, moderna, segura, eficiente e sustentável (REVISTA DA LATA, 2018). A *Ball Corporation* quer utilizar 100 % de energia elétrica renovável até 2030 e zerar emissões de carbono até 2050 (REVISTA ALUMÍNIO, 2021).

Caldas (2019), informa que normalmente uma lata de alumínio é produzida a partir de três ligas principais: o corpo e a base, formados pela liga 3004 que representa

em torno de 75 % da massa da lata, essa liga 3004 possui boa conformabilidade, boa resistência a corrosão e resistência mecânica moderada. Para Ferreira e Rodrigues (2018), o corpo tem espessura de 0,0001 polegadas e é mais encorpada na parte inferior. E resiste a uma pressão de 90 lbf/in², podendo aguentar 250 libras de peso. A base apresenta forma convexa para suportar a pressão na base interna.

A tampa é composta pela liga 5182 e corresponde a 23 % da massa. Sua liga é composta por menos manganês e mais magnésio do que o corpo, isso a torna mais forte. A fim de economia, a tampa tem diâmetro menor que o corpo (SOUZA, 2017). Por último temos o anel de abertura da lata formado pela liga 5042 corresponde a 2 % da massa da lata, essas ligas da série 5XXX apresentam ductilidade no estado recozido, por causa da existência do Mg na liga, ela endurece rapidamente quando submetida a trabalho a frio, apresenta elevada resistência a corrosão. Porém, com o aumento dos teores de Mg, a liga se torna mais frágil, favorecendo desta forma a abertura da lata (CALDAS, 2019).

As latas de alumínio para bebidas são produzidas utilizando chapas laminadas de 0,2 mm de espessura. Para a produção do corpo da lata, a chapa é conduzida até a máquina de prensagem (*bodymaker*), o corte será feito no formato de discos. Seguidamente, serão produzidos os copos rasos a partir da estampagem. Estes copos rasos são transferidos para outra máquina que vai proporcionar o estiramento gradual até obter o formato final da lata, é preciso fazer os cortes das bordas para que possam adquirir o mesmo comprimento (SOUZA, 2017).

Ainda de acordo com Souza (2017), os copos de alumínio já nivelados seguem para lavagem, esterilização e secagem. Logo após, as latas estão adequadas para receber a impressão do rótulo, onde será aplicada uma camada externa de verniz, garantindo o brilho e a fixação da pintura. Na etapa seguinte, as latas são colocadas em fornos para secagem e cura do verniz externo. Uma camada de verniz será aplicada também na parte interna, para que o líquido não entre em contato com o metal, impedindo a oxidação da lata e consequentemente a alteração do sabor da bebida. As latas vão novamente ao forno para secagem e cura do verniz interno.

O corpo da lata de alumínio rotulado passará pelo processo de formação de perfil da boca para que a tampa seja devidamente encaixada e recravada após envasamento. As tampas básicas são processadas mediante a utilização de uma prensa, onde os discos são cortados e em seguida moldados. A reborda da tampa é moldado garantindo a recravação de fixação adequada, a aplicação de uma camada

de selante impedirá qualquer vazamento. A tampa básica é submetida a formação de relevo, do rebite para a sustentação do anel e das linhas para abertura por um processo de conformação rigoroso (SOUZA, 2017).

O controle de qualidade é rigorosamente realizado durante todo o processo de fabricação. Porém, após passarem por todas as etapas as latas serão submetidas novamente a outras análises de controle de qualidade para detecção de mínimos defeitos (SOUZA; LIMA, 2015). As latas de alumínio podem ser visualizadas na Figura 10.

Figura 10 - Latas de alumínio.

Fonte: GONTIJO; CRUZ, 2017.

2.4 Ligas de alumínio

De acordo com Dias (2016), o alumínio em seu estado puro tem baixa resistência mecânica, não podendo ser empregado diretamente em situações em que a resistência à deformação e a fratura são indispensáveis. Desse modo, o alumínio precisa combinar-se com elementos de liga, que na sua maioria são metais de engenharia. Assim, uma vez adicionados ao alumínio em pequenas quantidades, tem como consequência dessas combinações propriedades tecnológicas definidas, o que conferem ao alumínio uma extrema versatilidade.

Os principais elementos de ligas incluem cobre (Cu), magnésio (Mg), silício (Si), manganês (Mn) e zinco (Zn). Essas ligas oferecem à indústria uma gama de

propriedades como, por exemplo, resistência mecânica, resistência à corrosão, usinabilidade, condutibilidade elétrica e térmica, formabilidade, ductibilidade, etc. Garantindo dessa forma, produtos de alta qualidade empregados na engenharia, arquitetura e indústrias em geral (DINIZ, 2018).

De acordo com Callister e Rethwisch (2021) dependendo do processo de fabricação, as ligas de alumínio são classificadas como ligas forjadas ou dúcteis e ligas fundidas. De acordo com a *Aluminum Association*, as composições de elementos de liga para ambos os tipos (forjadas e fundidas), são determinadas por um número com quatro dígitos (XXXX), que apontam as principais impurezas presentes. No caso das ligas fundidas, é colocado entre os dois últimos dígitos um ponto decimal (XXX.X). Logo após esses dígitos, e colocado um hífen e a identificação de tratamento, utilizando uma letra ou um número com um a três dígitos, indicando o tratamento mecânico e/ou térmico a qual a liga foi exposta.

As ligas trabalháveis (forjadas) são dúcteis e podem ser submetidas a processos de conformação mecânica (a quente ou a frio), como por exemplo: laminação, extrusão, trefilação e forjamento. Enquanto as ligas fundidas possuem baixo alongamento e, são responsáveis pela produção de produtos com áreas ocas, geometria e contornos complexos (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Conforme mencionado no trabalho de Calçada (2018), tanto as ligas forjadas como também as fundidas são subdivididas em: ligas tratáveis termicamente e não tratáveis termicamente. Além do mais, as ligas tratáveis termicamente compreendem as famílias 2XXX, 6XXX, 7XXX e a maioria da família 8XXX, que são geralmente tratadas com solubilização e resfriamento brusco, seguido de precipitação resultante do tratamento de envelhecimento. Favorecendo assim, o aumento na resistência mecânica, como também, alterando sua microestrutura através da distribuição de energia térmica e resfriamento rápido. Desse modo, a representação utilizada para essas ligas tratáveis termicamente é indicada pela letra **“T”**, seguida de um número que pode variar de 1 a 10, revelando a série de tratamentos aos quais a liga foi submetida.

No caso das ligas não tratáveis termicamente o aumento da dureza se dá mediante a aplicação de um trabalho mecânico a frio, tendo como resultado o encruamento. A força inicial dessas ligas, em geral das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx, resulta do efeito de endurecimento dos seus elementos de liga. Assim, o complemento adicional pode ser criado por deformação a frio, que induz o endurecimento de tensão

(DINIZ, 2018). A nomenclatura das ligas de alumínio pode ser visualizada na Tabela 1.

Tabela 1 - Nomenclatura das ligas de alumínio.

Ligas Trabalhadas	Principal Elemento de Liga	Ligas Fundidas	Principal Elemento de Liga
Série 1xxx	Al	Série 1xx.x	Al
Série 2xxx	Al-Cu	Série 2xx.x	Al-Cu
Série 3xxx	Al-Mn	Série 3xx.x	Al-Mn-Mg
Série 4xxx	Al-Si	Série 4xx.x	Al-Si
Série 5xxx	Al-Mg	Série 5xx.x	Al-Mg
Série 6xxx	Al-Mg-Si	Série 6xx.x	Al-Mg-Si
Série 7xxx	Al-Zn	Série 7xx.x	Al-Zn
Série 8xxx	Al-Li-Sn-Fe	Série 8xx.x	Al-Li-Sn-Fe

Fonte: HANDBOOK, 1996.

2.4.1 Ligas Al-Mn-Mg (3XXX ou 3XX.X)

As ligas que incluem o manganês como elemento principal, apresentam as seguintes características: excelente trabalhabilidade, alta conformabilidade, apresenta uma melhora na resistência mecânica de 20 % em média do que as ligas de alumínio do grupo 1XXX, melhora na resistência à corrosão, redução na ductilidade, não pode ser submetida a tratamento térmico, porém, tem alta capacidade de endurecimento por encruamento (CALÇADA, 2018).

Essas ligas são utilizadas na produção de utensílios domésticos, latas para bebidas, tanques de armazenamento, entre outros. A liga de alumínio AA3004, que compõe o corpo e a base da lata, possui alto teor de manganês e magnésio na sua composição, além do ferro, silício, cobre e zinco em porcentagens menores (SOUZA, 2017).

Dessa forma, a adição de manganês ao alumínio comercialmente puro causa endurecimento por solução sólida, além de aumentar o limite de resistência à tração. Entretanto, essas ligas apresentam problemas durante e no decorrer da fusão, podendo surgir a formação de trincas, provavelmente em função da rápida passagem da fase líquida para a sólida. Essas ligas não podem ser submetidas a tratamentos térmicos, mas, são endurecidas por encruamento (trabalho mecânico) (CALDAS, 2019). O encruamento da estrutura metálica ocorre durante a maior parte dos

processos de conformação mecânica, como a laminação, e também é o principal método utilizado para melhorar as propriedades mecânicas de ligas de alumínio que não podem ser tratáveis termicamente (DIAS, 2016).

A liga apresenta como microestrutura de solidificação uma matriz de Al-alfa com estrutura dendrítica de fases intermetálicas nos contornos de grão. Essas fases intermetálicas resultantes dos elementos presentes na liga são: $Al_6(MnFe)$ (ortorrômbico) e $Al_{12}(MnFe)_3Si$ (cúbico) (CALÇADA, 2018).

Vale ressaltar ainda que, a adição dos elementos magnésio, ferro e silício nessas ligas vão contribuir na formação da solução sólida Al-Mn, enquanto o cromo atua como estabilizador de fase (CALDAS, 2019).

Ligas que utilizam magnésio na composição têm suas resistências aumentadas sem reduzir a ductilidade e a resistência à corrosão. A capacidade de fundição dessas ligas é relativamente atraente. Elas não são tratáveis termicamente, mas, podem ser a medida que o teor de magnésio alcance 8 %. Apesar de ser um dos responsáveis pela formação de fases de endurecimento, a fluidez da liga acaba sendo comprometida quanto maior a presença deste elemento (GUIMARÃES; ARRUDA, 2018).

Segundo Dias (2016), o ferro normalmente é considerado uma impureza presente em quase todas as ligas de alumínio, porém em algumas delas atua como importante elemento de liga, contudo, sempre em quantidades inferiores a 1 %. De acordo com Ferreira (2016), a solubilidade do ferro no alumínio no estado sólido é muito baixa apenas de 0,04 % em massa. Durante o processo de solidificação da liga, somente esta pequena quantidade é fixada na matriz de alumínio e todo o excedente formará compostos intermetálicos complexos com o alumínio e outros elementos de liga.

Souza (2017) menciona que, os teores máximos de ferro e silício são de 0,7 % cada, aumentando assim, a resistência da liga sem comprometer a resistência à corrosão. Para Oliveira (2017), o silício por sua vez, quando associado ao magnésio provoca o endurecimento por precipitação, além de elevar a resistência e ductilidade do alumínio.

É válido destacar ainda que, a composição química, processo de fundição e solidificação interferem, diretamente, na formação da estrutura do material que podem promover variações nas propriedades finais (SOUZA, 2017).

2.5 Fundição

O processo de fundição tem por objetivo principal conformar metais e suas ligas que, a partir do estado líquido, é vazado na quantidade exata para preencher um molde cuja forma e medidas correspondem aos da peça a ser fabricada. Além disso, o próprio molde remove calor do metal líquido promovendo sua solidificação e fixando seu formato inicial. Dentre os métodos de conformação de metais, o processo de fundição é considerado o mais simples e econômico para a produção de uma peça, especialmente quando esta é de grande porte e de geometria complexa (SILVA, 2015). A fundição do alumínio pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 - Fundição do alumínio.

Fonte: PORTAL ALUMINIO, 2021.

Além do mais, Santana *et al.*, (2015) menciona que o processo de fundição utiliza molde em areia, molde metálico entre outros, e que o vazamento pode ser por pressão ou por gravidade. O tipo de vazamento mais utilizado é o por gravidade, e o tipo de moldagem mais utilizado é o em areia.

De acordo com Dias (2016), no uso do molde de metal, a obtenção do fundido baseia-se no vazamento do metal líquido no interior do molde, assim sendo, o seu preenchimento ocorre por meio da simples ação da gravidade.

De modo geral, o metal líquido pode ser resultante de diversas ligas metálicas, como as ligas ferrosas (ligas contendo ferro ou carbono), ou ligas não ferrosas (ligas

de cobre, alumínio, zinco e magnésio), conforme apresentem propriedades favoráveis a tal processo, bem como temperatura de fusão e fluidez. Nesse sentido, a temperatura na qual ocorre a transformação do metal líquido para o sólido (L/S), é conhecida como temperatura de fusão. Por outro lado, a capacidade de escoamento de uma substância, com maior ou menor facilidade, é chamada de fluidez (SANTANA *et al.*, 2015).

2.6 Solidificação

Segundo Silva (2015) a solidificação no processo de fundição aparenta ser simples, porém, a transformação do metal do estado líquido para o sólido no interior do molde apresenta um meio ativo e dinâmico. Durante o tempo em que ocorre essa transição, vários fenômenos podem afetar as propriedades do produto final. Então, é fundamental controlar esses fenômenos para não prejudicar o desempenho da peça.

Caldas (2019) cita em seu trabalho que as substâncias apresentam três estados físicos de agregação entre os átomos: sólido, líquido e gasoso. A mudança do estado sólido para o estado líquido, por aquecimento, é chamada de fusão, ocorre em uma única temperatura para elementos puros e para uma mistura de elementos normalmente sucede-se em um determinado intervalo de temperaturas. Em contrapartida, a mudança do estado líquido para o sólido, por resfriamento, é conhecida como solidificação. Nesse processo certa quantidade de calor latente é dissipada pelo material líquido, possibilitando desse modo, a nucleação e o crescimento da fase sólida até a total solidificação da peça. O processo de nucleação e crescimento pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 - Processo de nucleação e crescimento.

Fonte: SILVA, 2015.

Para Silva (2015), a mudança ocorre com o aparecimento de minúsculas partículas da nova fase sólida (núcleos), que crescem até que se complete a transformação (L/S). De acordo com Afonso (2019), o crescimento subsequente dessas partículas no estado sólido, definem a formação da microestrutura em metais e suas ligas, como também, fatores cinéticos, térmicos, químicos e termodinâmicos que, encontram-se intensamente relacionados. Por fim, quando a solidificação do metal estiver concluída, os cristais formados apresentam orientações variadas, reunindo suas interfases para formar os contornos de grãos, que são fronteiras que possuem elevada energia entre diferentes cristais produzidos no metal solidificado.

Diante dessa realidade, a quantidade de núcleos disponíveis na solidificação terá influência direta com a estrutura metálica do grão. Além disso, quando a quantidade de pontos de nucleação for baixa, a solidificação gera uma estrutura grosseira. Por outro lado, sempre que a solidificação apresentar uma maior quantidade de pontos de nucleação será formado uma estrutura com grão mais refinados (ALMADA, 2014).

2.6.1 Formação da macroestrutura

Torna-se importante ressaltar que chamamos de macroestruturas, as formações morfológicas estruturais observadas e avaliadas a olho nu, ou com auxílio do aumento óptico em até 10 vezes. A estrutura final de solidificação depende das condições de resfriamento e da composição da liga. Dessa forma, as fases decorrentes das transformações dependem da nucleação, do crescimento ou da

combinação entre ambas. Acredita-se que parâmetros estruturais são influenciados rigorosamente pelo comportamento térmico do sistema metal/molde, tendo como resultado uma estreita ligação entre variáveis térmicas do processo e as estruturas provenientes da solidificação (LIMA, 2017).

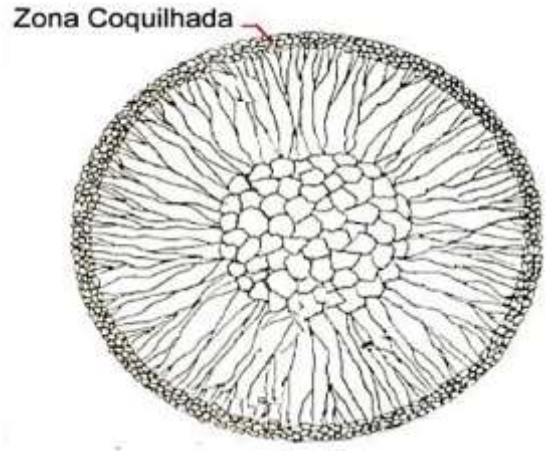
De acordo com o mesmo autor, o processo de solidificação tem a finalidade de promover a ordenação dos átomos com uma simetria espacial contínua e definida. Nesse sentido, o metal no estado líquido não possui um arranjo atômico regular, sua estrutura é amorfa. Uma vez que os átomos apresentam um nível elevado de energia, podendo ser determinados pela energia potencial e cinética. Assim, a primeira energia é referente à distância interatômica e a segunda é resultante da agitação atômica.

