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

LARISSA CORRÊA AFONSO

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGA DE ALUMÍNIO AA8011 RECICLADO DE EMBALAGEM PÓS-CONSUMO DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

ANANINDEUA-PA
2019

LARISSA CORRÊA AFONSO

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGA DE ALUMÍNIO AA8011 RECICLADO DE EMBALAGEM PÓS-CONSUMO DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS.

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

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

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

ANANINDEUA-PA
2019

LARISSA CORRÊA AFONSO

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGA DE ALUMÍNIO AA8011 RECICLADO DE EMBALAGEM PÓS-CONSUMO DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS.

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

Data da Avaliação[2]: _____/_____ / _____

Conceito:_____

BANCA EXAMINADORA:

_____

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

_____

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

_____

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

_____

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

Tudo tem o seu tempo determinado, e há
tempo para todo o propósito debaixo do céu.

.Eclesiastes 3:1

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a vida, me dar sabedoria, discernimento e paciência na elaboração deste trabalho. Tudo que tenho na vida foi conquistado com a Tua bênção e por isso Te agradeço todos os dias. Obrigado, meu Deus!

Ao meu filho, Bernardo Afonso, que foi meu alicerce e a minha força durante a minha graduação, que esteve ao meu lado nas horas boas e ruins. Você é fonte de inspiração da minha vida, você me motivou a ser generosa, você me fez crescer como ser humano, me fez querer ser uma pessoa melhor, tudo que tenho e faço, vai ser sempre por você e pra você.Obrigado por tudo.

Aos meus pais, Paulo Cesar Serrão Afonso e Gracilene Corrêa Afonso, pela força e incentivo durante todo esse percurso, obrigada pelo investimento na minha educação e a oportunidade de realizar meus estudos mediante a tantas dificuldades, vocês são meus heróis.

Ao meu irmão Paulo Cesar S. A. Junior, por acreditar sempre em mim e no meu potencial.

Aos meus amigos que conquistei em todos esses anos, em especial ao Elinaldo Caldas e Elienay Guimarães, que foram meus parceiros de pesquisa e parceiros de curso. Eles foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, obrigada pela força.

Ao meu Orientador Professor Msc. Alacid Neves, que acreditou em mim a todo momento, que abraçou a minha causa e me deu forças e incentivo para continuar. O senhor transmite muita luz, e eu tenho muita sorte de ser sua orientanda. Obrigada pela amizade, companheirismo, apoio necessário.

A minha coorientadora, Raimunda, que foi um anjo na minha vida,brigado por se dedicar ao seu trabalho com tanto entusiasmo e verdade. Você me fez sentir especial e capaz de alcançar meus sonhos. As lições que aprendi com você estarão sempre comigo, você me deu esperança, conhecimento sobre o trabalho e sobre a vida, a senhora e uma guerreira e um exemplo que quero seguir. Obrigada pelos conselhos e paciência diante da nossa caminhada.

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

Ao Laboratório de Metalografia, da Faculdade de Engenharia Mecânica, e em especial aos amigos, Brenda Daniel, Clóvis Santana, Emerson Prazeres e Patrick Honorato, pela disponibilidade de desenvolver as ligas, os ensaios necessários, e por toda a ajuda que foi tão preciosa para o desenvolvimento do meu trabalho laboratorial. Minha eterna gratidão à vocês.

Ao PRODERNA que me deu total suporte.

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

A UFPA, campus Ananindeua em especial a faculdade de ciência e tecnologia, esta instituição tão imponente eu agradeço pelo ambiente propício à evolução e crescimento, bem como a todas as pessoas que a tornam assim tão especial para quem a conhece.

Ao Secretário do curso de Ciência e Tecnologia, Josivan França, pela amizade, profissionalismo e dedicação por sempre ajudar no que fosse possível nas soluções de problemas envolvendo a faculdade. Você é um bom profissional com um grande coração, que vai sempre além das suas obrigações, você é uma pessoa que merece todo respeito e reconhecimento pelo seu trabalho.

Ao coordenador da UFPA *Campus* de Ananindeua, Prof. Dr. Francivaldo Alves Nunes, pela sua gestão, por sempre apoiar os alunos, dando forças e ajudando quando foi necessário. Acima de tudo, por trás dessa função, você é um ser humano admirável, sempre disposto a apoiar e orientar pessoalmente. Obrigada pelo conhecimento, pelas palavras amigas e por ser uma pessoa incrível de coração e de alma.

A todas as pessoas que de uma alguma forma me ajudaram a acreditar em mim eu quero deixar um agradecimento eterno, porque sem elas não teria sido possível.

RESUMO

O alumínio dentre suas inúmeras propriedades pode ser infinitamente reciclado. Neste trabalho foi realizado a obtenção e caracterização de lingotes obtidos da reciclagem de alumínio oriundo de embalagenspós consumo utilizadas na indústria de alimentos, produzidas com a liga AA 8011. As marmitas foram coletadas, higienizadas, cominuídas e fundidas. Os lingotes obtidos foram caracterizados utilizando análises químicas, fluorescência de raios X, Energia Dispersiva de Raios X (EDS). A macro e microestrutura e a propriedade mecânica foram investigadas detalhadamente usando microscopia óptica, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, e ensaio de micro dureza Vickers. Os resultados da caracterização por EDS e de fluorescência de raios X permitiu avaliar a liga como AA8011. A macroestrutura revelou baixo índice de porosidade e pequenas inclusões. A microestrutura apresentou estrutura dendrítica e que se apresenta mais refinada na interface metal molde que no centro do lingote. A microdureza Vickers apresentou resultado de 35,54 HV.

Palavras-chave: Reciclagem. Caracterização. Liga de alumínio. Microestrutura. Liga 8011.

ABSTRACT

Aluminum among its many properties can be infinitely recycled. In this work, the ingots obtained from the recycling of aluminum from post-consumer packaging used in the food industry, produced with the AA 8011 alloy, were obtained and characterized. The boiling pans were collected, sanitized, comminuted and cast. The ingots obtained were characterized using chemical analysis, X-ray fluorescence, X-ray Dispersive Energy (EDS). The macro and microstructure and the mechanical property were investigated in detail using optical microscopy, optical microscopy and scanning electron microscopy, and Vickers microhardness assay. The results of EDS characterization and X-ray fluorescence allow evaluating the alloy as AA8011. The macrostructure revealed low porosity index and small inclusions. The microstructure had a dendritic structure and is more refined at the metal-mold interface than at the center of the ingot. The Vickers microhardness showed a result of 35.54 HV.