Em certo momento, a extração da carga térmica pode ser obrigatória ou apenas uma dissipação natural, ocorrendo devido a geometria e constituintes do molde que contém o metal líquido. De modo geral, o produto fundido destaca-se por apresentar três zonas estruturais classificadas macroscopicamente como zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial (DANTAS, 2014).

2.6.1.1 Zona Coquilhada

Estima-se que o primeiro contato do metal líquido com as paredes do molde frio no vazamento, resulta consequentemente na formação de uma camada de grãos cristalinos, de pequenas dimensões, com orientações aleatórias, formando assim a zona coquilhada. Em razão da maior velocidade de crescimento dos núcleos produzidos pelo resfriamento rápido no metal líquido, o crescimento dos demais grãos coquilhados será bloqueado. Desta forma, os grãos cristalinos formados em seguida, exibem direções cristalográficas fortemente orientadas e maiores dimensões do que os da zona coquilhada (LIMA, 2017). A representação esquemática da zona coquilhada pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 - Representação esquemática da zona coquilhada**.**

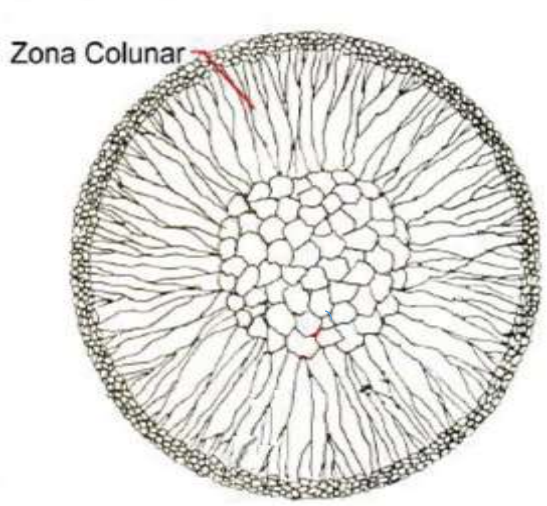


Fonte: Adaptado de PRATES E DAVIES, 1978.

2.6.1.2 Zona Colunar

Após o vazamento do metal no molde, o gradiente de temperatura nas paredes do recipiente diminui, dando origem a uma região intermediária de grãos alongados e alinhados paralelamente na direção do fluxo de calor, chamados de grãos colunares. Assim, cada cristal colunar contém vários braços de dendrita primária e, à medida que o diâmetro desses grãos aumenta aparecem mais braços primários (DIAS, 2016). A representação esquemática da zona colunar pode ser visualizada na Figura 14.

Figura 14 - Representação esquemática da zona colunar.

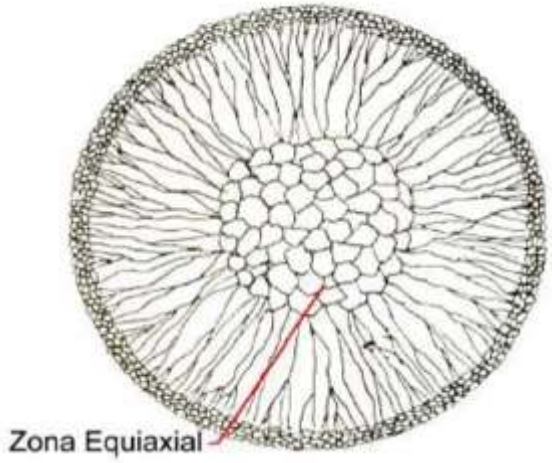


Fonte: Adaptado de PRATES E DAVIES, 1978.

2.6.1.3 Zona Equiaxial

Refere-se a uma região central de grãos equiaxiais, sem orientação preferencial e de tamanho maior aos encontrados na periferia do molde. Estes pequenos grãos nucleados a partir da parede do molde, rapidamente começam a se desenvolver em direções cristalográficas preferenciais, até o momento que um crescimento competitivo entre os mesmos permite seu desenvolvimento em direções paralelas ao fluxo de calor (FARIAS, 2015). A representação esquemática da zona equiaxial pode ser visualizada na Figura 15.

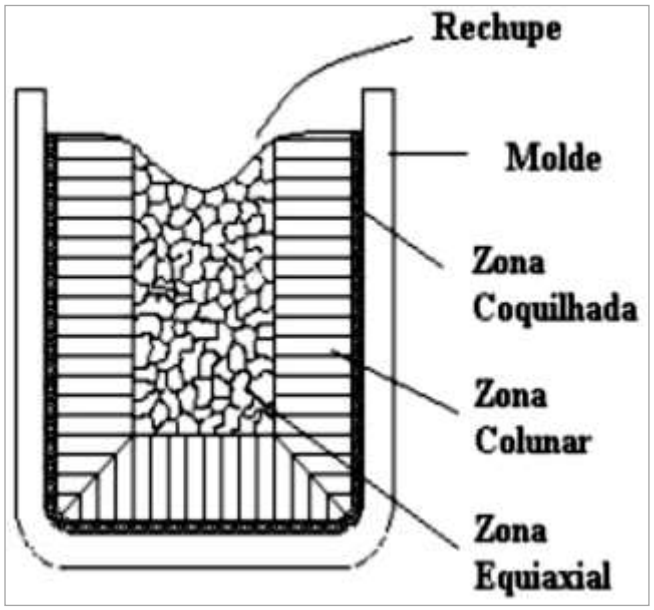
Figura 15 - Representação esquemática da zona equiaxial.



Fonte: Adaptado de PRATES E DAVIES, 1978.

A região existente entre a ponta da dendrita é também o local onde o líquido remanescente se solidifica, sendo definido como região bifásica. A referida região está relacionada ao gradiente de temperatura e à evolução do resfriamento em condições fora do equilíbrio (MAGALHÃES, 2019). A representação esquemática das três zonas da macroestrutura de solidificação visualizadas na Figura 16.

Figura 16 - Representação esquemática das três zonas da macroestrutura de solidificação.



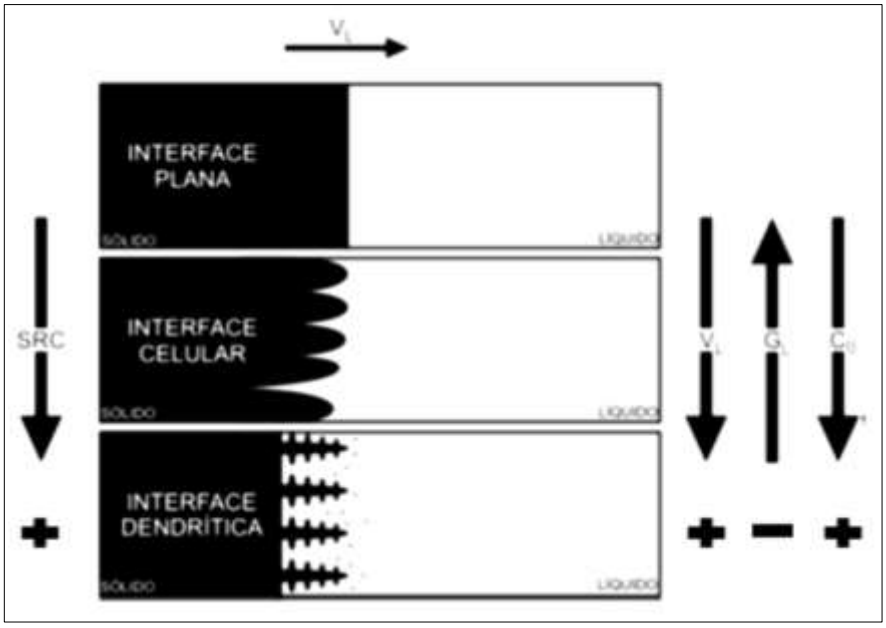
Fonte: PESSOA, 2017.

2.6.2 Formação da microestrutura

De acordo com Farias (2015) durante o processo de solidificação, as microestruturas presentes em uma liga metálica estão extremamente associadas com a transformação da interface metal/molde. Em virtude de alterações nos parâmetros térmicos do sistema metal/molde durante a solidificação, torna-se possível passar da forma plana dos metais puros para estruturas celulares e dendríticas.

A instabilidade da interface sólido/líquido é provocada pela distribuição não uniforme de concentrações no líquido à frente desta interface, originada pela termodinâmica do processo que impõe a segregação do soluto ou solvente à frente da mesma. Promovendo com isso, o aparecimento de um fenômeno favorável à nucleação e responsável por sua gradativa instabilidade, conhecido como super-resfriamento constitucional (SRC). Portanto, de acordo com o valor do SRC, irão surgir diferentes morfologias, chamadas de: planar, celular e dendrítica (COUTINHO, 2018). A representação esquemática da formação das microestruturas de solidificação: SRC: Super-resfriamento; VL: Velocidade da Isoterma *liquidus*; GL: Gradiente Térmico; CO: Concentração de Soluto podem ser visualizados na Figura 17.

Figura 17 - Representação esquemática da formação das microestruturas de solidificação: SRC: Super-resfriamento; VL: Velocidade da Isoterma *liquidus*; GL: Gradiente Térmico; CO: Concentração de Soluto.

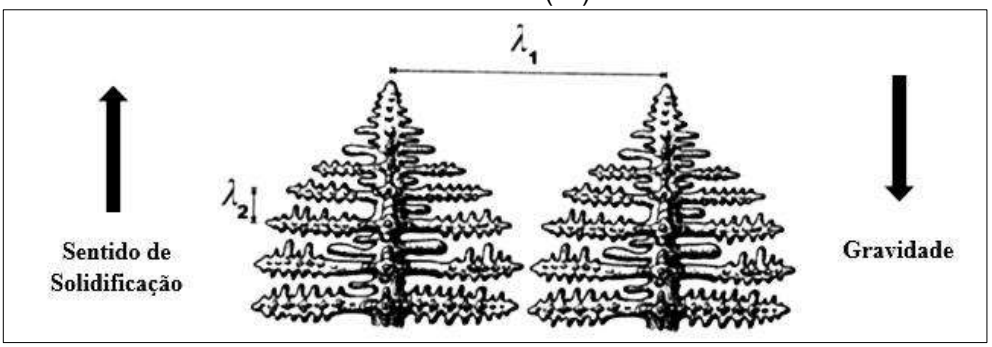


Fonte: COUTINHO, 2018.

A microestrutura dendrítica é tipicamente a mais vista em ligas fundidas. Os ramos primários iniciam seu crescimento a partir dos eixos principais com direção preferencial da estrutura cristalina, formados por metais (CFC) como o alumínio (GONTIJO; CRUZ, 2017).

Estruturas completamente dendríticas exibem parâmetros estruturais chamados de espaçamentos dendríticos primários (λ1) e secundários (λ2). Assim, devido a rejeição de soluto, surgirão os braços dendríticos secundários em direções perpendiculares aos ramos primários (COUTINHO, 2018). A representação de uma microestrutura dendrítica: espaçamentos primários (λ1) e secundários (λ2) podem ser visualizados na Figura 18.

Figura 18 - Representação de uma microestrutura dendrítica: espaçamentos primários (λ1) e secundários (λ2).



Fonte: CHOUDHARY et al., 2017**.**

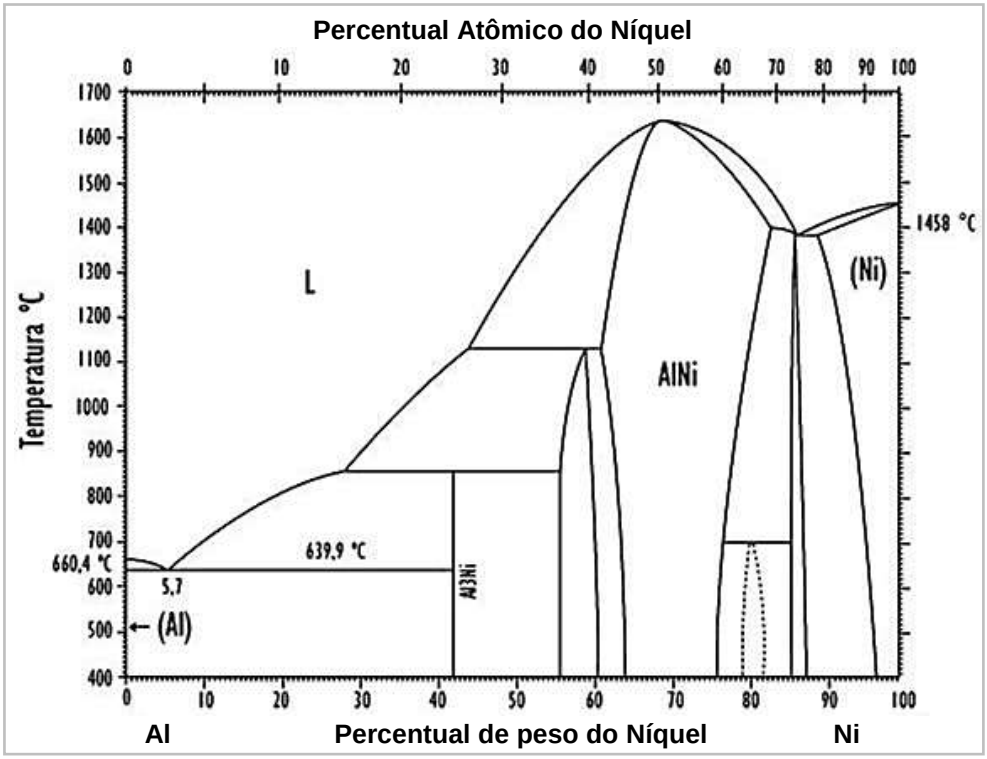
2.7 Elemento de liga

2.7.1 Níquel (Ni)

O Níquel é um elemento de liga pouco solúvel no alumínio, capaz de formar intermetálicos como Al_3Ni, Al_3Ni_2, AlNi, Al_3Ni_5 e $AlNi_3$, produzindo assim, efeitos significativos nas propriedades mecânicas em altas temperaturas, mesmo presente em pequenas quantidades. Vale ressaltar ainda que, os intermetálicos formados nas ligas de Al-Ni apresentam elevada dureza e por isso, tendem a sofrer fraturas frágeis. Suas estruturas cristalinas ordenadas e de longo alcance causam distorções na matriz da liga, promovendo mudanças nas propriedades mecânicas. A composição química da liga é um fator de fundamental importância para determinar os intermetálicos e sua dispersão (CARVALHO, 2016).

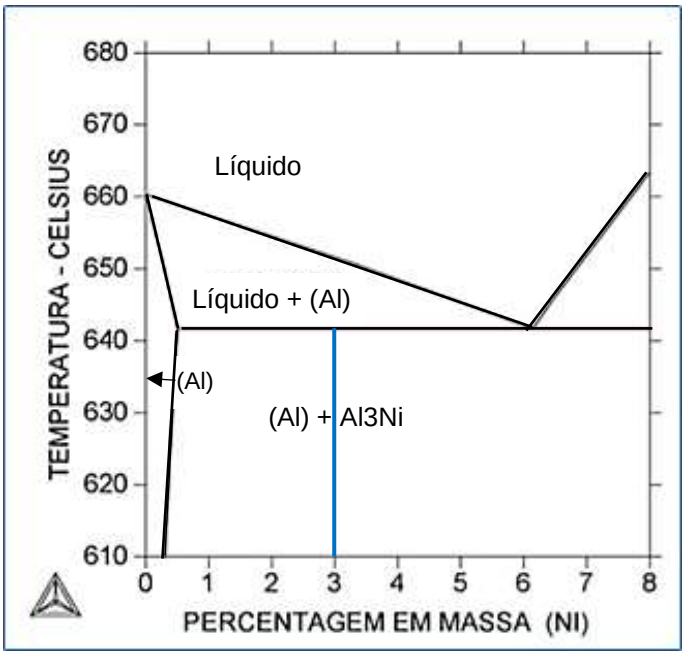
Segundo Prazeres (2016), a adição de teores de Ni abaixo de 0,05 %, vai garantir que a liga seja tratada termicamente. A Figura 19 apresenta o diagrama binário do sistema Al-Ni e a Figura 20 especifica a parte rica em (Al) + Al_3Ni.

Figura 19 - Diagrama binário do sistema Al-Ni.



Fonte: Adaptado de ASM *INTERNATIONAL* Vol 9, 2004.

Figura 20 - Detalhe da parte rica em (Al) + Al_3Ni do diagrama Al-Ni.



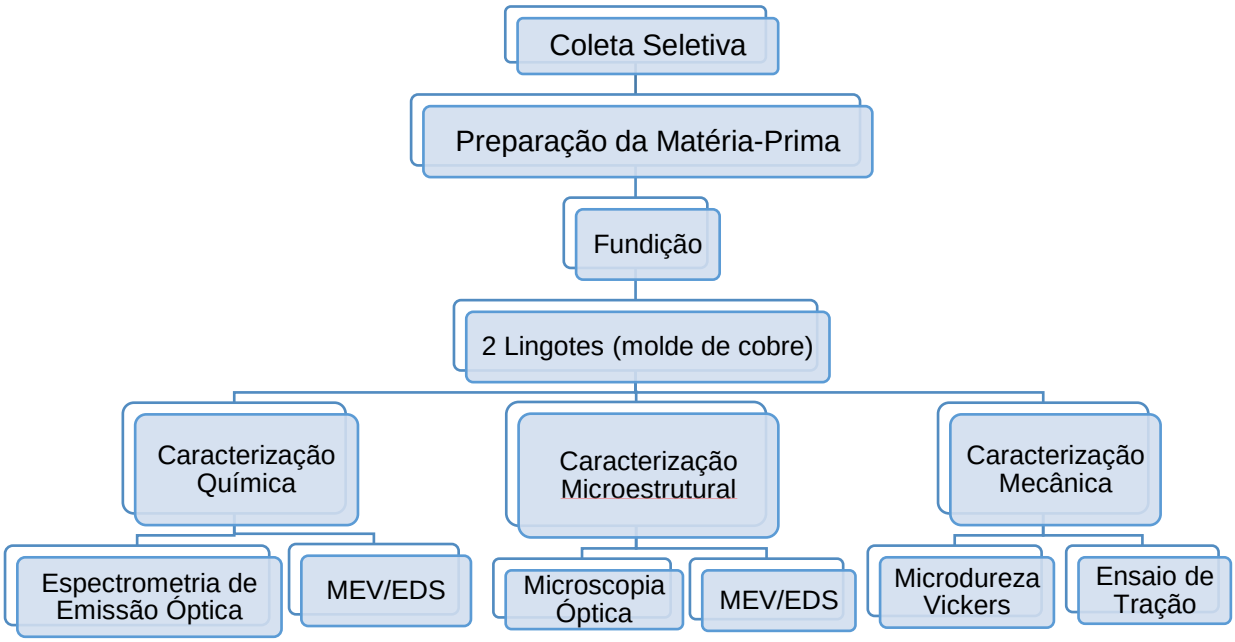
Fonte: Adaptado de FRANÇA, 2020.

Especialmente no caso das ligas Al-Ni dentro da faixa de composições hipoeutéticas, a microestrutura de solidificação é constituída de uma matriz dendrítica de fase α rica em alumínio, com uma mistura eutética na região interdendrítica formada por α, e o composto intermetálico Al_3Ni. Essa mistura eutética cresce de forma cooperativa no decorrer da solidificação, permanecendo localizada entre os braços dendríticos. Assim, o arranjo interdendrítico das partículas duras Al_3Ni são estáveis em temperaturas abaixo de 500 °C, proporcionando um reforço para a matriz dendrítica, além de conferir como resultado maior resistência mecânica ao material (PRAZERES, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Será apresentado neste capítulo, a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. Ressaltando inicialmente, que a maioria das atividades foram realizadas no GPEMAT, Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) da UFPA no Campus Belém. O fluxograma com as etapas realizadas nesta pesquisa pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa.



Fonte: Autora, 2023.

3.1 Materiais

3.1.1 Coleta seletiva

A coleta seletiva do material (latas de alumínio para bebidas) foi realizada no município de Ananindeua do estado do Pará, no Conjunto Residencial Icuí Guajará, no período das festas juninas de 2019. Nesse período foram coletadas 211 latinhas de alumínio para bebidas. No presente trabalho, foram utilizados os corpos e as bases das latas de alumínio para bebidas, liga AA3004.

3.1.2 Preparação da matéria-prima

As latas foram submetidas à lavagem e secagem ao sol conforme apresentada na Figura 22 (a). Posteriormente, foi retirada a tinta das latas com o auxílio de um solvente (tíner) e esponjas de aço grossas e finas, Figura 22 (b).

Logo após, foram novamente lavadas com detergente neutro e levadas para secagem ao sol. Para a obtenção do primeiro lingote foram utilizados apenas os corpos das latas de alumínio, que foram cortados manualmente em pedaços de aproximadamente 2 cm x 1 cm, Figura 22 (c).

Na etapa seguinte, ocorreu a pesagem do material já cortado no LABEM da UFPA no Campus Belém, o resultado obtido foi 906,03 g, Figura 22 (d).

Figura 22 - (a) Material coletado, (b) remoção da tinta, (c) corte dos corpos da lata e (d) material cortado e pesado.

Fonte: Autora, 2023.

As bases das latas de alumínio foram utilizadas para a produção do segundo lingote com a adição de 3 % de Níquel, e estas foram prensadas utilizando uma prensa manual tipo Morsa. Em seguida, com o auxílio de uma balança analítica, pesou-se o material cortado no LABEM da UFPA, o resultado foi 1.046 kg. A Figura 23 apresenta as bases das latas de alumínio prensadas.

Figura 23 - Bases das latas de alumínio prensadas.

Fonte: Autora, 2023.

3.2 Métodos

3.2.1 Fundição

A etapa de fundição dos materiais foi realizada no LABEM, localizado na UFPA, Campus Belém. Foram realizadas duas fundições: primeiramente realizou-se a fundição dos corpos das latinhas de alumínio e em seguida, as bases das latinhas de alumínio com a adição de 3 % de Níquel.

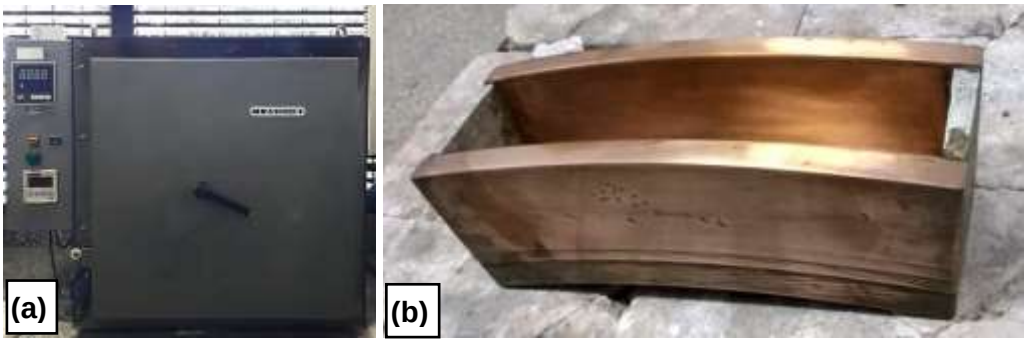
O cadinho de carbeto de silício que foi utilizado para as fundições, foi higienizado com uma escova de aço e uma lixa 80 *mesh*. Em seguida, o mesmo foi revestido internamente com uma camada de alumina, com o objetivo de impedir a aderência do material nas paredes do cadinho, facilitando assim, a retirada do metal fundido. Então, o cadinho foi colocado na estufa em uma temperatura de 200 ºC por aproximadamente 10 minutos para uma secagem prévia. O cadinho pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 24 - Cadinho de carbeto de silício preparado para fundição.

Fonte: Autora, 2023.

A fundição dos dois tipos de materiais ocorreu em um forno tipo mufla da marca Brasimet, Figura 25 (a), e a rampa de aquecimento foi realizada no período de 3 horas e 30 minutos até atingir a temperatura máxima de 900 ºC. As duas fundições foram vazadas em um molde de cobre, que corresponde ao segmento da Roda Properzi, Figura 25 (b), fornecido pelo LABEM.

Figura 25 - (a) Forno tipo mufla utilizado e (b) molde de cobre utilizado no vazamento dos lingotes.

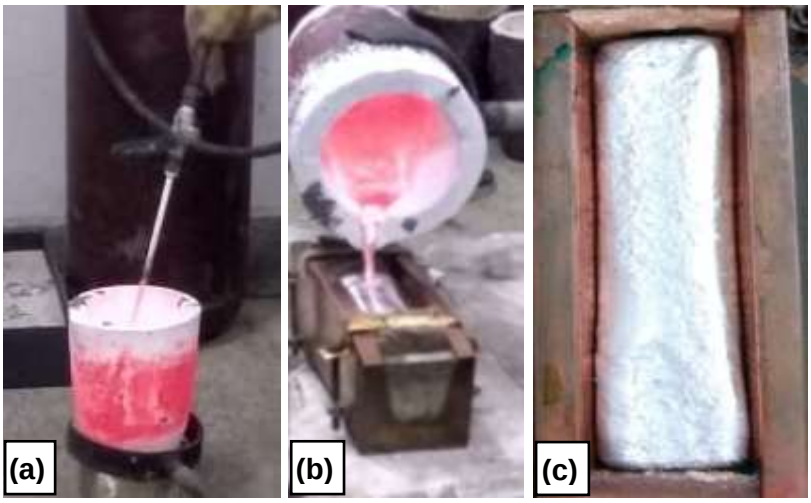


Fonte: Autora, 2023.

Após alcançar a temperatura adequada para a fundição, os materiais foram depositados no cadinho previamente aquecido. De início, o material foi depositado no interior do cadinho até seu preenchimento e em seguida inserido ao forno. O cadinho foi retirado do forno a cada 40 minutos para ir adicionando mais material, como também, para facilitar a homogeneização do material com um bastão de aço inox revestido com alumina, e retorna ao forno para dar continuidade a fundição.

Após a fundição completa do material, ocorreu a injeção do gás argônio como objetivo de remover gases e impurezas de baixa densidade, que são formados através de uma camada de escória sobre a superfície do banho, do qual foi removida com a espátula de aço. A Figura 26 apresenta as etapas de fundição e solidificação do lingote 1 com 12 cm de comprimento, onde o mesmo foi resfriado em temperatura ambiente.

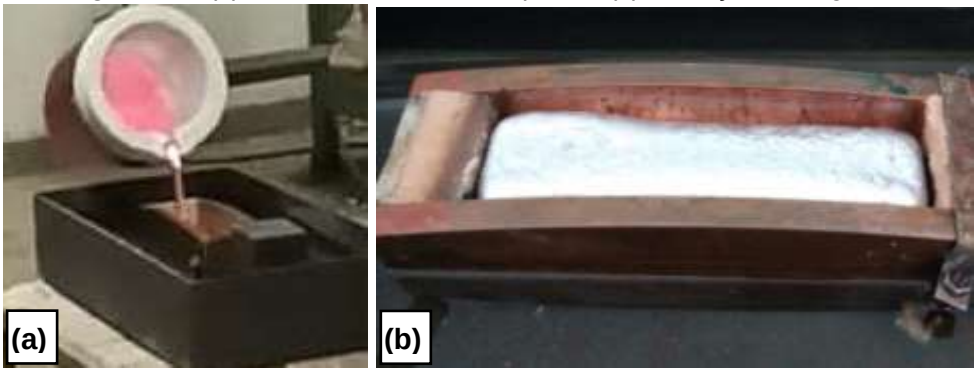
Figura 26 - (a) Injeção de argônio, (b) vazamento do metal líquido e (c) obtenção do lingote 1.



Fonte: Autora, 2023.

Para a fundição do 2° lingote, seguiu-se as etapas semelhantes ao do lingote 1, onde o mesmo também foi vazado no molde de cobre, mas este foi submetido a um resfriamento por imersão em água, Figura 27 (a), assim como ao tratamento térmico de têmpera. Este resfriamento rápido, permite que haja uma uniformidade na solidificação e redução na formação de porosidades e defeitos internos no material. A Figura 27 (b) mostra a obtenção do lingote 2 com 14 cm de comprimento.

Figura 27 - (a) Vazamento do metal líquido e (b) obtenção do lingote 2.



Fonte: Autora, 2023.

3.2.2 Obtenção do corpo de prova

Os dois lingotes obtidos foram cortados transversalmente, utilizando uma cortadora CMR-60, cedida pelo laboratório do GPEMAT. Possibilitando dessa forma, cortes mais precisos, uma vez que, a mesma dispõe de um fino disco abrasivo e uma

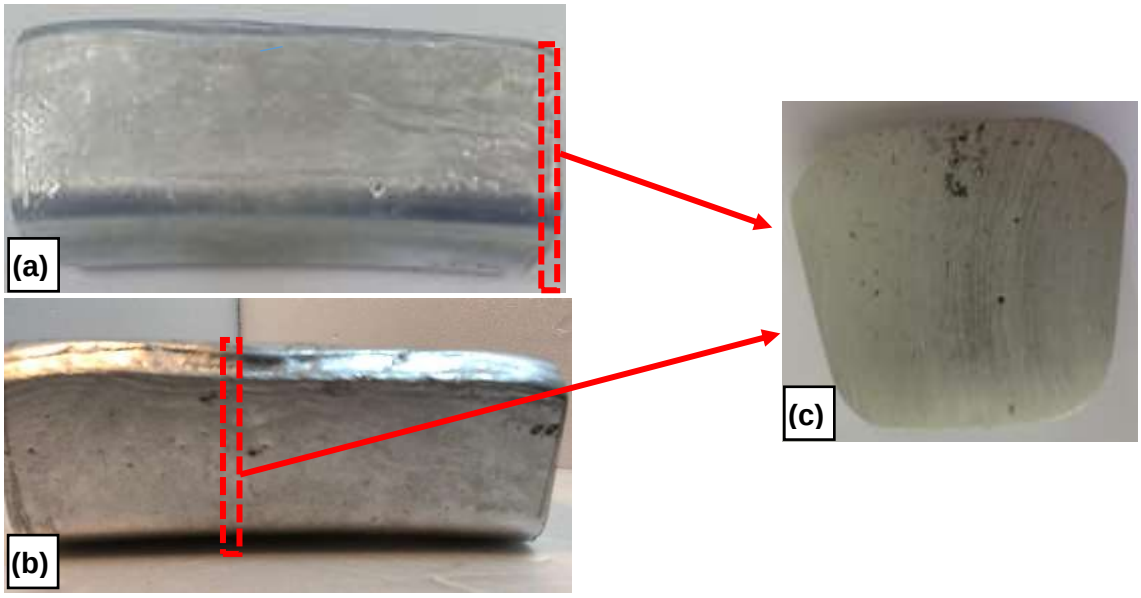
bomba d'água que evita alterações por calor na amostra. A imagem da cortadora CMR-60 pode ser visualizada na Figura 28.

Figura 28 - Cortadora CMR-60.

Fonte: Autora, 2023.

Para a retirada das seis amostras foram feitos cortes transversais nos dois lingotes. Três amostras foram seccionadas do início do lingote 1, Figura 29 (a). E as outras três amostras, foram seccionadas da parte do meio do lingote 2, Figura 29 (b).

Figura 29 - (a) Lingote 1(corpos das latas), (b) lingote 2 (bases das latas + Ni) e (c) modelo de corte das amostras.



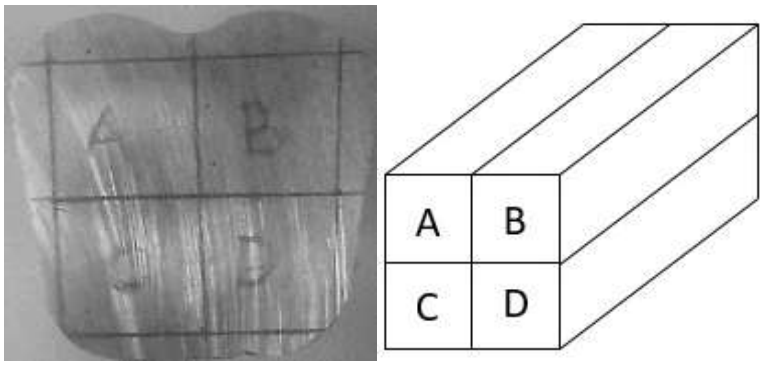
Fonte: Autora, 2023.

As seis amostras cortadas transversalmente foram utilizadas da seguinte forma:

- 1ª amostra de cada lingote para análise química por espectrometria de emissão ótica (EEO);
- 2ª amostra de cada lingote para análise microestrutural através do microscópio ótico e MEV/EDS;
- 3ª amostra de cada lingote para o ensaio de microdureza.

Para o ensaio de tração as amostras foram cortadas longitudinalmente seguindo as marcações: A, B, C e D, conforme o desenho esquemático na Figura 30.

Figura 30 - Desenho esquemático do corte longitudinal.



Fonte: Autora, 2023.

3.3 Caracterização das amostras

3.3.1 Caracterização química

3.3.1.1 Espectrometria de emissão óptica (EEO)

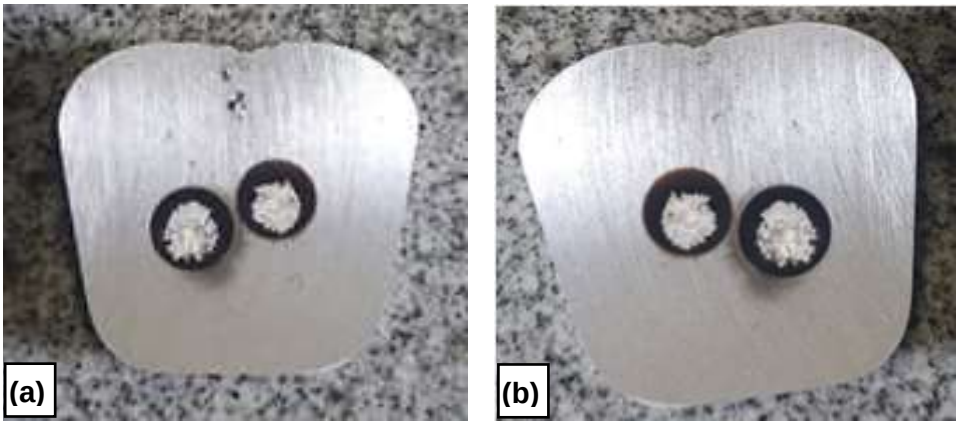
A análise química por EEO é um processo que consiste em analisar e identificar com precisão quais são os elementos químicos presentes em um determinado material. Os resultados são obtidos a partir da média dos pontos analisados em cada amostra (MAGALHÃES, 2020). Para a realização das análises foi utilizado o espectrômetro de modelo *Foundry Master Xpert*, Figura 31 no laboratório LCAM.