Keywords: Recycling. Characterization. Aluminium alloy. Microstructure. Alloy 8011.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da indústria do alumínio no Brasil. 19
Figura 2 - Fluxograma representativo da classificação válida para todas as ligas de alumínio conforme a classificação da *AluminiumAssociation*. 20
Figura 3 - Diagrama de fases binário do sistema Al-Fe. 22
Figura 4 - Diagrama de fases binários do sistema Al-Si. 23
Figura 5–Diagrama de fases ternário A-Fe-Si 24
Figura 6 - Gráfico do consumo per capita de embalagens de alumínio. 25
Figura 7 - Representação esquemática das zonas macroestruturais. 30
Figura 8 - Representação esquemática do crescimento de grãos na região coquilhada e do surgimento de grãos colunares a partir dos grãos coquilhados com orientação favorável. 31
Figura 9 - Representação esquemática da atuação dos fatores de influência na formação das microestruturas de solidificação. 32
Figura 10 - Micrografia da impressão das pirâmides, produzidas pela carga aplicada na amostra da liga Al-Fe-Si no ensaio de microdureza 50x. 36
Figura 11 - Fluxograma das etapas da pesquisa. 37
Figura 12 - Higienização em cuba de ultrassom (a) amostra sendo submersa na solução (b) amostra na cuba deultrassom (c) amostrapronta para a análise. 38
Figura 13 - Material cominuído (a) material pesado (b). 39
Figura 14 - Forno tipo mufla utilizado na fundição. 39
Figura 15 - Cadinho de carboneto de silício (a) cadinho preparado para fundição(b). 40
Figura 16 - Etapas da fundição (a) material prensado despejado no cadinho (b) homogeneização do material (c) vazamento do metal liquido (d) obtenção do lingote. 41
Figura 17 - (a) ilustração do corto do corpo de prova (b) cortadora CMR-60 (c) corpo de prova cortado. 42
Figura 18 - (a) amostra laminada (b) amostra higienizada por ultrassom. 43
Figura 19 – Politriz metalografica, modelo PLO2 E da TECLAGO. 44
Figura 20 - (a) representação do corte para microestrutura, (b)Definição do sentido de caracterização das amostras para análise metalográfica, (c)Corpos de prova de análise embutidos. 45
Figura 21 - Microscópio óptico. 46
Figura 22 - Microscópio eletrônico de varredura. 46
Figura 23 - Microdurômetro. 47

Figura 24 - Micrografia da matéria prima. 48
Figura 25 - Microestrutura da amostra de corte transversal e espectro do reciclado. 50
Figura 26 - Macroestrutura do lingote. 51
Figura 27 - Poros e microtrincas do lingote. 51
Figura 28 - Microestrutura do material reciclado longitudinal 50X. 52
Figura 29 - Microestrutura o material reciclado tranversal 50X. 53
Figura 30 - Típicas microestruturas brutas de fusão para liga de alumínio reciclada. 53
Figura 31 - Micrografia e espectro no contorno do braço dendrítico. 54
Figura 32 - Micrografia e espectro dentro do braço dendrítico. 54
Figura 33 - Micrografia dos defeitos de solidificação. 55
Figura 34 - (a) endentação sob uma inclusão (b) endentação dentro de um braço dendrítico primário. 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do Alumínio. 18
Tabela 2 - Composição química, propriedades e aplicações das series de liga. 21
Tabela 3 - Conteúdo de elementos químicos em ligas de alumínio para embalagens (%). 25
Tabela 4 - Tempo médio de degradação de resíduos na natureza. 27
Tabela 5 - Composição química em % conforme a ABNT. 37
Tabela 6 - Composição química da matéria prima. 48
Tabela 7 - Composição química do material reciclado em %. 50
Tabela 8 - Pontos de microdureza em HV. 55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM- American Society for TestingandMaterials

BSE-detector de elétrons retro espalhados

EDS-Espectrometriade Energia Dispersiva de Raios-X

FRX –Espectrometria de fluorescência de raios X

GL- gradiente de temperaturas

IFPA- Instituto Federal do Pará

ITEC - Instituto de Tecnologia

LABEM - Laboratório de Engenharia Mecânica

LCAM- Laboratório de Caracterização de Materiais da Amazônia

LEQ -Laboratório de Engenharia Química

M_1- Carga de entrada

M_2- Massa do resíduo.

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

MEV –Microscópio Eletrônico de Varredura

mm - Milímetro

NBR - Norma Técnica

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

PVC - Policloreto de vinil

S/L - Sólido e o Líquido

SRC - Super-resfriamento constitucional

T-Taxa de resfriamento

tSL-Tempo local de solidificação

UFPA-Universidade Federal do Pará

vL -Velocidade de solidificação

X-Rendimento da fundição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **15**
1.1 Objetivos **16**
1.1.1 Objetivo Geral 16
1.1.2 Objetivos Específicos 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **18**
2.1 Alumínio **18**
2.1.1 Ligas de Alumínio 20
2.1.2 Liga 8011 ..... **Erro! Indicador não definido.**
2.2 Embalagens de alumínio **24**
2.3 Reciclagem do alumínio **26**
2.4 Fundição **27**
2.5 Solidificação **28**
2.6 Estruturas de solidificação **29**
2.6.1 Macroestrutura 29
2.6.2 Microestrutura 32
2.7 Técnicas de caracterização **33**
2.7.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 33
2.7.2 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) 34
2.7.3 Fluorescência de raios-X 35
2.7.4 Dureza 35
3 MATERIAIS E MÉTODOS **37**
3.1 Materiais **37**
3.2 Métodos **37**
3.3 Coleta seletiva **38**
3.4 Caracterização química do material coletado **38**
3.5 Preparação da matéria prima para fundição **39**
3.5.1 Processo de fundição 39
3.5.2 Preparação do Cadinho 40
3.5.3 Fundição 40
3.6 Obtenções do corpo de prova **41**
3.7 Técnicas de análises químicas **42**
3.7.1 Fluorescência de raios-X 42
3.7.2 Espectroscopia de raio x por dispersão em energia (EDS) 43
3.8 Procedimentos metalográficos **43**
3.8.1 Macroestrutura 43
3.8.2 Microestrutura 44

3.9 Técnicas de observação **45**
3.9.1 Microscopia ótica (MO) 45
3.9.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 46
3.10 Microdureza Vickers **47**
4 RESULTADOS **48**
4.1 Matéria prima **48**
4.2 Composição química da matéria prima. **48**
4.3 Obtenção do lingote **49**
4.4 Composição química do alumínio reciclado **49**
4.5 Macroestrutura **50**
4.6 Microscopia óptica (MO) **52**
4.7 Microscopia eletrônica de varredura **53**
4.8 Microdureza Vickers **55**
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS **57**
REFERÊNCIAS **58**