Figura 31 - Espectrômetro óptico

Fonte: Autora, 2023.

As amostras utilizadas para a caracterização química podem ser visualizadas na Figuras 32.

Figura 32 - (a) amostra do lingote 1 e (b) amostra do lingote 2.



Fonte: Autora, 2023.

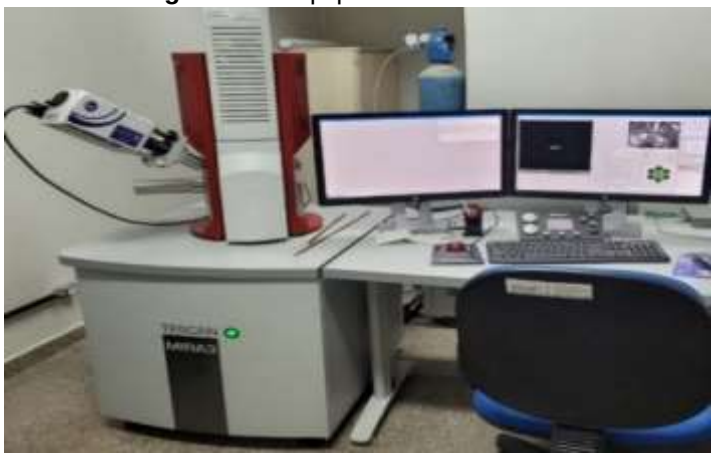
3.3.1.2 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia MEV/EDS.

O MEV também possibilita uma combinação de análise microestrutural com uma microanálise química (MEV/EDS). Trata-se de uma microanálise qualitativa e semiquantitativa (pontual) dos elementos de liga presentes na amostra, esses fatores corroboram para a ampla utilização desta técnica. Os resultados são obtidos da média dos pontos analisados em cada amostra (BRAGA, 2015).

Para a realização desta microanálise foi utilizado um microscópio eletrônico modelo TESCAN MIRA3 acoplado com sistema EDS, realizado no Centro de

Pesquisa Museu Emílio Goeld A Figura 33 mostra o equipamento MEV/EDS utilizado na microanálise química pontual.

Figura 33 - Equipamento MEV/EDS.



Fonte: Autora, 2023.

3.3.2 Caracterização microestrutural

Para a realização da análise microestrutural, a preparação das duas amostras ocorreu pelo processo metalográfico, onde foram utilizadas lixas d´água com as seguintes granulometrias 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*, em uma politriz elétrica para lixar e posteriormente, polir as amostras. Para o polimento, utilizou-se a alumina com 1, 0,5 e 0,3 µm. A Figura 34 apresenta a politriz elétrica utilizada para lixar e polir as amostras.

Figura 34 - Politriz elétrica.

Fonte: Autora, 2023.

O ataque químico para revelar a estrutura foi realizado com o reagente *Keller* (2 mL HF + 3 mL HCl + 5 mL HNO_3 + 190 mL H_2O) em imersão por 20 segundos. Após o ataque químico, as superfícies das amostras foram devidamente lavadas em água corrente, enxaguadas com álcool etílico e secadas com um secador de ar quente.

3.3.2.1 Microscopia óptica (MO)

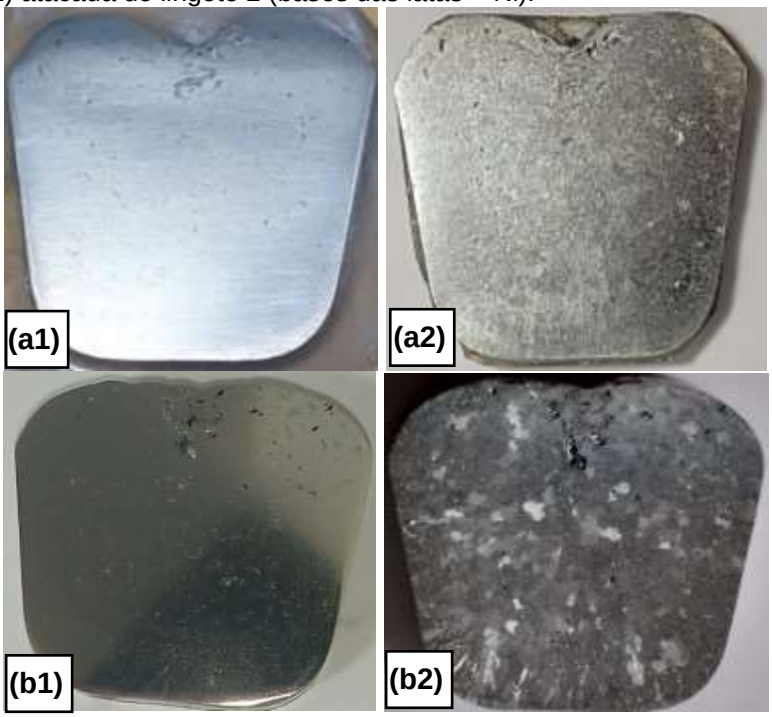
As amostras foram analisadas via microscopia óptica com luz polarizada, no. laboratório do GPEMAT. Para a aquisição e captura de imagens, foi utilizado um microscópio óptico do fabricante *Leica* modelo DMR, Figura 35.

Figura 35 - Microscópio óptico

Fonte: Autora, 2023.

As duas amostras que foram lixadas, polidas e atacadas anteriormente, podem ser visualizadas na Figura 36 (a1) e (a2) com a amostra do lingote 1 (corpos das latas) e a Figura 36 (b1) e (b2) com a amostra do lingote 2 (bases das latas + Ni).

Figura 36 - (a1) amostra lixada, polida e (a2) atacada do lingote 1 (corpos das latas); (b1) amostra lixada, polida e (b2) atacada do lingote 2 (bases das latas + Ni).



Fonte: Autora, 2023.

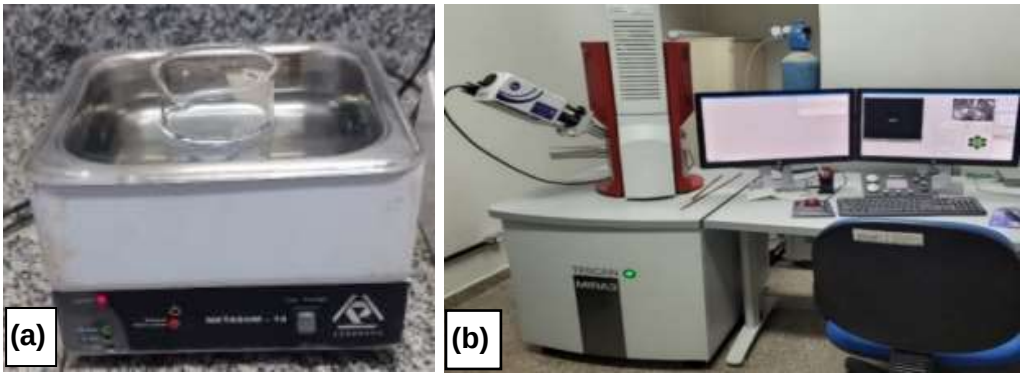
3.3.2.2 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (MEV/EDS)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura, é uma das análises de maior versatilidade, utilizada no estudo e observação da microestrutura de materiais sólidos. A mesma tem por objetivo examinar a morfologia e fases presentes (BRAGA, 2015).

As amostras utilizadas anteriormente na microscopia óptica, foram seccionadas em 4 partes, porém apenas 1 parte de cada amostra foi utilizada para a análise por (MEV/EDS). Após a preparação das duas amostras pelo processo metalográfico, as mesmas foram submetidas a uma cuba ultrassônica METASOM – 14, Figura 37 (a), por 10 minutos para a remoção de qualquer resquício de contaminação.

Para a realização deste ensaio foi utilizado um microscópio eletrônico modelo TESCAN MIRA3 acoplado com sistema EDS, realizado no Centro de Pesquisa Museu Emílio Goeld, Figura 37 (b).

Figura 37 - (a) Cuba ultrassônica e (b) Equipamento MEV/EDS.



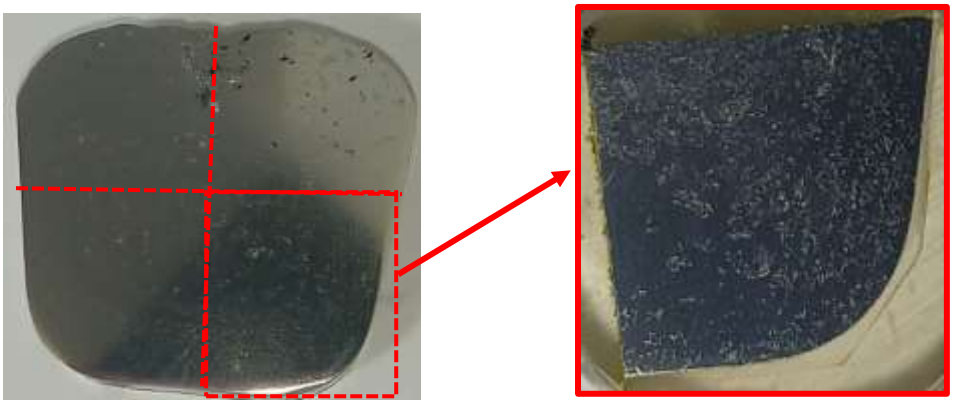
Fonte: Autora, 2023.

Na Figura 38 pode ser visualizada a amostra do lingote 1(corpos das latas) e na Figura 39 a amostra do lingote 2 (bases das latas + Ni).

Figura 38 - Amostra do lingote 1.

Fonte: Autora, 2023.

Figura 39 - Amostra do lingote 2.



Fonte: Autora, 2023.

3.3.3 Caracterização Mecânica

3.3.3.1 Microdureza Vickers (HV)

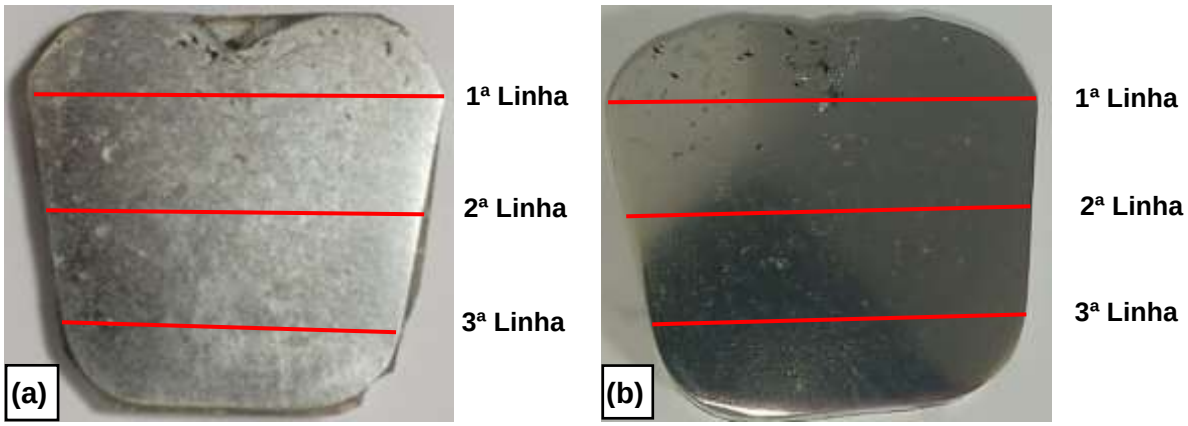
A realização do ensaio de microdureza seguiu a norma ASTM E384 (2011), realizado no Laboratório GPEMAT-UFPA. Utilizou-se um microdurômetro modelo HV – 1000B, Figura 40, com endentador de diamante em formato piramidal, um microscópio acoplado e um monitor com software para o cálculo do valor da microdureza HV.

Figura 40 - Microdurômetro HV-1000B.

Fonte: Autora, 2023.

Na realização dos ensaios, a carga aplicada para o endentador marcar a superfície das duas amostras foi de 100 gf com o tempo de 10 segundos. Foram estipuladas esquematicamente três linhas em cada amostra, com dez endentações em cada linha e com uma distância de 1µm de um ponto para o outro, totalizando assim, trinta endentações. Na Figura 41 (a) pode-se visualizar a amostra do lingote 1 e na Figura 41 (b) a amostra do lingote 2 com as suas respectivas marcações.

Figura 41 - (a) Imagem esquemática da amostra do lingote 1 e (b) do lingote 2 com as suas respectivas marcações.



Fonte: Autora, 2023.

3.3.3.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração é padronizado por normas técnicas, entre elas a ABNT NBR-6152 e a ASTM E 8M, ambas para materiais metálicos. Este método pode ser utilizado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais de grande importância em projetos. Os corpos de provas são submetidos a cargas de tração acrescida gradativamente de maneira uniaxial ao longo do eixo de um corpo de prova (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

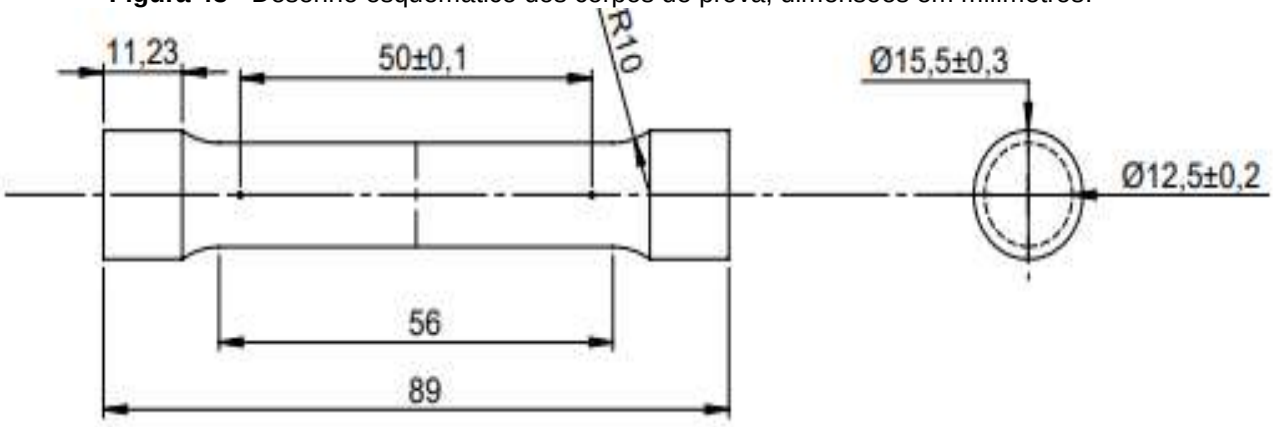
Foram retirados quatro corpos de provas retangulares (tarugos) de cada lingote seguindo as devidas marcações: A e B (parte superior), C e D (parte inferior) e cada um dos tarugos foi usinado com 89 mm de comprimento. Após a usinagem, os materiais foram submetidos ao ensaio de tração utilizando uma máquina SERVOPULSER - SHIMADZU, mostrada na Figura 42, acoplada a um microcomputador com sistema de aquisição de dados que facilita a coleta das informações, realizado no LCAM na UFPA. A velocidade aplicada foi de 7,5 mm/min, determinada segundo as normas.

Figura 42 - Máquina de ensaio de tração.

Fonte: Autora, 2023.

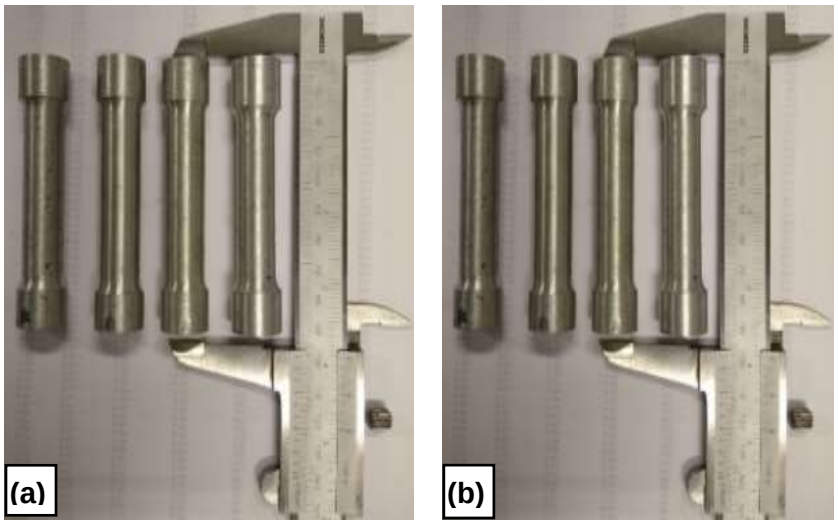
A Figura 43 mostra o desenho esquemático dos corpos de prova, dimensões em milímetros conforme a norma ASTM E 8M. A Figura 44 (a) mostra a padronização do corpo de prova do lingote 1 (corpos das latas) e a Figura 44 (b) mostra a padronização do lingote 2 (bases das latas + Ni).

Figura 43 - Desenho esquemático dos corpos de prova, dimensões em milímetros.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 44 - (a) padronização dos corpos de prova do lingote 1 e (b) do lingote 2



Fonte: Autora, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização química

A Tabela 2 apresenta a composição química para a liga AA3004 (Série 3XXX), especificada pela norma ABNT NBR ISO 209:2010.

Tabela 2 - Composição química da liga AA3004.

LIGA	Elementos (%)							
	Al	**Mn**	**Mg**	**Fe**	**Si**	**Cu**	**Zn**	**Outros**
AA3004	96,7	1,0-1,5	0,8-1,3	0,70	0,30	0,25	0,25	0,20

* Os valores apresentados indicam as porcentagens máximas admissíveis como impurezas, com exceção das indicadas por faixas (que representam os elementos de liga).

Fonte: ABNT NBR ISO 209:2010.

E a Tabela 3 apresenta os resultados da composição química obtida para o lingote 1 (corpos das latas) e para o lingote 2 (bases das latas + 3 % Ni) por espectrometria de emissão óptica (EEO) e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS).

Tabela 3 – Resultados da composição química do lingote 1 e do lingote 2.

Ligas		Elementos (%)								
		Al	**Mn**	**Mg**	**Fe**	**Si**	**Cu**	**Zn**	**Ti**	**Ni**
Lingote 1 (3004)	**EEO**	97,32	0,83	0,80	0,52	0,20	0,19	0,07	0,02	-
	EDS	96,58	1,10	0,99	0,65	0,28	0,20	0,15	0,02	-
Lingote 2 (3004 + 3 % Ni)	**EEO**	92,80	0,84	0,83	>1,00	0,08	0,17	0,08	0,02	>2,00
	EDS	94,30	1,02	0,87	0,69	0,10	0,15	0,10	0,01	2,72

Fonte: Autora, 2023.

Os resultados da Tabela 3 mostram que o valor encontrado para o elemento Mn do lingote 1 por espectrometria de emissão óptica (EEO), está abaixo da faixa de composição química estabelecida para a liga segundo a norma e para os demais elementos os valores estão dentro da faixa de composição química segundo a norma

vigente. Para o lingote 2, observou-se que o elemento Mn também apresentou valor abaixo da faixa e para o elemento Fe o valor encontra-se acima da porcentagem, tendo como referência a composição química determinada para a liga AA3004 de acordo com a norma. Entretanto, os resultados encontrados por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) para os lingotes 1 e 2, mostram que as porcentagens dos elementos estão de acordo com a norma vigente.

Com relação aos valores encontrados para o elemento Mn dos dois lingotes, estudos realizados por Gontijo e Cruz (2017), mostram que já é esperado que ocorra uma pequena redução na composição química da liga reciclada quando comparado à composição inicial, principalmente de seus principais elementos de liga. Por isso, é necessário que, depois de feita a refusão das latas de alumínio, se regularize a porcentagem dos elementos a fim de obter a liga desejada.

O valor encontrado para o elemento Fe do lingote 2 pode ser justificado devido a reciclagem do alumínio incorporar uma grande quantidade de impurezas, sendo uma delas o ferro. Este elemento apresenta teores mais elevados quando ligas recicladas são utilizadas na produção de peças em moldes de areia ou em coquilha e também em decorrência do manuseio durante o processo de fundição do metal líquido utilizando ferramentas produzidas com materiais ferrosos (FERREIRA,2016).

Além disso, a contaminação do ferro pode gerar a mudança na sequência de solidificação, possibilitando o surgimento de fases primárias compostas de ferro antes da cristalização dos grãos de alumínio. Essas fases que contêm ferro, por se desenvolverem antes do alumínio, podem crescer livremente, dando forma a cristais grosseiros na fase líquida (FERREIRA; RODRIGUES, 2018). Porém, nas ligas de alumínio com altos teores de ferro, o níquel evita a formação da fase frágil e quebradiça β-AlSiFe (PIMENTA, 2017).

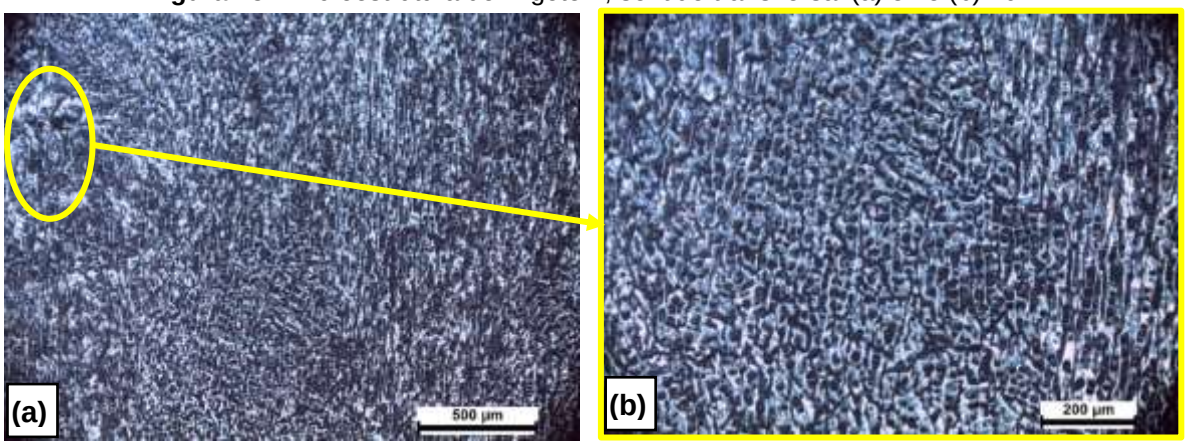
4.2 Caracterização microestrutural

4.2.1 Microscopia óptica

As fotomicrografias foram obtidas via microscopia óptica nas duas amostras por corte transversal. A microestrutura da amostra obtida do lingote 1, em seu estado bruto de fusão é apresentada na Figura 45 (a) com aumento de 5x e na Figura 45 (b)

com aumento de 10x. Observou-se uma microestrutura dendrítica grosseira, o corte das pontas das dendritas.

Figura 45 - Microestrutura do lingote 1, sentido transversal (a) 5x e (b) 10x.

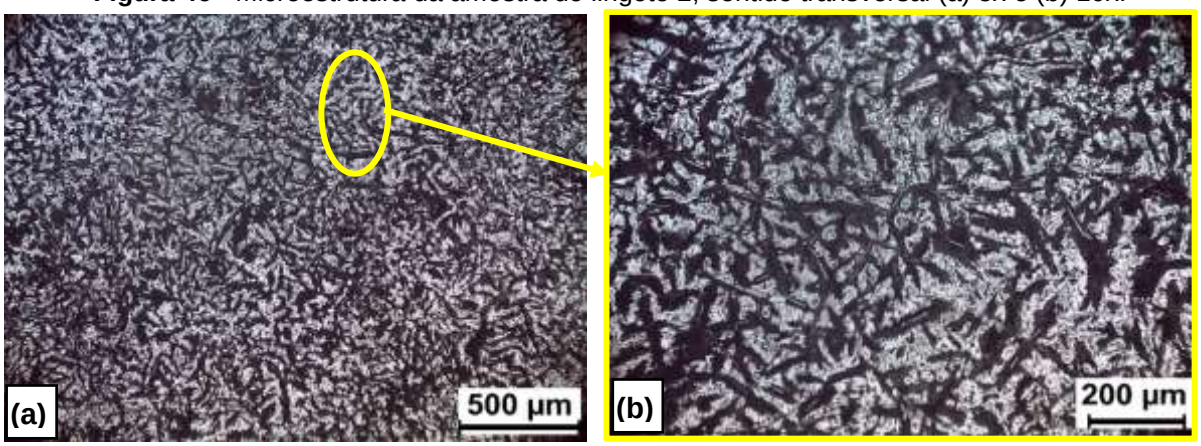


Fonte: Autora, 2023.

Percebe-se que quando o processo de solidificação ocorre em taxas de resfriamento mais demoradas, as fases intermetálicas apresentam uma morfologia grosseira e em concentrações maiores. A quantidade referente a estas fases é estabelecida pela composição química da liga e pela taxa de resfriamento (FERREIRA, 2016).

A microestrutura da amostra obtida do lingote 2, em seu estado bruto de fusão é apresentada na Figura 46 (a) com aumento de 5x e na Figura 46 (b) com aumento de 10x. Nota-se uma distribuição homogênea e uma microestrutura formada por células dendríticas, o corte das mesmas e o composto intermetálico Al_3Ni de formato acicular.

Figura 46 - Microestrutura da amostra do lingote 2, sentido transversal (a) 5x e (b) 10x.



Fonte: Autora, 2023.

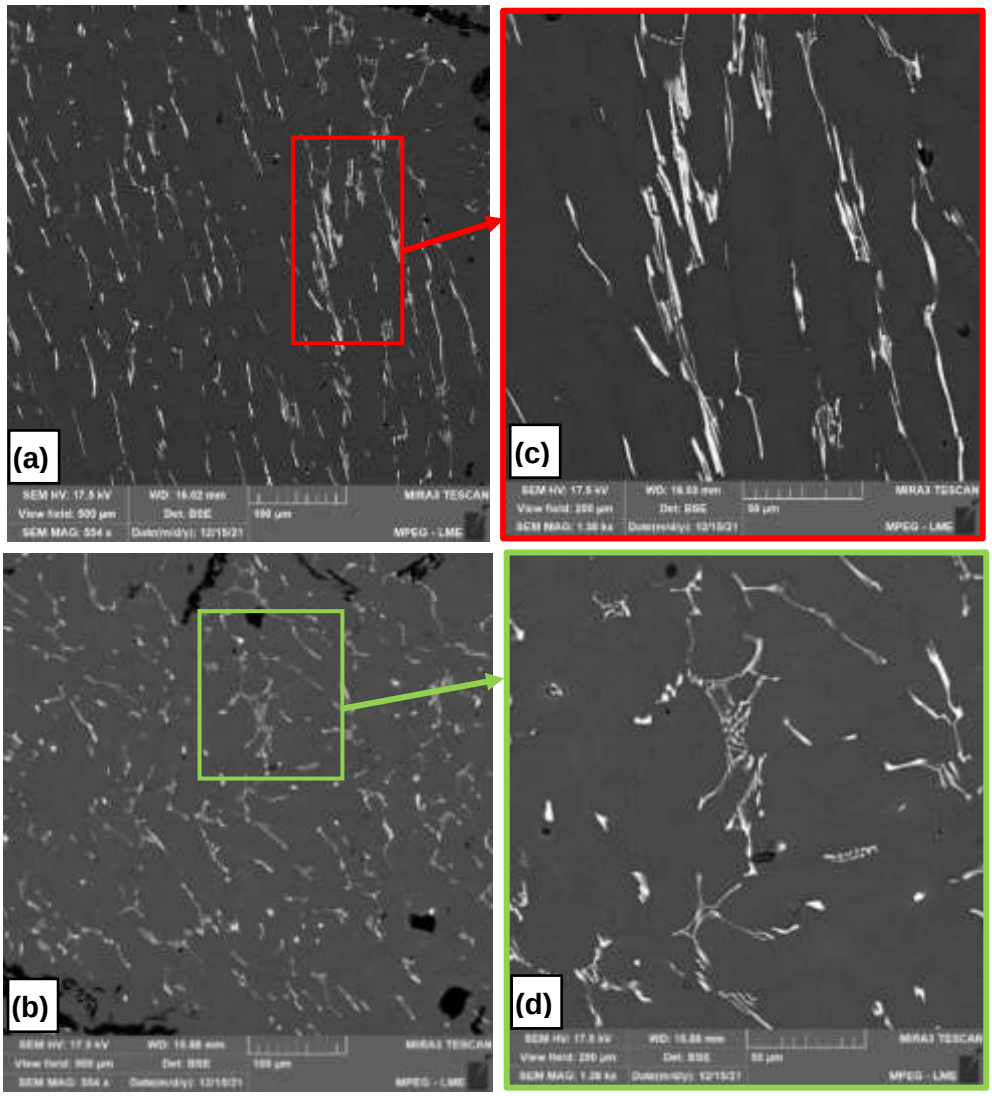
Justifica-se essa microestrutura devido o processo de solidificação ter ocorrido em taxas mais altas de resfriamento (lingote resfriado por imersão em água), conseguindo dessa forma obter partículas menores, resultando em maiores concentrações em solução sólida. Além disso, quando o Níquel é adicionado à matriz de alumínio verifica-se o aumento na resistência da liga. Ademais, quanto menores os espaçamentos dendríticos mais abrangente é a distribuição das partículas de Al_3Ni nas regiões interdendríticas, contribuindo para o aumento da resistência mecânica (NASCIMENTO, 2015).

4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (MEV/EDS).

As Figuras 47 (a) e 47 (b) com um aumento de 100 µm e as Figuras 47 (c) e 47 (d) com um aumento de 50 µm, apresentam as morfologias presentes na microestrutura correspondente a amostra do lingote 1 no seu estado bruto de fusão, sentido transversal de corte.

As imagens revelam a estrutura típica para a liga da série 3XXX, a presença da matriz de Al-α com uma estrutura celular dendrítica de coloração mais escura, com compostos intermetálicos formados por Al, Mn e Fe de coloração mais clara nos contornos de grãos, também é notória a presença de alguns precipitados de tamanhos diferentes. É possível que seja a fase precipitada $Al_6(MnFe)$, sendo que o Mn é predominante para formar o precipitado com o Al.

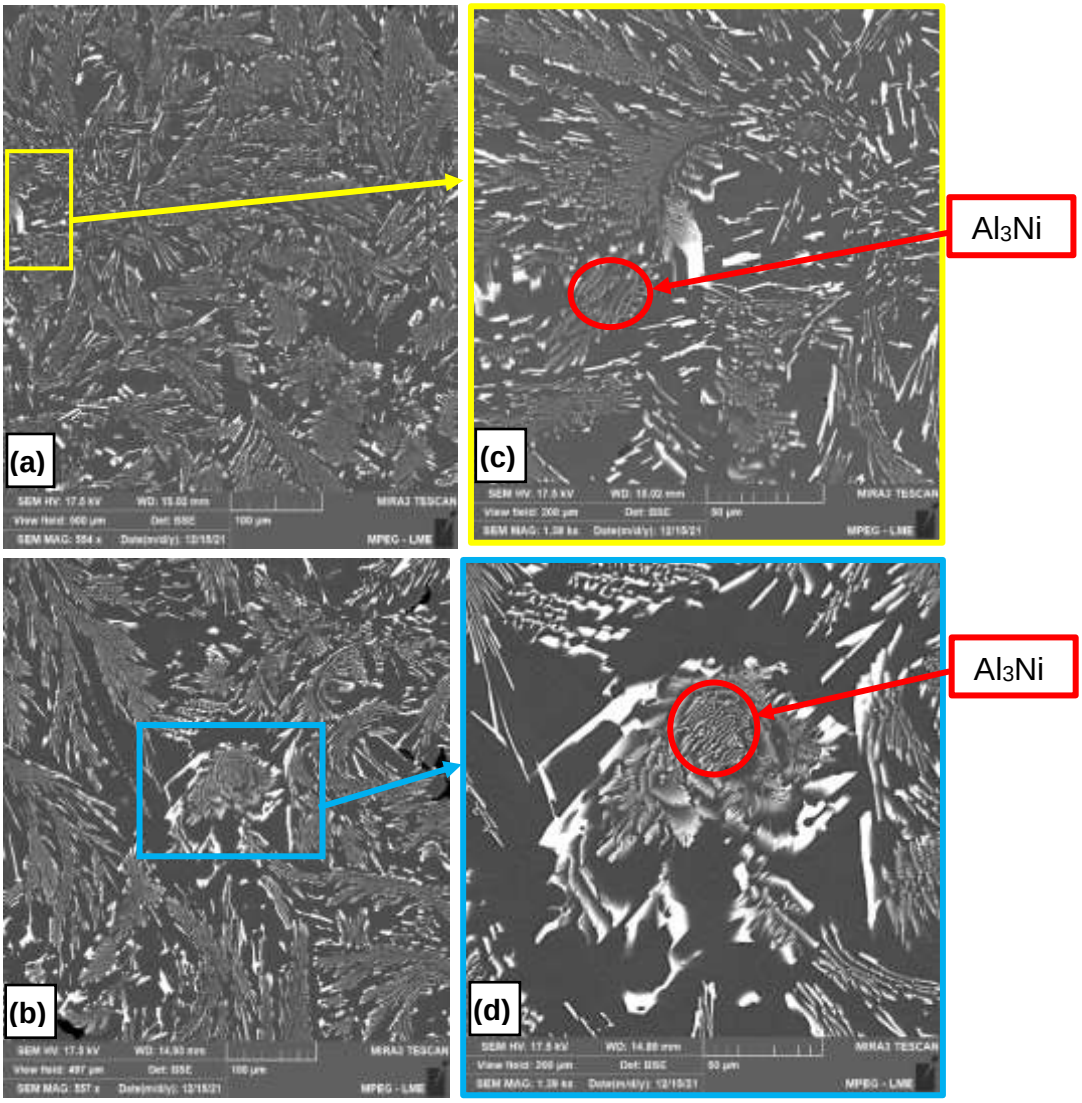
Figura 47 – Micrografias do lingote 1: (a) e (b) matriz geral, (c) e (d) detalhes dos intermetálicos.