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o alumínio é o metal não-ferroso mais produzido no mundo e o segundo metal mais utilizado em diversos segmentos da indústria. O alumínio dentre suas inúmeras propriedades pode ser infinitamente reciclado. A reciclagem da sucata de alumínio apresenta interesse comercial porque sua introdução no processo de fabricação leva a economia de energia, benefícios ao meio ambiente, colaboram para o crescimento da consciência ecológica na comunidade, ajuda a melhorar a composição do lixo urbano; é fonte de renda permanente para a mão de obra não qualificada; não necessita de grandes investimentos. Por cada kg de alumínio reciclado são poupados 5 kg de bauxita (minério de onde se produz o alumínio). Para reciclar uma tonelada de alumínio, gasta-se somente 5% da energia que seria necessária para produzir a mesma quantidade de alumínio primário, ou seja, a reciclagem do alumínio proporciona uma economia de 95% na energia elétrica. A reciclagem de uma única lata de alumínio economiza energia suficiente para manter um aparelho de TV ligado durante três horas (JORGE, 2013).

Nos últimos anos, alguns processos foram sugeridos para reciclar sucata de alumínio por várias técnicas como compactação, metalurgia do pó, e re-fusão com ou sem a utilização sal escorificante.

A literatura apresenta informações para a reciclagem de alumínio, evidenciando que o maior objetivo está voltado para a economia, análise do processo e a tecnologia industrial. Vários artigos foram encontrados trabalhando e discutindo a reciclagem de latas de bebidas pós consumo e a escória de alumínio. Existem trabalhos utilizando outros tipos de sucatas de alumínio, que foram fundidas sob diferentes condições experimentais e caracterizadas, entre elas foram citados os resíduos de laminação, lingotes, latas de margarina e tampas de garrafa (MASHHADI, 2009).

O processo de solidificação e as características do material a ser solidificado interferem, diretamente, na formação da estrutura. Eles determinam as propriedades do produto final, não somente no caso dos fundidos que já apresentam uma forma definida, mas também nos produtos que serão trabalhados e/ou tratados termicamente, como no caso de fabricação de fios, chapas e forjados. Embora alguns defeitos da estrutura bruta possam ser eliminados durante etapas de conformação, a grande maioria permanece no produto acabado. Estas peças, , apresentam características mecânicas que dependem de aspectos descritos na macroestrutura e na microestrutura resultantes, como tamanho de grão, espaçamento celular ou dendrítico e defeitos como: heterogeneidade de composição química, tamanho e forma das

inclusões, porosidade, que são dependentes das condições de solidificação, e afetam as propriedades mecânicas, elétricas e químicas das peças fabricadas (ROSA, 2007).

Os tipos de microestruturas brutas de solidificação formadas estão fortemente relacionados com a modificação da interface entre o sólido e o líquido (S/L) durante o processo de solidificação que pode passar da forma planar, típica dos metais puros, ou concentrações eutéticas em ligas, para estruturas celulares e dendríticas. A segregação de soluto ou do solvente provoca o aumento dos seus teores no metal líquido, à frente da interface de solidificação, o que favorece a instabilização da interface plana. Essa segregação conduz, juntamente com a velocidade de solidificação (vL), o gradiente de temperaturas (GL), ao super-resfriamento constitucional, responsável pelas transições que ocorrem a partir da interface de solidificação (GARCIA, 2001).

No que tange a estrutura resultante dos produtos fundidos, um dos principais fatores que causam defeitos na fundição de ligas de alumínio é a presença de poros que afetam diretamente as características mecânicas desses materiais. Em geral, a influência dos poros nas propriedades mecânicas está relacionada ao seu tamanho, forma e distribuição. A porosidade resulta de uma combinação de dois fatores: contração da liga e precipitação de gases dissolvidos. Em especial para as ligas de alumínio, o hidrogênio é o principal gás causador de porosidade. A porosidade também tem um efeito deletério sobre a usinabilidade e propriedades da superfície de fundidos de alumínio (WEILER;WOOD, 2009) (WHITESELL;OVERFELT, 2001).

No caso de ligas ternárias, a principal dificuldade está relacionada com a determinação do caminho da solidificação. A macrossegregação é fundamental na determinação da porosidade ao longo do lingote devido ao impacto resultante sobre a densidade local (GOMES, 2012).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui como objetivo geral caracterizar a microestrutura e a macroestrutura do alumínio reciclado por fusão de embalagens descartáveis de alumínio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coleta da marmitex;
- Caracterização qualitativa e semi-quantitativa da matéria prima utilizando MEV;
- Obtenção de um lingote de alumínio reciclado por fusão;
- Caracterização qualitativa e semi-quantitativa da liga de alumínio reciclado MEV;
- Caracterização microestrutural da liga de alumínio reciclado;
- Fluorescência de raios-X;
- Ensaio mecânico de microdureza do alumínio reciclado;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado os temas, baseados na literatura, sobre os processos de obtenção do alumínio, assim como suas propriedades, aplicações e reciclagem. Dando ênfase ao sistema ternário Al-Fe-Si, liga AA8011. Serão abordados também os métodos de caracterização microestrutural e a reciclagem a partir da fusão de embalagens de alumínio pós-consumo da indústria alimentícia.

2.1 Alumínio

O alumínio é um dos metais mais abundante na crosta terrestre, constituído por 8% dela. Porém, ele não se encontra naturalmente em forma metálica, esse metal éencontrado na forma de óxidos e hidróxidos de alumínio, encontrados no minério debauxita (MACHADO, 2011).

A maior parte das bauxitas contém entre 40 a 60 % de alumina e para a produção de uma tonelada de alumínio são necessárias quatro toneladas de bauxita, as quais produzem 1,9 toneladas de alumina.O processo de obtenção da alumina é o processo Bayer. Esse processo foi desenvolvido e patenteado por Karl Josef Bayer, em 1888, na Áustria, e foi considerado o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna. A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina calcinada em cubas eletrolíticas, a altas temperaturas, no processo conhecido como Hall-Héroult.Este processo foi desenvolvido em 1886 por dois cientistas que trabalharam independentemente, Charles Martin Hall, nos Estados Unidos e Paul Louis Héroult, na França (ABAL, 2007). Um resumo das principais características físicas do alumínio puro é apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Propriedades do Alumínio.

Propriedades Físicas	Alumínio	Unidades
Densidade	2,71	g/cm^3 (20 °C)
Temperatura de Fusão	660	°C
Módulo de Elasticidade	69000	MPa
Coeficiente de Expansão Linear	23×10^{-6}	m/°C
Condutividade Térmica	0,56	cal/cm °C (25 °C)
Condutividade Elétrica	62	(IACS)%

Fonte - MetalsHandbook Vol. 2, ano?

Suas excelentes propriedades físico-químicas – entre as quais se destacam o baixo peso específico, resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, e a leveza é uma das principais características do alumínio, seu peso específico é cerca de 2,70 g/cm^3, e a infinita reciclagem apresenta uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal não ferroso mais consumido no mundo (ABAL, 2007).

Apesar de sua grande versatilidade, o alumínio apresenta certas limitações quando se refere à resistência mecânica, uma vez que seu módulo de elasticidade é relativamente baixo em comparação aos materiais estruturais, como o aço e o cobre; mas suas propriedades mecânicas podem ser melhoradas com a adição de elementos de liga (DANTAS, 2013). O alumínio tem apresentado um dos maiores crescimentos de consumo, entre os diversos metais utilizados industrialmente, tornando-se, na atualidade, a segunda indústria metalúrgica do mundo, superada apenas pela indústria do aço (MALAVAZI, 2008). Na Figura 1 tem-se o mapa da indústria do alumínio no Brasil.

Figura 1 - Mapa da indústria do alumínio no Brasil.

Fonte - ABAL, 2007.

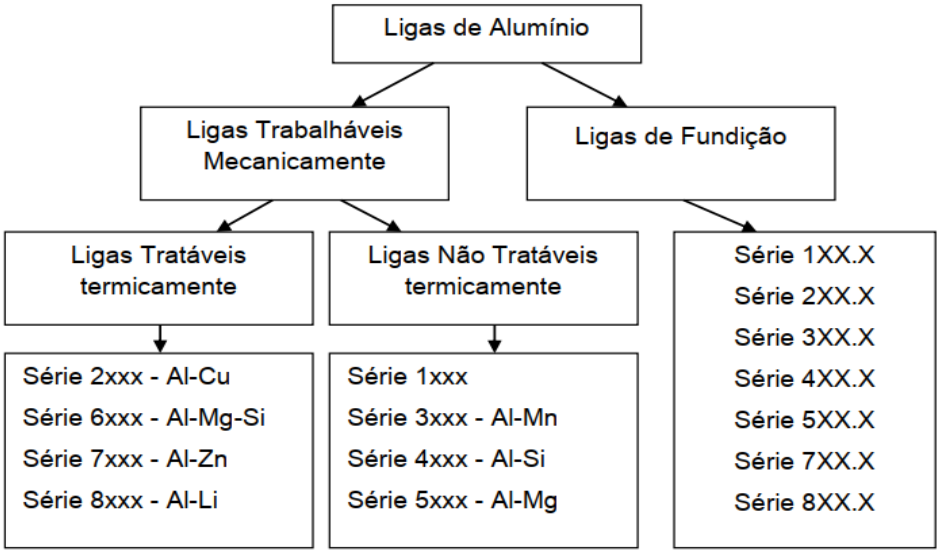
2.1.1 Ligas de Alumínio

Através da adição controlada de alguns elementos, muitas propriedades do alumínio podem ser melhoradas, ampliando desta forma sua aplicação industrial. É possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação ao produto final. Ao serem produzidas ligas, pode-se obter uma grande variedade de combinações melhorando por exemplo: resistência mecânica, resistência à corrosão, condutibilidade térmica, condutibilidade elétrica, usinabilidade, conformabilidade, ductibilidade, entre outras propriedades e características (DAVIS,1993).

O sistema de classificação das ligas de alumínio adotado pela *AluminiumAssociation* em 1971 é o mais aceito atualmente (DAVIS, 1993). Esse sistema subdivide-se em duas partes: a primeira, adotada para as ligas utilizadas em trabalhos mecânicos, ou seja, em processos de conformação, tais como laminação, extrusão, forjamento, estampagem entre outros, e a segunda que foi adotada para ligas destinadas exclusivamente à produção de peças fundidas.

As ligas de alumínio utilizadas em trabalhos mecânicos são subdivididas em dois subgrupos: as ligas tratáveis termicamente, de maior resistência mecânica, e as ligas não tratáveis termicamente, cuja resistência só pode ser aumentada através do trabalho a frio. Na Figura 2, é apresentado um fluxograma representativo da classificação válida para todas as ligas de alumínio conforme a classificação da *AluminiumAssociation*.

Figura 2 - Fluxograma representativo da classificação válida para todas as ligas de alumínio conforme a classificação da *AluminiumAssociation*.



Fonte – Yoshkawa (2015).

As ligas tratáveis termicamente podem ser trabalhadas a frio e, posteriormente, sofrer o tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica. O principal mecanismo de aumento de resistência mecânica desta classe de ligas é o endurecimento por precipitação coerente. Enquanto as ligas não tratáveis termicamente podem ser submetidas a tratamentos térmicos de estabilização e recozimentos plenos ou parciais. (DAVIS, 1993; GOMES;BRESCIANI, 1976).

As composições químicas das séries de ligas e suas principais aplicações estão apresentadas de forma simplificada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química, propriedades e aplicações das series de liga.

Tipo de Liga	Principal Elem. Liga	Propriedades	Aplicações
1XXX	Pureza > 99,00% de Al	• Excelente resistência a corrosão; • Alta condutividade térmica e elétrica; • Baixas propriedades mecânicas.	• Fins elétricos, peças ornamentais, tanques para indústria química, refletores e luminárias, panelas estampadas.
2XXX	Cobre	• Requer trabalho térmico para otimização das propriedades; • Propriedades mecânicas parecidas com as do Aço de baixo carbono; • Baixa resistência a corrosão.	• São comumente utilizadas em rodas de automóveis e aeronaves, fuselagem de aviões e peças estruturais que requerem boa resistência a temperaturas acima de 150ºC.
3XXX	Manganês	• Não tratável termicamente; • Possuem 20% mais resistência mecânica que 1XXX.	• Embalagens descartáveis (forma de pizza), utensílios domésticos (panela de pressão), base de lâmpadas, ilhoses, Corpos de latas de bebidas, entre outros.
4XXX	Silício	• Não tratável termicamente; • Possuem um baixo coeficiente de expansão térmica; • Alta resistência mecânica e a abrasão.	• Pode ser utilizado na produção de peças forjadas, pistões, metal de adição para soldas e utensílios de cozinha.
5XXX	Magnésio	• Não tratável termicamente; • Boa soldabilidade; • Boa resistência a corrosão em atmosfera marinha.	• Telhas, forros, carrocerias, isolamento térmico, barcos, tampas de latas de bebida, indústria naval, etc.
6XXX	Magnésio e Silício	• Boa maleabilidade; • Boa soldabilidade; • Boa resistência mecânica e de corrosão.	• Latões de leite, peças de alta solicitação mecânica, chapa grossa, etc.
7XXX	Zinco	• Tratável termicamente; • Possuem boa resistência à corrosão.	• Quadro de bicicleta, bereta, chassis de veículos.
8XXX	Ferro e Silício	• Ótima formabilidade e uma boa resistência mecânica.	• Tampas metálicas para indústria farmacêutica, folhas finas e media, embalagens descartáveis (marmita).