Fonte: Autora, 2023.

As Figuras 48 (a) e 48 (b) com um aumento de 100 µm e as Figuras 48 (c) e 48 (d) com um aumento de 50 µm, apresentam a microestrutura correspondente a amostra do lingote 2 no seu estado bruto de fusão, sentido transversal. Verifica-se a presença da matriz de Al-α de coloração mais escura, com compostos intermetálicos nas regiões interdendríticas de coloração mais clara. Observou-se também que predominou a formação do composto intermetálico Al_3Ni.

Figura 48 - Micrografia da amostra do lingote 2: (a) e (b) matriz geral, (c) e (d) detalhes dos intermetálicos.



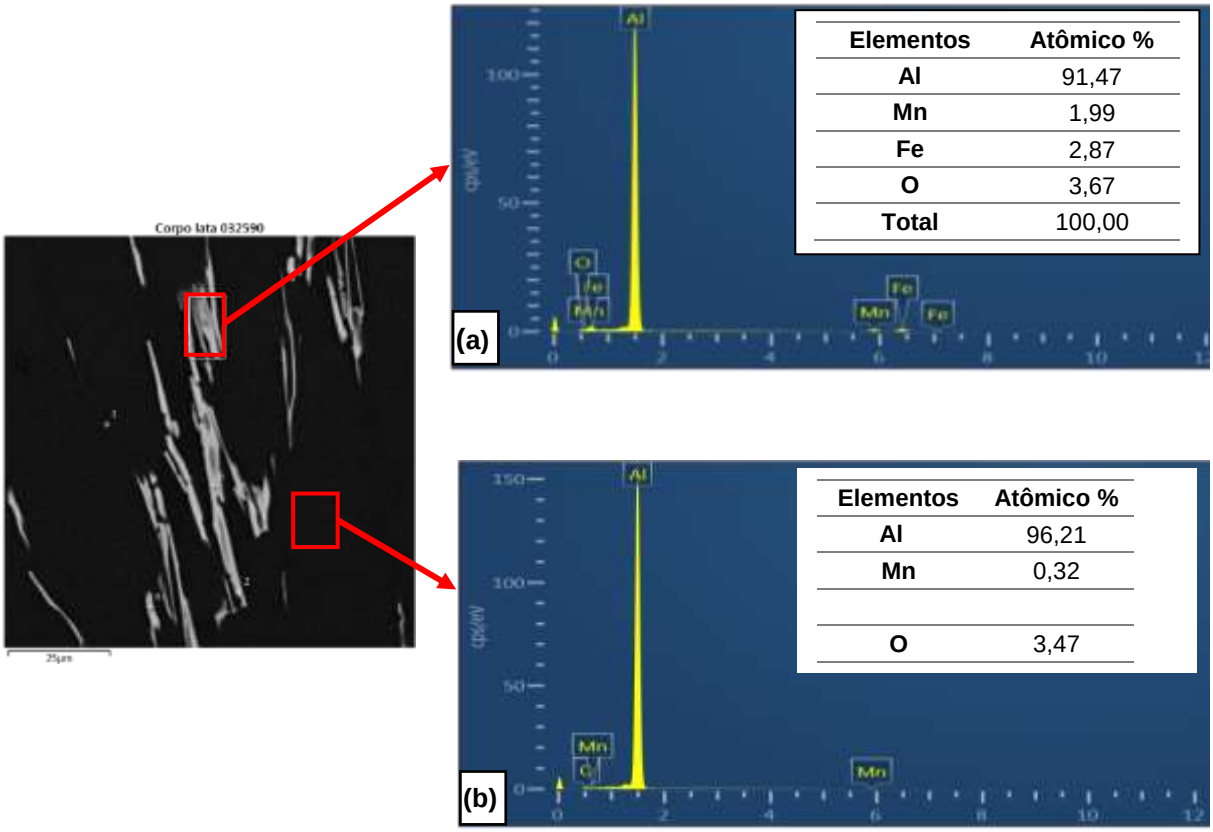
Fonte: Autora, 2023.

Com o auxílio de microanálise por EDS é possível identificar a presença de precipitados no material. As micrografias obtidas por MEV, apresentam dois pontos em destaque analisados por EDS, seus respectivos espectros com os elementos presentes (análise qualitativa) e as tabelas com os teores de cada elemento (análise semiquantitativa) nos referidos pontos.

As Figuras 49 e 50 mostram o resultado via EDS mediante a microanálise feita na amostra do lingote 1, evidenciando a matriz de Al-α com uma estrutura celular dendrítica e observa-se também a presença dos elementos de liga Mn e Fe nos contornos dos braços dendríticos. Confirmando dessa forma a fase precipitada $Al_6(MnFe)$, reportado na literatura. Visto que o alumínio forma fases com os elementos

identificados anteriormente. Levando em consideração que a ausência de um determinado elemento de liga na microanálise, não necessariamente exclui sua presença na composição da microestrutura.

Figura 49 - Lingote 1: Micrografia 1, respectivos espectros e tabelas (a) intermetálicos nos contornos dos braços dendríticos 1 e (b) matriz Al-α 1.

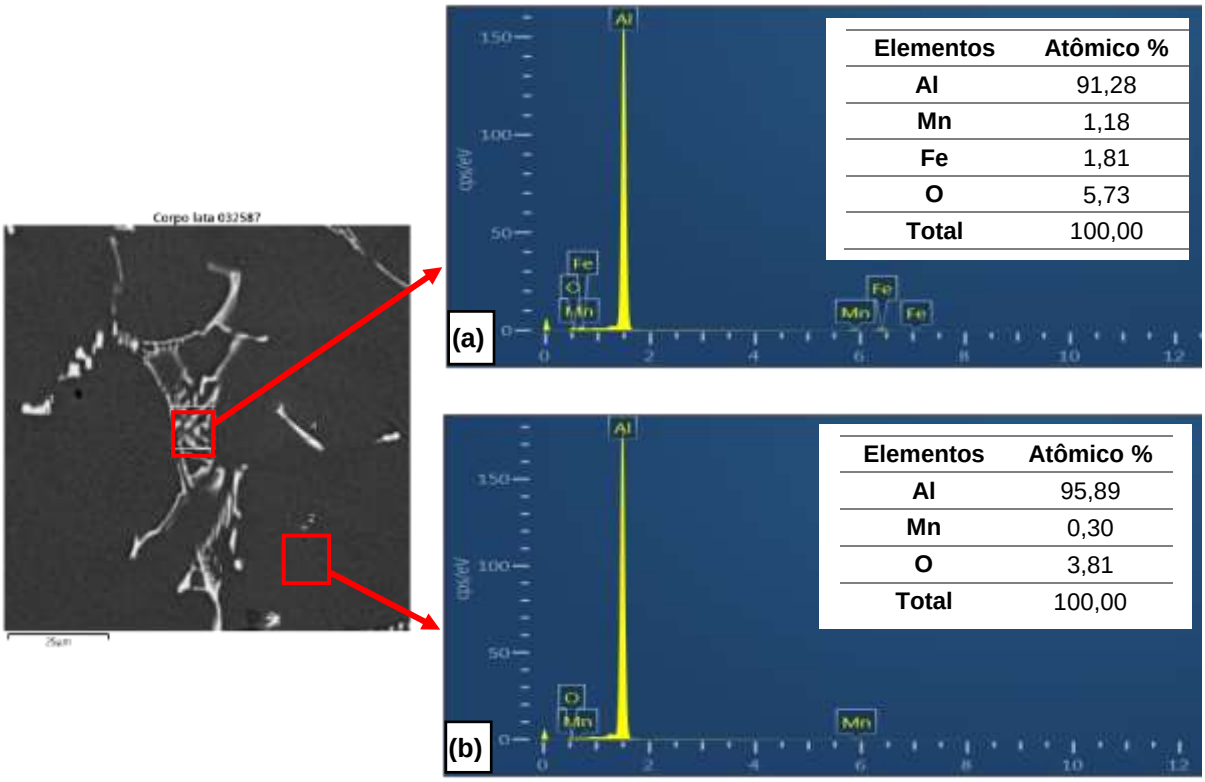


Elementos	Atômico %
Al	91,47
Mn	1,99
Fe	2,87
O	3,67
Total	100,00

Elementos	Atômico %
Al	96,21
Mn	0,32
O	3,47

Fonte: Autora, 2023.

Figura 50 - Lingote 1: Micrografia 2, respectivos espectros e tabelas (a) intermetálico no contorno do braço dendrítico 2 e (b) matriz Al-α 2.



Elementos	Atômico %
Al	91,28
Mn	1,18
Fe	1,81
O	5,73
Total	100,00

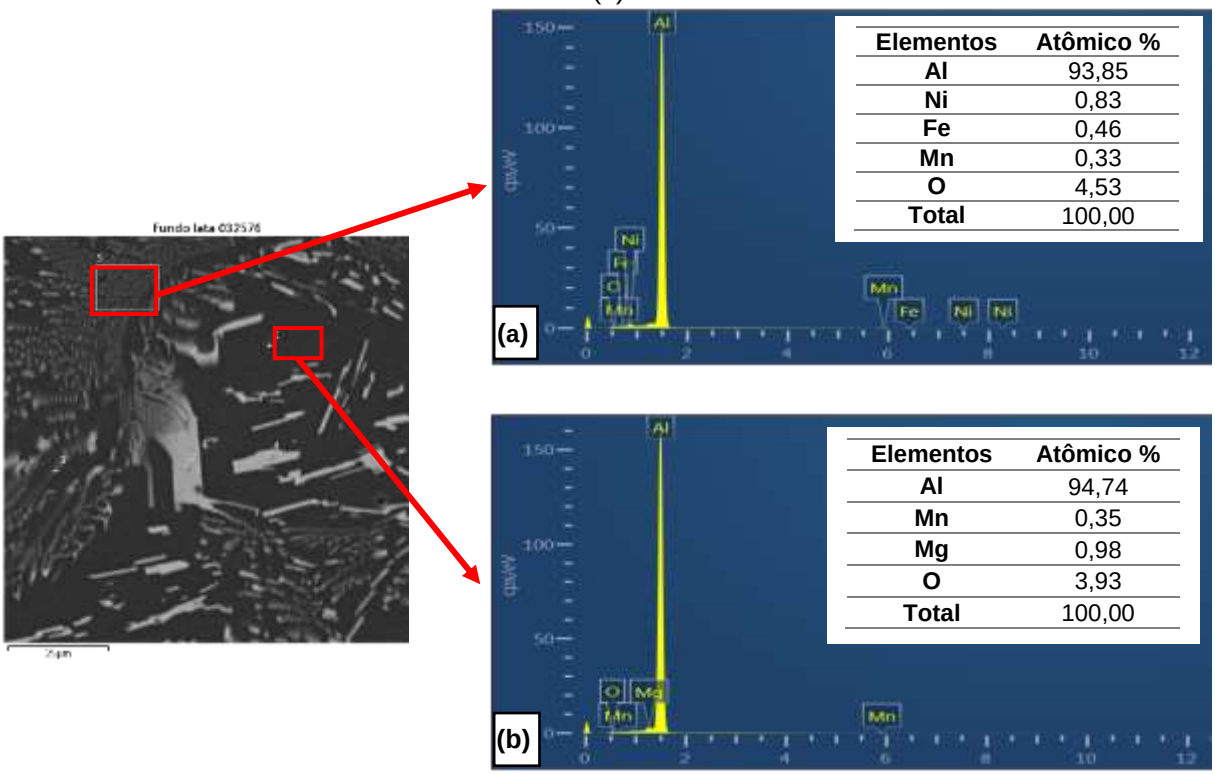
Elementos	Atômico %
Al	95,89
Mn	0,30
O	3,81
Total	100,00

Fonte: Autora, 2023.

Observou-se que as ligas de alumínio contendo Mn e Fe solidificam com a formação de intermetálicos na região dos contornos de grãos. Além disso, devido o ferro possuir uma elevada tendência de segregação no alumínio, os intermetálicos formados durante a solidificação contêm relativamente mais Fe do que Mn. Os precipitados que aparecem alongados nas micrografias são do tipo $Al_6(MnFe)$ (FERREIRA, 2016).

As Figuras 51 e 52, são compostas pelas micrografias obtidas por MEV da amostra do lingote 2, com dois pontos destacados e analisados por EDS. Os espectros mostram os elementos presentes na liga e as tabelas com os teores de cada elemento nos referidos pontos. Percebe-se a matriz (cor mais escura) conforme observado pela composição química, trata-se da fase Al-α. Nota-se também os elementos de liga Ni, Mn e Fe na região interdendrítica (cor mais clara), trata-se da mistura eutética formada pela fase-α e pelo composto intermetálico Al_3Ni.

Figura 51 - Lingote 2: Micrografia 1, espectros e tabelas (a) intermetálico no contorno do braço dendrítico 1 e (b) matriz Al-α 1.

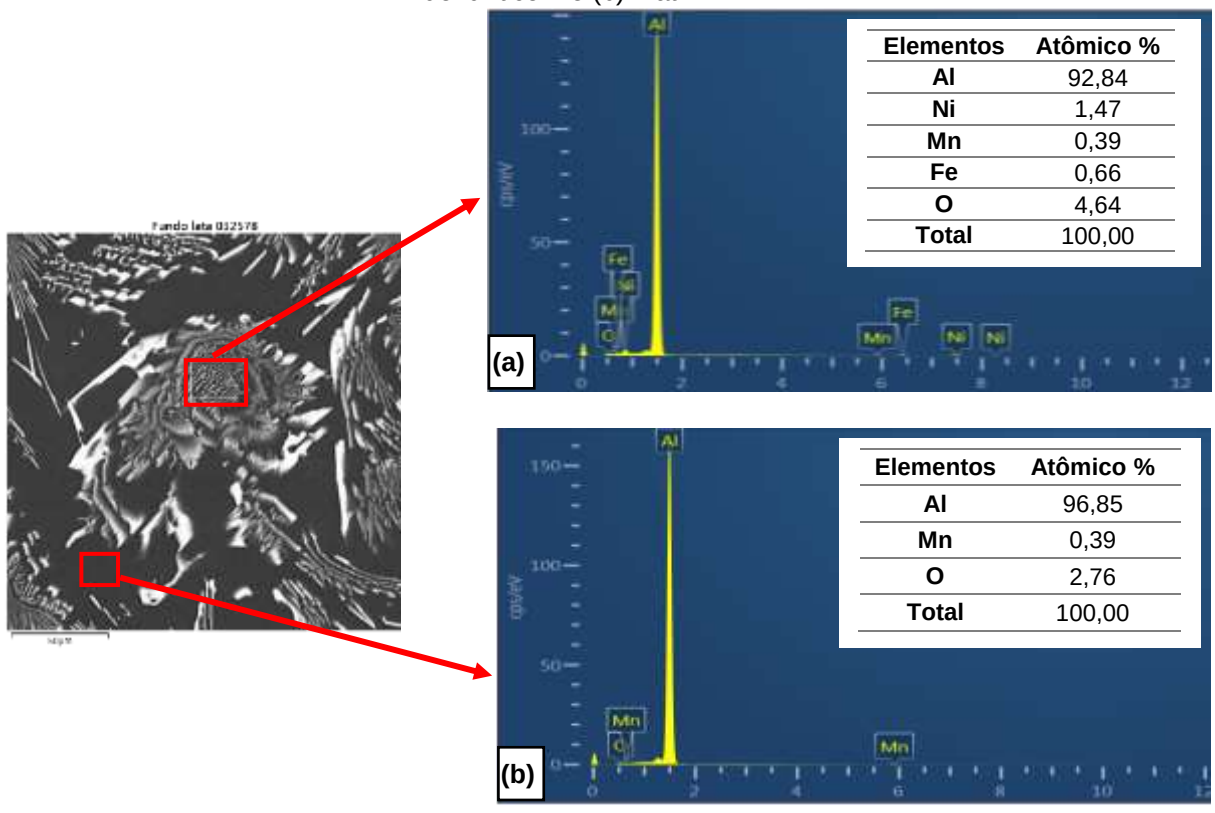


Elementos	Atômico %
Al	93,85
Ni	0,83
Fe	0,46
Mn	0,33
O	4,53
Total	100,00

Elementos	Atômico %
Al	94,74
Mn	0,35
Mg	0,98
O	3,93
Total	100,00

Fonte: Autora, 2023.

Figura 52 - Lingote 2: Micrografia 2, espectros e tabelas (a) intermetálico no contorno do braço dendrítico 2 e (b) matriz Al-α 2.



Elementos	Atômico %
Al	92,84
Ni	1,47
Mn	0,39
Fe	0,66
O	4,64
Total	100,00

Elementos	Atômico %
Al	96,85
Mn	0,39
O	2,76
Total	100,00

Fonte: Autora, 2023.

4.3 Caracterização Mecânica

4.3.1 Microdureza

A microdureza média geral para os 30 pontos analisados na amostra referente ao lingote1 foi de 55,76 HV, utilizando a escala de microdureza *Vickers*. A Tabela 4 apresenta esses valores para cada linha da amostra.

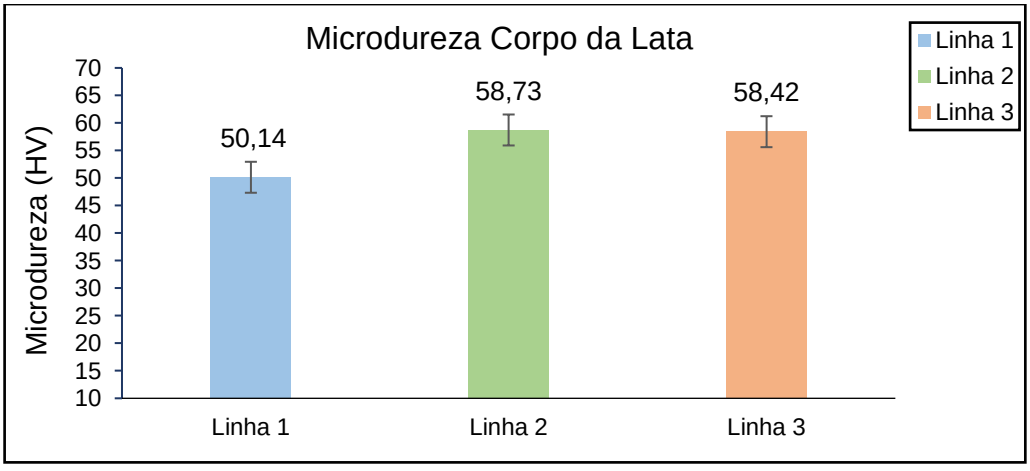
Tabela 4 - Média da microdureza HV do lingote 1**.**

Linhas	Méd. Microdureza (HV)
1ª Linha	50,14
2ª Linha	58,73
3ª Linha	58,42
Média Geral	**55,76**
Desvio Padrão	**4,87**

Fonte: Autora, 2023.

A Figura 53, apresenta o gráfico com a média dos valores encontrados em cada linha. Observou-se que o maior valor encontrado foi 58,73 HV na 2ª linha e o menor valor encontrado foi de 50,14 HV na 1ª linha. Nota-se que o ensaio de microdureza apresentou valores muito próximos na 2ª linha (centro do lingote) e na 3ª linha (base do lingote), ou seja, uma maior dureza no material. Já na 1ª linha, justifica-se o valor inferior devido a região ficar próximo ao rechupe e pela presença de impurezas em geral.

Figura 53 - Gráfico com a média da microdureza HV para o lingote 1.



Fonte: Autora, 2023.

Além disso, a velocidade de resfriamento ao longo da dimensão do lingote durante a solidificação compromete a microestrutura, influenciando consequentemente nos valores da microdureza (FARIA, 2015).

O resultado encontrado da média geral referente ao lingote 1, foi superior ao resultado da microdureza encontrado no estudo desenvolvido por Caldas (2019), em uma liga 3004 reciclada, que foi de 41, 08 HV.

Desse modo, pode-se dizer que a variação na média dos valores da microdureza do lingote 1, se dá devido a mesma não apresentar uniformidade na microestrutura (presença de inclusões e porosidade) resultante do processo de solidificação.

Para a amostra referente ao lingote 2, a média geral para microdureza foi de 56,32 HV, utilizando a escala de microdureza Vickers. A Tabela 5 apresenta a média da microdureza HV de cada linha da amostra.

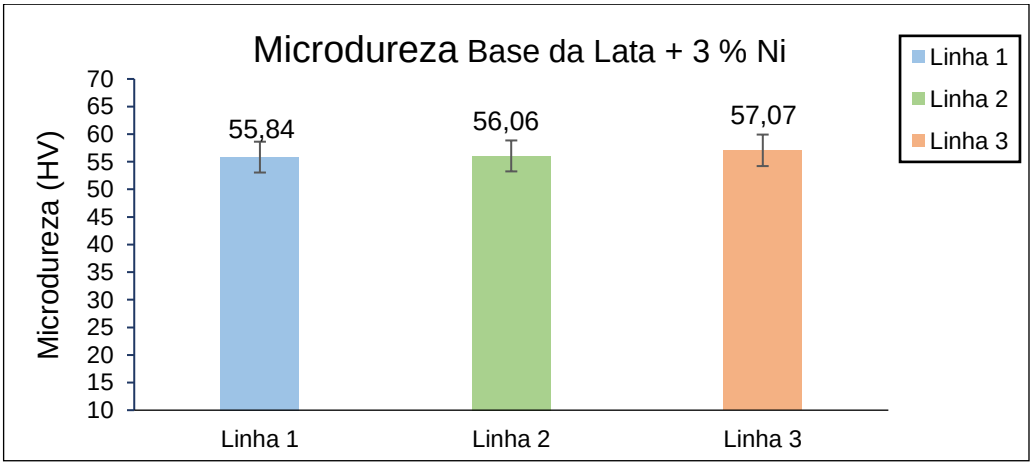
Tabela 5 - Média da microdureza HV do lingote 2**.**

Linhas	Méd. Microdureza (HV)
1ª Linha	55,84
2ª Linha	56,06
3ª Linha	57,07
Média Geral	**56,32**
Desvio Padrão	**0,65**

Fonte: Autora, 2023.

A Figura 54, apresenta o gráfico com a média dos valores encontrados em cada linha. Observou-se que o maior valor obtido foi 57,06 HV na 3ª linha e o menor valor encontrado foi de 55,84 HV na 1ª linha. Pode-se inferir que o ensaio de microdureza apresentou uma tendência homogênea nos valores ao longo da amostra. O que pode ser justificado por apresentar o intermetálico Al_3Ni e uma estrutura mais refinada. Constatou-se também a presença de poros e inclusões.

Figura 54 - Gráfico com a média da microdureza HV para o lingote 2.



Fonte: Autora, 2023.

Vale ressaltar que o níquel apresenta densidade maior que o alumínio, favorecendo dessa forma uma maior concentração no início da solidificação e microestrutura mais definida. Além disso, a adição de Níquel à matriz de alumínio aumenta a resistência e quanto maior a quantidade de Níquel, maior a microdureza do material (FRANÇA, 2020).

Observou-se que houve uma pequena alteração na média geral dos valores da microdureza do lingote 2 (56,32 HV), em comparação com o lingote 1 (55,76 HV). Apesar da diferença de microdureza ser pequena (0,56 HV) o lingote 2 apresentou um melhor desempenho. O que pode ser justificado em virtude do lingote 2 apresentar o intermetálico fibroso Al_3Ni e uma distribuição mais uniforme em toda peça durante a solidificação. A Tabela 6 apresenta a média geral com desvio padrão da microdureza HV dos lingotes 1 e 2.

Tabela 6 - Média geral com desvio padrão da microdureza HV dos lingotes 1 e 2.

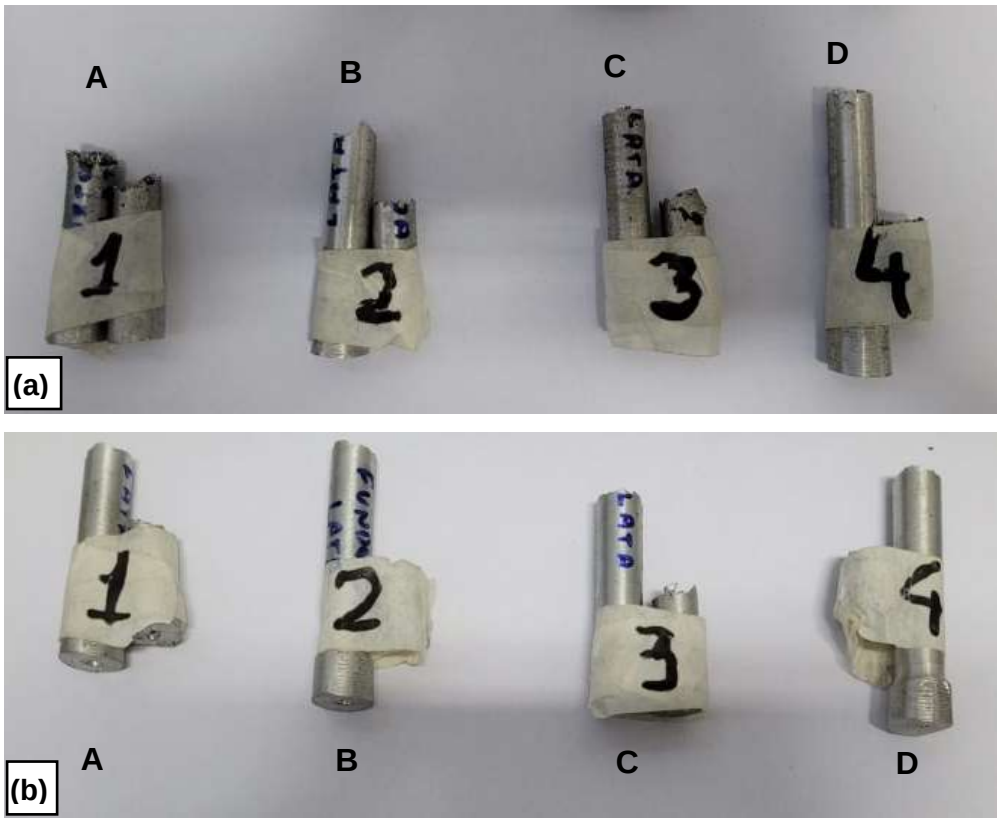
Média Geral Microdureza Vickers (HV)		
Lingote 1(3004)	**Lingote 2 (3004 + 3 % Ni)**	**Desvio padrão**
55,76	**56,32**	**0,39**

Fonte: Autora, 2023.

4.3.2 Ensaio de tração

Após a realização dos ensaios de tração dos oito corpos de prova, sendo quatro corpos de prova de cada lingote com suas marcações: A, B, C, D. As Figuras 55 (a) e 55 (b) mostram os corpos de prova tracionados do lingote 1 e do lingote 2 respectivamente**.**

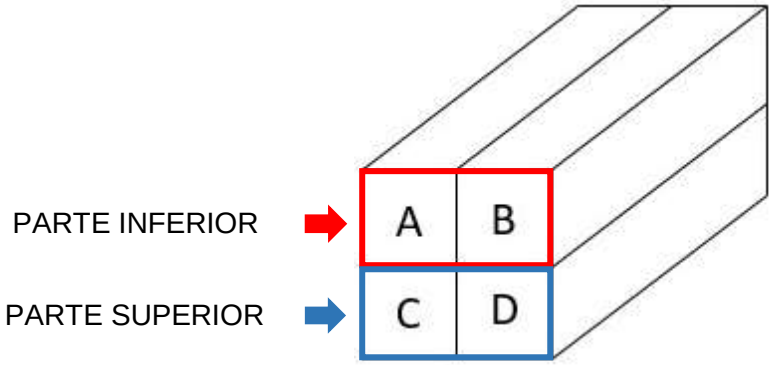
Figura 55 - Corpos de prova tracionados: (a) do lingote 1 e (b) do lingote 2.



Fonte: Autora, 2023.

As propriedades mecânicas das ligas estudadas foram avaliadas a partir do Limite de Resistência a Tração (LRT), a seguir pode ser visualizado a Figura 56 do desenho esquemático da parte superior (A e B) e parte inferior (C e D) das amostras. Na Tabela 7 estão anotados os valores tanto para o lingote 1 quanto para o lingote 2.

Figura 56 - Desenho esquemático da parte superior (A e B) e parte inferior (C e D) dos lingotes 1 e 2.



Fonte: Autora, 2023.

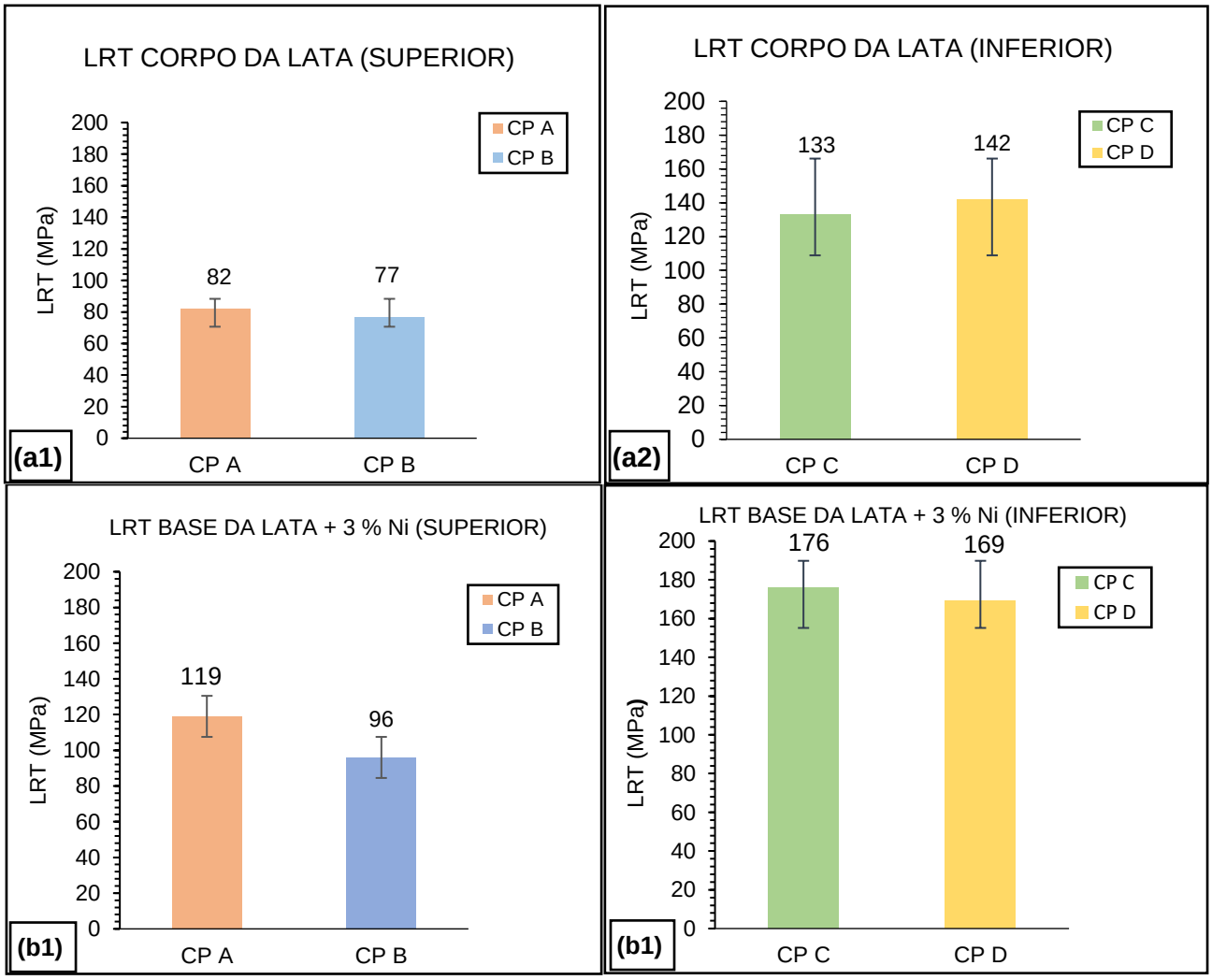
Tabela 7 - Mostra os resultados do limite resistência a tração (LRT) com o desvio padrão da parte superior (A e B) e parte inferior (C e D) dos lingotes 1 e 2.

Lingote 1 (3004)			**Lingote 2 (3004 + 3 % Ni)**		
Superior			**Superior**		
CP´S	**LRT (MPa)**	**Desv. Padrão**	**CP´S**	**LRT (MPa)**	**Desv. Padrão**
A	82	2,5	A	119	11,5
B	77		B	96	
Inferior			**Inferior**		
CP´S	**LRT (MPa)**	**Desv. Padrão**	**CP´S**	**LRT (MPa)**	**Desv. Padrão**
C	133	4,5	C	176	3,5
D	142		D	169	
Média geral	**109**		**Média geral**	**140**	

Fonte: Autora, 2023.