Fonte - Adaptado de Ferrari (2008)

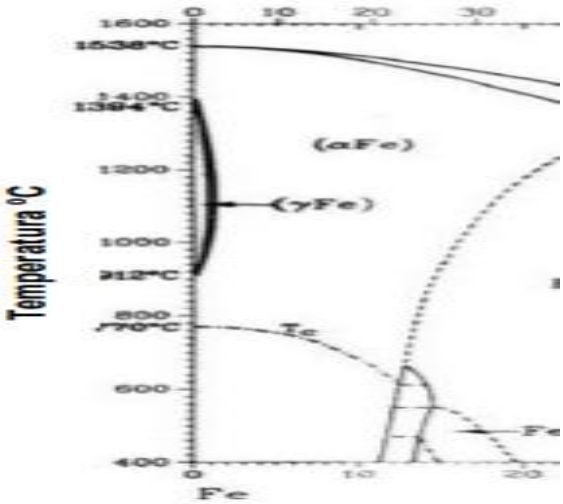
A liga AA8011 é uma das mais versáteis ligas de alumínio comercializadaatualmente e possuindo um enorme potencial para aplicações em produtos derivados de chapa e folhas finas. Como qualquer liga, suas transformações microestruturas são totalmente dependentes das condições iniciais de vazamento no processo de lingotamento contínuo, das condições termodinâmicas do processo e da composição química (ALMADA, 2014)

Em chapas obtidas através de processos industriais, a solidificação ocorre em condições fora do equilíbrio termodinâmico e, portanto, diferentes fases ternárias podem estar presentes após a solidificação (GHOSH, 1992; MONDOLFO, 1976).

O ferro e o silício são as impurezas mais comuns em alumínio e suas ligas. Os diagramas de fase binários Al-Fe, Al-Si e o ternário Al-Fe-Si podem auxiliar no estudo, no controle e na localização de diferentes fases sólidas através da combinação dos seus respectivos elementos em equilíbrio termodinâmico (SOUZA, 2012).

O elemento ferro possui alta solubilidade em alumínio na fase líquida, porém em alumínio sólido, a solubilidade do ferro é baixa, com limite máximo de 0,05% a 655 º como pode ser observado no detalhe do diagrama Al-Fe apresentado na Figura 3.

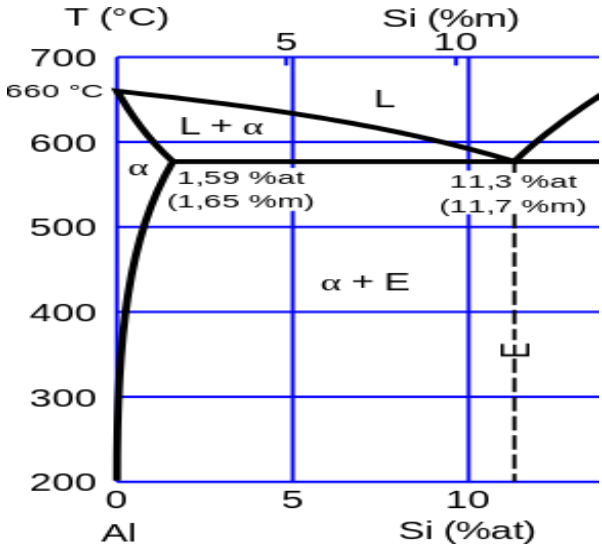
Figura 3 - Diagrama de fases binário do sistema Al-Fe.



Fonte - Infomet (2019).

O silício é considerado soluto de solubilidade intermediária em alumínio na fase sólida, entre 1 e 10 % atômico, a solubilidade é de 1,65% a 577 ºC (HATCH, 1984; MONDOLFO, 1976; PADILHA; PLAUT, 2003). Deste modo, acima dos limites de solubilidade, os microconstituintes (compostos intermetálicos) precipitam nos contornos de grãos e nos contornos ou paredes de células de discordâncias (TOTTEN e MACKENZIE, 2003). Na figura 4 pode-se observar o diagrama de fases binário do sistema Al-Si.

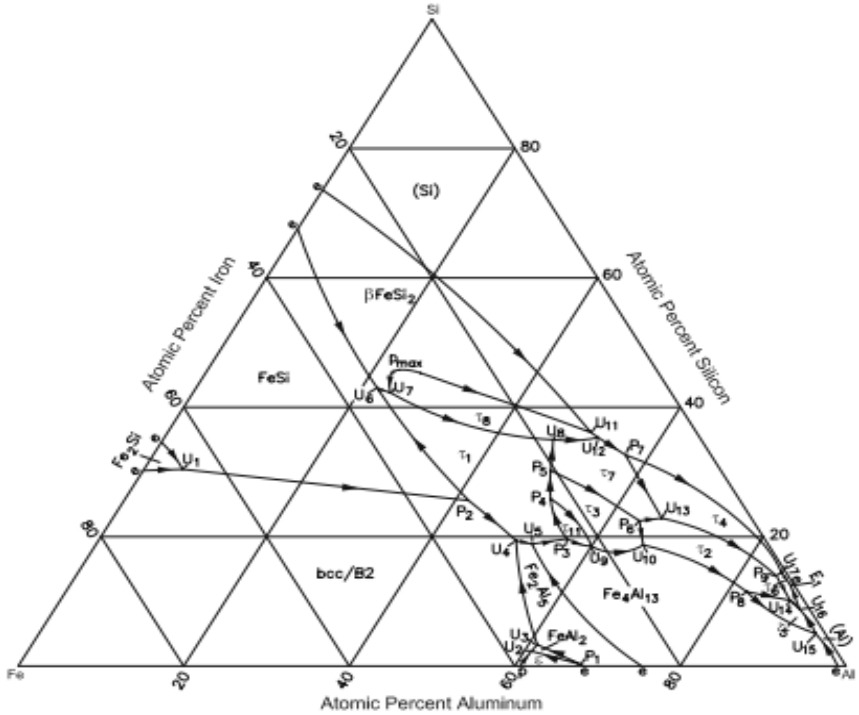
Figura 4 - Diagrama de fases binários do sistema Al-Si.