A Figura 57 mostra os gráficos com a comparação dos resultados do limite de resistência a tração para o lingote 1 (a1) parte superior e (a2) parte inferior e lingote 2 (b1) parte superior e (b2) parte inferior.

Figura 57 - Comparação dos resultados do LRT do lingote 1 ((a1) parte superior e (a2) inferior) e do lingote 2 ((b1) parte superior e (b2) inferior).



Fonte**:** Autora, 2023.

De acordo com o ensaio de tração o valor do limite de resistência a tração médio geral para o lingote 1 foi de 109 MPa, o valor pode ser justificado pelas impurezas e defeitos adquiridos no processo de fundição e solidificação, como também por não passar por nenhum trabalho mecânico. Para o lingote 2 o limite de resistência a tração médio geral foi superior com o valor de 140 MPa (aumento de mais de 20 %), quando comparado ao valor médio geral do lingote 1. O que pode ser explicado pela presença do intermetálico Al_3Ni que apresenta geometria fibrosa, melhorando as propriedades mecânicas da liga. Vale ressaltar que o lingote 2, também não passou por nenhum trabalho mecânico

A literatura reporta no estudo desenvolvido por Oliveira (2019) com alumínio reciclado, que a média geral do limite de resistência a tração foi de 118,55 MPa. E no

estudo de Kapp (2021), que o limite de resistência a tração para a liga 3004 recozida é de 180 MPa e para a liga 3004 encruada (H38) é de 295 MPa.

5 CONCLUSÕES

Diante da metodologia desenvolvida no presente estudo para observação da caracterização mecânica, química e microestrutural dos lingotes 1 (3004) e 2 (3004 + 3 % Ni), conclui-se:

Obter um lingote de alumínio reciclado e outro de alumínio reciclado modificado com adição de 3 % de Níquel por fusão, para análise e comparação das duas ligas;

- O lingote 1 foi obtido através do vazamento por gravidade em um molde de cobre com resfriamento em temperatura ambiente. Já o lingote 2 foi obtido através do vazamento por gravidade em um molde de cobre por imersão em água. O lingote 2 apresentou uma microestrutura homogênea e partículas menores quando comparada a microestrutura do primeiro lingote que apresentou partículas grosseiras.

Analisar a composição química do lingote de alumínio reciclado (corpos das latas), para analisar se a composição da mesma está de acordo com a norma vigente;

- O resultado obtido da composição química por EEO do lingote 1, permitiu constatar que apenas o elemento Mn apresentou valor inferior segundo a norma. Já os valores encontrados por EDS estão de acordo com a norma.

Analisar a composição química do lingote de alumínio reciclado (bases das latas + 3 % Ni), para analisar a composição e alterações na liga;

- A composição química do lingote 2 por EEO está de acordo com os valores normatizados para a liga AA3004, com exceção do elemento Mn que também apresentou percentual inferior e do elemento Fe cujo valor foi superior do estipulado pela norma. Os valores obtidos por EDS encontram-se dentro da norma.

Caracterizar a microestrutura do lingote 1 e do lingote 2, a fim de comparação;

- A microestrutura do lingote 1, revelou a matriz dendrítica e a presença predominante dos elementos Mn-Fe, confirmando a fase precipitada $Al_6(Mn,Fe)$. Já a microestrutura do lingote 2, foi possível observar uma matriz dendrítica e a presença dos elementos Ni-Mn-Fe, evidenciando o composto intermetálico Al_3Ni que se destacou na região dos contornos de grãos. Observou-se também a presença de microporosidade na microestrutura dos dois lingotes.

Realizar ensaios mecânicos de microdureza *Vickers* e tração do lingote 1 e do lingote 2, a fim de avaliar e comparar o perfil de microdureza e a resistência mecânica.

- Os lingotes 1 e 2 apresentaram resultados de microdureza próximos, sendo os valores de 55,76 HV para o lingote 1 e 56,32 HV para o lingote 2. Para o ensaio de tração o lingote 2 apresentou LRT superior com o valor de 140 MPa (aumento de mais de 20 %) quando comparado ao lingote 1 que apresentou LRT de 109 MPa. Pode-se inferir este resultado devido ao lingote 2 apresentar o intermetálico Al_3Ni que tem geometria fibrosa, reforçando a matriz de alumínio e interferindo positivamente em suas propriedades mecânicas.

A partir de todos os resultados obtidos concluiu-se que o lingote 2 apresentou um melhor resultado. O resfriamento rápido, contribuiu para que houvesse uma uniformidade na solidificação e uma estrutura mais refinada. A presença do composto intermetálico acicular Al_3Ni, melhorou as propriedades mecânicas da liga, possibilitando através de estudos futuros a viabilidade de sua aplicação.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos, as discussões e as conclusões realizadas neste trabalho, podem ser sugeridas as seguintes linhas de pesquisas para realização de trabalhos futuros:

- Realizar estudo para a viabilidade econômica e aplicabilidade da liga reciclada 3004 + 3 % Ni;
- Estudo do comportamento da liga 3004 com variações de teores de Ni;
- Análise comparativa da liga 3004 + 3 % Ni com a liga 5182 (tampa) ambas recicladas;
- Comparar a liga 3004 + 3 % Ni reciclada com a liga 3004 com a adição de outro elemento de liga.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio**. Relatório Bauxita. 2017. Disponível em: http://www.abal.org.br/downloads/ABAL-Relatorio-Bauxita-2017-1.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio.** Estatísticas Nacionais da Reciclagem Latas de Alumínio. 2020. Disponível em: https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/reciclagem/latas-de-aluminio-2009-2020/. Acesso em: 30 jul. 2021.

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio.** Open Startaps Events Abal. 2019. Disponível em: https://www.openstartups.net/events/abal/. Acesso em: 16 mar. 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 209:2010**. Alumínio e suas ligas - Classificação da composição química. Rio de Janeiro, 2010.

ABRALATAS. **Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio.** Reciclagem das Latinhas no Brasil. 2021. Disponível em: https://www.abralatas.org.br/reciclagem-de-latinhas-no-brasil/. Acesso em: 27 jul. 2021.

AFONSO, L. C. **Caracterização Microestrutural de Liga de Alumínio AA8011 Reciclado de Embalagem Pós-Consumo da Indústria de Alimentos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal do Pará – UFPA, Ananindeua, Pará, 2019.

ALMADA, G. C. **Estudo da Influência do Agente Nucleante (ALTi5%B1%) na Microestrutura de Chapas AA8011 Obtidas por Lingotamento Contínuo.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, UNESP, Guaratinguetá, 2014.

AMAZONIA ACONTECE. Por Dentro do Ciclo das Latinhas. 2015. Disponível em: httpamazoniaacontece.blogspot.coms:///2015/09/por-dentro-do-ciclo-das-latinhas. Acesso em: 12 abr. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**, v. 2, ASM, 1996.

ARRUDA, E. J.; GUIMARÃES, B. L. **Análise da Microestrutura e da Dureza de Ligas Modificadas a partir da Liga A380 após Tratamentos Térmicos de Solubilização e Envelhecimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

BRAGA, R. M. L.; **Análise Metalográfica do Alumínio sob Diferentes Formas de Solidificação pelo Processo de Fundição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

CALÇADA, M. V**. Avaliação Mecânica e Microestrutural da Liga de Alumínio AA3104 Empregada na Indústria de Fabricação de Latas Laminada à Frio com e sem Interpasses.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, São Paulo, 2018.

CALDAS, E. S. **Caracterização Química e Microestrutural de Alumínio Reciclado de Embalagem Pós Consumo de Bebidas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal do Pará - UFPA, Ananindeua, Pará, 2019.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução.** Livros Técnicos e Científicos – LTC 10ª Ed. Rio de Janeiro: Editora S. A. Págs. 156, 388. 2021.

CHOUDHARY, S. K. et al. Journal of Materials Processing Technology Solidification morphology and segregation in continuously cast steel slab. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 243, págs. 312–321, 2017.

COUTINHO, M. M. **Correlação Entre as Propriedades Mecânicas e Microestruturais da Liga Al0, 4%Nb em Diferentes Condições de Solidificação.** Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) - Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2018.

DANTAS, P. P. **Caracterização de Ligas Hipereutéticas de Al-Ni Solidificadas Unidirecionalmente**. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais de Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2014.

DIAS, W. S. **Análise da Influência do Tratamento Térmico na Liga Al-0,05%Cu-[0,35- 0,45]%Fe Modificada com Dois Teores de Zircônio Solidificada em Coquilha Metálica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará – UFPA, 2016.

DINIZ, L. M. **Influência do Tratamento Térmico na Vida em Fadiga de Fios de Alumínio.** Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília – DF. 2018.

FABRICIO, D. A. K. **Garantia da Qualidade de Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos** – Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2015.

FARIA, J. D. **Correlações entre Variáveis Térmicas, Microestrutura e Propriedades Mecânicas das Ligas Al-4%Cu e Al-4%Cu-4%Ag Solidificadas em Regime Transitório** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, CAMPINAS, 2015.

FERREIRA, J. P.; RODRIGUES, M. G. **Alterações Geradas por Resíduos de Ferro na Fundição de Alumínio Reciclado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté – SP, 2018.

FERREIRA, T.; **Desenvolvimento de Camadas Ricas no Intermetálico α-Alx(Fe,Mn,Cr)Ysiz Em Ligas Al-Si Por Solidificação Controlada** Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Ponta Grossa, 2016.

FRANÇA, R. N. C. **Correlação entre Parâmetros Térmicos, Estrutura e Propriedades Mecânicas das Ligas Al-3% e Al-5%Ni Solidificadas Direcionalmente.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal do Pará- UFPA, 2020.

GARCIA, M. C. S. **Modificação do Resíduo de Bauxita Gerado no Processo Bayer por Tratamento Térmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2012.

GEOLOGIA E MINERAÇÃO. Alumínio, Produção e Mercado. 2018. Disponível em: https://www.notasgeo.com.br/2018/03/aluminio-producao-e-mercado.html. Acesso em: 24 mar. 2020.

GONTIJO, J. V. M; CRUZ, L. X. P. **Análise da Fabricação por Fundição de Compósito de Matriz Metálica com Reforço de Escória de Alto-Forno.** Relatório (Parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico) - Universidade de Brasília, 2017.

GUTERRES, A. M. **Correlação Entre Composição Química, Porosidade, Tratamentos Térmicos e Propriedades Mecânicas em Ligas de Al-Si-Mg Fundidas.** Tese (Doutorado em engenharia e tecnologia de materiais) - Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

IMERY, J. Alumínio yla vida diária los metales. Disponível em: http://jesusimery.blogspot.com/2017/06/aluminio-yla-vida-diaria-los-metales.html. Acesso em: 03 maio 2023.

KAPP, R. Z.; **Caracterização Experimental da Anisotropia em Chapas de Alumínio da Série 3xxx Classe 3104-H34** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Mecânica, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2021.

LIMA, D. F. **Análises Macro e Microestrutural e Correlação com a Microdureza de Liga Zn-Al Solidificadas no Processo de Squeeze Casting**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, João Pessoa, 2017.

LUCENA, A. L. A.; Relatório de Estágio Supervisionado: **Caracterização e Análise de Materiais** - Professor Orientador: Prof. Dr. Carlson Pereira de Souza. Natal, Rio Grande do Norte, 2015.

MACEDO, M. C.; GOMES, Ì. R. B.; SOUZA, L. G. M. **Caracterização de Amostras por Microscopia Óptica e por Microdureza de Materiais Metálicos Ferrosos e Não Ferrosos.** - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS, Porto Alegre, v.2, n.3, p. 48-61, jul/dez. 2015.

MAGALHÃES, E. F. **Caracterização Química, Macro e Microestrutural da Liga de Alumínio da Série 6xxx (Al-Mg-Si) Reciclado de Resíduos de Perfis e Estruturas**

de Alumínio. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal do Pará - UFPA, Ananindeua, Pará, 2019.

MELO, J. P.; MELO, K. R.; **O Comércio de Latinhas de Alumínio: um Estudo Socioeconômico e Ambiental no Município de Conceição Do Araguaia – Pa.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA, Campus Conceição do Araguaia, Pará, 2018.

MELO, M.**;** BRETAS, P. R; FONSECA, M; BASTOS, S. **A Engenharia e a Sustentabilidade.** Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais – CREA-MG, Belo Horizonte, 2018.

NASCIMENTO, L. G.; **Influência da Adição de Nanotubos de Carbono nas Propriedades Mecânicas da Liga Al-2%Ni Solidificada Direcionalmente**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), PRODERNA/ ITEC. - Universidade Federal do Pará-UFPA, 2015.

OLIVEIRA, E. R. **Correlação entre Microestruturas e Propriedades Mecânicas de Ligas Al- Mg Solidificadas Unidirecionalmente**. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - PPGEM - Universidade Federal da Paraíba, 2017.

OLIVEIRA, I. N.; **Caracterização Mecânica do Alumínio Reciclado como fundido.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Caraúbas, Rio grande do Norte, 2019.

PESSOA, L. F. - **Influência da Microestrutura de Solidificação na Resistência à Corrosão da Liga Al-Mg-Si**. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PRAZERES, E. R. **Avaliação da Modificação da Liga Base Al – Cu – Fe – Mg por Teores de Ni e Ti quanto a Caracterização Estrutural, Elétrica e Mecânica, a partir de Ligas Solidificadas em Molde "U**". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará – UFPA, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016.

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

PIMENTA, A. A. S. **Influência dos Teores de Mg, Sr e Ti nas Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio A319**. Dissertação (Mestrado em engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFT, MG), 2017.

PORTAL ALUMINIO – **Empresas de Fundição.** 2021. Disponível em: https://www.portalaluminio.com.br/empresas-de-fundicao. Acesso em: 16 mar. 2021.

RECICLOTECA. **Material Reciclável**. Centro de Informações sobre Reciclagem e Meio Ambiente. 2020. Disponível em: < www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/metal/aluminio >. Acessado em: 24 mar. 2020.

REIS, I. N. S. F. **Influência da Granulometria nas Propriedades Reológicas da Polpa de Bauxita Pós Beneficiamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, 2015.

REVISTA ALUMINIO – **Brasil recicla 97,4 % das latas de alumínio produzidas em 2020**. 2021. Disponível em: https://revistaaluminio.com.br/brasil-recicla-974-das-latas-de-aluminio-produzidas-em-2020/. Acesso em: 08 ago. 2021.

REVISTA ALUMÍNIO – **Ball Corporation divulga metas globais de Sustentabilidade**. 2021. Disponível em: https://revistaaluminio.com.br/ball-corporation-divulga-metas-globais-de-sustentabilidade/. Acesso em: 12 jul. 2022.

REVISTA DA LATA - **Desempenho do Setor no Brasil em 2017**. 2018. Disponível em:http://www.abralatas.org.br/wpcontent/uploads/2018/06/Abralatas_RevistaDaLata_ed2018.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2020.

RODRIGUES, D. C. G. A.; BRAGA, P. S.; SILVA, Camila D. S.; IGNÁCIO, L. M. C.; COZZOLINO, S. J. O.; ARANTES, S. P.; JUNIOR, R. G. S.; PEREIRA, A. C. C.; **Coleta Seletiva No Unifoa–Implantação de Processo Piloto no Prédio 18: Sensibilização da Comunidade Interna sobre Resíduos Sólidos.** Engenharia na prática: importância teórica e tecnológica cap. 07, pag. 64 - Editora Atena. 2020.

SANJAD, H. C. **Reciclagem como Alternativa para a Eficiência e Sustentabilidade Econômica no Setor de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Belém – Pa**. Dissertação (Mestrado. em Engenharia Civil - PPGEC) – Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, 2018.

SANTANA, F. D; PAREDES, N. C; NERY, R. B; SILVA, R. P. **Elaboração de um Kit Didático para Aulas Práticas de Fundição.** Projeto Eletromecânico (Obtenção parcial do título de técnico em eletromecânico) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFBA), Campus Santo Amaro, Santo Amaro, Bahia, 2015.

SANTOS, T. B. F. **Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos em Uberlândia (Mg): Desafios e Possibilidades de Boas Práticas para uma Cidade Sustentável**. Dissertação (Mestrado em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador - PPGAT) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais,2019.

SILVA, D. C. C. **Estudo Sobre a Vulnerabilidade Sócio-Ambiental no Município de Alumínio, São Paulo, a partir da Poluição do Ar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, P. H. E. **Influência da Liga Al-Ti na Estrutura de Solidificação de uma Peça Fundida**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET - MG, 2015.

SOUZA, J. R. P. **Efeitos Da Sinterização e Moagem de Alta Energia a Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas em Ligas de Alumínio Recicladas a partir de Latas de Bebidas**. Dissertação (Mestrado.em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – Rio Grande do Norte, 2017.

SOUZA, N. C. O; LIMA, P. L. **Estudo Comparativo entre a Fabricação de Latas de Alumínio a partir do Alumínio Primário e do Alumínio Reciclado.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, São Paulo, 2015.

VOTORANTIM – **Palestra: "Sustentabilidade na Mineração"** 2020. Disponível em: http://voluntarios.votorantim.com.br/escola/pagina/6314. Acesso em: 20 mar. 2020.