Fonte – Bollada (2017).

Em uma revisão realizada por Raghavan (2009), para ligas do sistema Al-Fe-Si, o autor relata que as ligas de alumínio com composições próximas a 100% de alumínio, ou seja, localizadas na região da borda do Al podem apresentar diferentes fases em suas microestruturas. Ghosh (1992) e Mondolfo (1976), estudando o diagrama ternário Al-Fe-Si na região de maior percentual de Al encontraram diferentes tipos de precipitados. A Figura 5 apresenta o diagrama de fases ternário.

Figura 5–Diagrama de fases ternário A-Fe-Si.



Fonte – Raghavan (2009).

2.2. Embalagens de alumínio

O alumínio é um material não ferroso muito leve, fácil de transformar e com boa resistência à oxidação atmosférica. É utilizado nas mais variadas formas, como embalagens rígidas (latas), embalagens semirrígidas (formas e bandejas), embalagens flexíveis (sacos e caixas) associadas a plástico e/ou papel e folha de alumínio. Devido à energia despendida na sua produção, o alumínio é, no entanto um metal de custo elevado. (JORGE, 2013)

As embalagens de alumínio são mais leves, duráveis e resistentes à corrosão que osoutros materiais, características ideais para garantir a integridade de alimentos, bebidas, medicamentos e cosméticos durante seu transporte, armazenagem e consumo. Por ser atóxico e uma excelente barreira contra luz, umidade e impurezas, o alumínio protege e aumenta a vida útil dos produtos embalados, aumentando seu acesso à população. Além disso, as embalagens de alumínio são totalmente recicláveis, infinitamente, o que diminui a geração de resíduos e não agride o meio ambiente. (ABAL, 2012)

O alumínio para contato alimentar não é utilizado na sua forma pura, mas na forma de liga, ou seja, combinado com elementos como Mn, Mg, Si, Cu, Cr, etc. que melhoram suas características mecânicas e de resistência à corrosão (Tabela 3.). Estas ligas apresentam teor de alumínio ou pureza comercial da ordem dos 98,0% a 99,8% (JORGE, 2013).

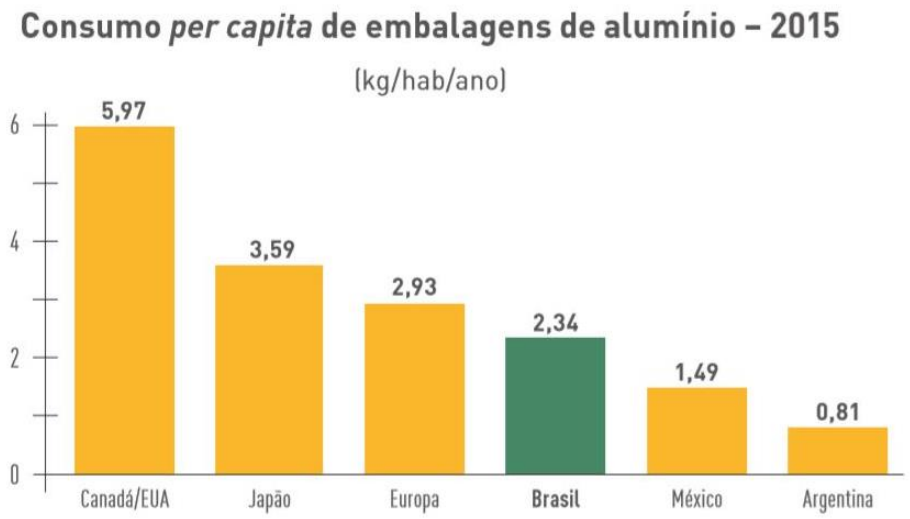
Tabela 3 - Conteúdo de elementos químicos em ligas de alumínio para embalagens (%).

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
3004	0,3	0,7	0,25	1-1,4	0,8-1,3
3003	0,3	0,6	0,1	1,2	
3105	0,2	0,4	0,1	0,2-0,7	0,4
5182	0,2	0,3	0,1	0,2-0,7	4-5,5
5052	0,4	0,7	0,15	0,1	2,2-2,8
8011	0,5	0,8	0,1	1,2	

Fonte - Poças, Selbourne e Delgado (2003).

O mercado de embalagens no Brasil demandou cerca de 480 mil toneladas de alumínio em 2015, volume próximo do ano anterior, o que representou cerca de 37% do total de alumínio consumido, com predominância das latas, com cerca de 85%. A média mundial desse segmento representa cerca de 15% do total de alumínio consumido. Em termos de consumo per capita, observamos no quadro abaixo que o Brasil ainda tem um grande potencial de crescimento, mesmo comparado a países com renda per capita similar, como é o caso do México como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Gráfico do consumo per capita de embalagens de alumínio.



Fonte - Entidades internacionais e cálculos ABAL (2015)

Independentemente do tipo e finalidade, as embalagens que utilizam o alumínio têm uma enorme versatilidade nos formatos e acabamentos, podendo ser revestidas, laminadas,

impressas, cortadas, formadas a frio e em relevo. A propriedade de barreira, conferida pelo alumínio, evita que alimentos e medicamentos sejam afetados pela luz, ar, umidade, microrganismos, gases, óleos, gorduras, compostos voláteis e vapor, permitindo o armazenamento por longos períodos e reduzindo as perdas. Além disso, são atóxicas, resistentes à temperatura, tem boa condutividade térmica, durabilidade, baixo peso e são infinitamente recicláveis.

As necessidades crescentes de alimentos para uma população em expansão representam um desafio permanente, principalmente considerando recursos naturais limitados como terra, água e energia. Reduzir as perdas de alimentos é uma das estratégias que ganha cada vez mais importância junto aos governos e à indústria. O relatório Foresight. *The Future ofFoodandFarming Final Project Report*estima ser possível reduzir à metade as perdas dos alimentos ao longo de sua cadeia de valor, que hoje está em cerca de 30%. As embalagens sustentáveis, com a ajuda da barreira que o alumínio oferece, podem assumir um papel protagonista no rol de soluções inovadoras de estocagem, transporte e acondicionamento (ABAL, 2015).

2.3 Reciclagem do alumínio

A economia foi construída, por muito tempo, com base no consumo. Produtos cada vez mais descartáveis tomaram as prateleiras dos mercados e a economia passou a seguir uma linearidade: o recurso natural vira matéria-prima, é transformado pela indústria, consumido, descartado e destinado a um lixão.

Várias são as vantagens dos processos de reciclagem, como a minimização do impacto ambiental e redução da energia utilizada no processo, já que não é necessário extrair o minério que dá origem ao metal, a diminuição da poluição no solo, na água e no ar, a redução do custo dos materiais e a geração de empregos, como por exemplo, as cooperativas de catadores (MACHADO et al., 2001).

Outro importante benefício para a reciclagem é a reutilização de alguns materiais que apresentam longo período para sua decomposição, isso leva aos lixões, aterros e o meio ambiente sofram com demasiada quantidade com esses poluentes, uma vez que esse material não se deteriora rapidamente, ocorrendo assim um acumulo de dejetos em lixões ou aterros (ZAPAROLLI, 2008). Na Tabela 4 têm-se alguns exemplos do tempo de decomposição de algumas matérias.

Tabela 4 - Tempo médio de degradação de resíduos na natureza.

MATERIAL	TEMPO MÉDIO DE DEGRADAÇÃO
Madeira	13 anos
Metal	Mais de 100 anos
Alumínio	100 a 500 anos
Plástico	250 a 450 anos
Náilon	Mais de 30 anos
Isopor	80 anos
Papel	3 a 6 meses
Caixa de papelão	Mínimo de 6 meses
Vidro	1 milhão de anos

Fonte – Adaptado de Zaparolli (2008).

Nota-se que em muitos casos a decomposição do material demora mais de 100 anos. Mas muitos dos materiais que possuem um alto tempo de decomposição podem ser reciclados. Como o vidro, que demora a se decompor cerca de um milhão de anos, mas em contra partida pode ser reutilizado na reciclagem centenas de vezes, ou o alumínio, que demora mais de cem anos para se decompor, porem pode ser reciclado diversas vezes (ZAPAROLLI, 2008)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos foi instituída em 2010 (Lei nº 12.305/10) e nela foram previstas ações para diminuir a geração de resíduos, incentivar a reciclagem e reutilização dos produtos, além de outras ações para o manejo dos resíduos. No mesmo ano, foi fundada a *Ellen MacArthurFoundation*, instituição focada em incentivar a economia circular, modelo que se opõe à economia que temos hoje. Nele, ao invés dos produtos serem descartados após o uso, eles são reutilizados, voltam para a indústria ou passam por processos de reciclagem (ABAL, 2015).

2.4 Fundição

A fundição é um dos procedimentos mais antigos utilizados na produção de artigos de metal e consiste na alimentação do metal líquido na cavidade de um molde com o formato requerido, seguindo-se de resfriamento para produzir o produto desejado após a solidificação.

As ligas de alumínio fundidas diferem das ligas conformadas pela ausência de qualquer tipo de conformação mecânica em seu processamento, ou seja, são obtidas diretamente do líquido por meio de processos de fundição. Do ponto de vista de fundição, as ligas de alumínio caracterizam-se pela baixa temperatura de fusão. Por outro lado, esta

característica permite uma grande flexibilidade quanto aos tipos de moldes utilizados já que as solicitações térmicas são reduzidas (MOREIRA, 2012).

Para a fundição de metais existem vários processos de fabricação. Os processos de fundição podem ser classificados pelos tipos de moldes e modelos utilizados (FERREIRA, 1999). São comuns os moldes de areia (a verde ou aglomerados com resinas ou silicatos), moldes metálicos (fabricados em aços ou ferros fundidos), moldes de gesso, moldes de materiais cerâmicos, fundição de precisão e processo "*shaw*", entre outros.

Os moldes ditos permanentes, fabricados em materiais metálicos, são os preferidos para grandes produções por minimizarem os custos de moldagem e permitirem a obtenção de excelente acabamento superficial. Entretanto, o custo do ferramental é elevado e torna proibitiva sua aplicação em séries inferiores a 10000 peças. Para séries menores, os processos de areia, gesso e de moldes cerâmicos são mais indicados.

Nestes processos, a menor velocidade de resfriamento das ligas favorece o desenvolvimento de microestruturas grosseiras e o aumento do volume de micro porosidades, prejudicando a qualidade metalúrgica dos componentes.

Além do material de moldagem, é importante diferenciar os processos de fundição pela forma de vazamento do metal, podendo ser: por gravidade; sob pressão ou contra a gravidade com baixa pressão. Em relação a este aspecto, o vazamento por gravidade e, principalmente, o feito sob pressão impõe turbulência ao fluxo de metal, gerando e incorporando inclusões de óxidos. Os moldes metálicos apresentam algumas vantagens sobre a fundição em moldes de areia. As principais são: melhor acabamento superficial, melhores tolerâncias dimensionais; permitem reduzir o sobre-metalde usinagem; melhor qualidade microestrutural (e mecânica) devido a maior velocidade de resfriamento; menor necessidade de operações de limpeza e rebarbação dos fundidos. (MOREIRA; FUOCO, 2012).

A velocidade de resfriamento até à temperatura de início de solidificação determina o número total de núcleos - ativos - que podem crescer. Quanto maior for a velocidade de resfriamento maior será o número de núcleos e maior o refinamento da microestrutura.

2.5 Solidificação

O fenômeno da solidificação pode ser considerado como um processo de transferência de calor em regime transitório de extração de calor, que contempla as condições necessárias à transformação de fase líquida na fase sólida (S/L). Nessas condições, o calor latente liberado é removido através do sistema metal/molde, tendo uma relação direta com a velocidade de

solidificação, gradientes de temperatura e taxas de resfriamentos, por conseguinte, com a macroestrutura e microestrutura (DIAS, FILHO, 2013).

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

Quando a solidificação do metal estiver completa, os cristais formados irão possuir diferentes orientações, juntando suas fronteiras formando os contornos de grãos, que são as zonas de contado entre os diferentes cristais formados no metal solidificado. O número de núcleos disponíveis na solidificação afetara diretamente a estrutura do grão metálico. Se o número de pontos de nucleação for relativamente pequena, a solidificação produzirá uma estrutura com a formação de grãos maiores proporcionado uma estrutura grosseira. No caso de uma solidificação com um maior número de pontos de nucleação, a formação dos cristais se dará num maior número de pontos formando uma estrutura policristalina, um grão mais fino. A maior parte das ligas de engenharia vazada busca obter uma estrutura de formação de grão mais fina, já que essa estrutura proporciona uma resistência mecânica e uniformidade mais desejável para os produtos acabados (ALMADA, 2014).

2.6 Estruturas de solidificação

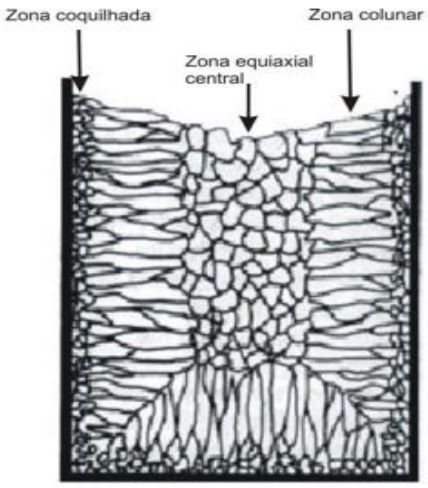
A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final que deve atender certas exigências, que dependem de sua aplicação futura, e que decorrem de aspectos estruturais e geométricos. As características mecânicas desse produto dependem do tamanho do grão, espaçamentos dendríticos, espaçamentos lamelares ou fibrosos, heterogeneidades de composição química, do tamanho das inclusões e porosidade. Essa conjunção de transferência de calor e massa irá impor condições que determinarão a morfologia de crescimento e o arranjo microestrutural (GARCIA, 2011).

2.6.1 Macroestrutura

Segundo Garcia (2011), a estrutura bruta obtida através do processo de solidificação é constituída por etapas subsequentes a partir da fusão até a formação de núcleos sólidos no material líquido, o crescimento destes grãos são favoráveis por sítios ou crescimento livre, na

qual irão formar a macroestrutura da peça. Na grande maioria das situações práticas é desejável que as estruturas brutas de solidificação se apresentem na forma de grãos equiaxiais. A composição química da liga e a taxa de resfriamento, influencia o tipo e o tamanho dos grãos. Pode-se definir a macroestrutura de um material como sendo a distribuição, orientação, forma e dimensão dos grãos cristalinos**. (**GOMES**,** 2013). Em peças fabricadas por processo de fundição, a macroestrutura pode apresentar três zonas distintas: coquilhada, colunar e equiaxial central, dependendo das variáveis térmicas de solidificação (GARCIA, 2001) representadas na Figura 7.

Figura 7 - Representação esquemática das zonas macroestruturais.



Fonte – Cruz (2008).

A zona coquilhada é formada por uma camada de pequenos grãos cristalinos finamente dispersos e localizada na superfície do lingote, onde ocorre uma nucleação intensa de orientação aleatória. O tamanho desse grão é influenciado pelas propriedades material do molde, coeficiente de transferência de calor e a temperatura de vazamento do metal (GARCIA, 2001; DANTAS, 2014).

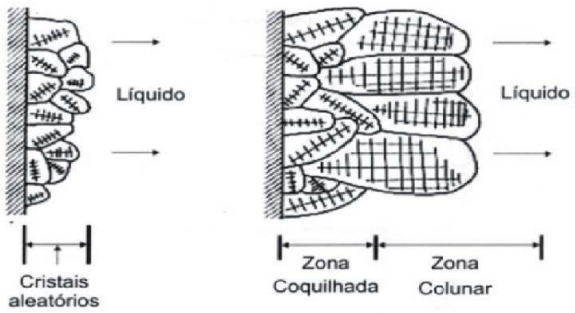
Os grãos coquilhados ocorrem junto às paredes do molde, resultado do primeiro contato do metal líquido com o molde frio durante o vazamento. As altas taxas de resfriamento provocam uma rápida diminuição local da temperatura, o que favorece uma nucleação intensa de grãos. O decréscimo da temperatura ocasiona um super-resfriamento térmico e com isso os primeiros grãos cristalinos começam a se desenvolver pequenos e quase sempre uniformes, constituindo uma fina camada junto às paredes do molde (OHNO, 1970).

Após a formação da região coquilhada, os grãos que se desenvolverão são aqueles que estão crescendo a partir das paredes do molde em direção à massa de metal líquido. O metal

líquido, no centro da lingoteira, encontra-se em temperaturas acima da temperatura de transformação (temperatura de fusão ou temperatura *liquidus*), evitando a formação de grãos nessa região nos instantes iniciais. Portanto, os grãos que tiverem direções de crescimento mais coincidentes com a direção de extração de calor, ou seja, perpendicularmente à parede do molde crescerão mais rapidamente, pois a direção preferencial de crescimento dendrítico é próxima dessa direção. Ocorre uma espécie de seleção, na qual só continuam se desenvolvendo os grãos que crescem perpendiculares à parede do molde (GARCIA, 2001).

Os grãos colunares desenvolvem-se a partir dos grãos coquilhados, por meio de crescimento seletivo e preferencial. São os grãos que crescem a partir das paredes do molde em direção ao líquido, tendo sua secção transversal aumentada a medida que a frente de solidificação vai se afastando do molde. Esses núcleos tendem a crescer mais rapidamente que os outros, bloqueando o crescimento dos demais grãos coquilhados, por não terem direções favoráveis de crescimento. Essa região é caracterizada por crescimento de dendritas orientadas(PERES**,** 2005). A Figura8 mostra uma representação esquemática do crescimento dos grãos colunares a partir dos coquilhados.

Figura 8 - Representação esquemática do crescimento de grãos na região coquilhada e do surgimento de grãos colunares a partir dos grãos coquilhados com orientação favorável.



Fonte - Garcia (2001).

O crescimento dos cristais colunares continua enquanto o calor latente de solidificação é progressivamente retirado por condução através do sólido, removendo o super-resfriamento tanto por efeito térmico quanto constitucional do metal liquido e conduzido ao molde, fazendo com que os embriões de sólido ao surgirem cresçam aleatoriamente (GARCIA, 2001).

Diferente do crescimento da zona colunar, a zona equiaxial central é caracterizada por grãos que crescem com direções cristalográficas aleatórias e possuem dimensões bem maiores que os grãos da zona coquilhada (CANTÉ, 2009).

A zona equiaxial,é constituída por grãos cristalinos sem orientações preferenciais e de dimensões relativamente grandes quando comparados aos grãos coquilhados. O crescimento

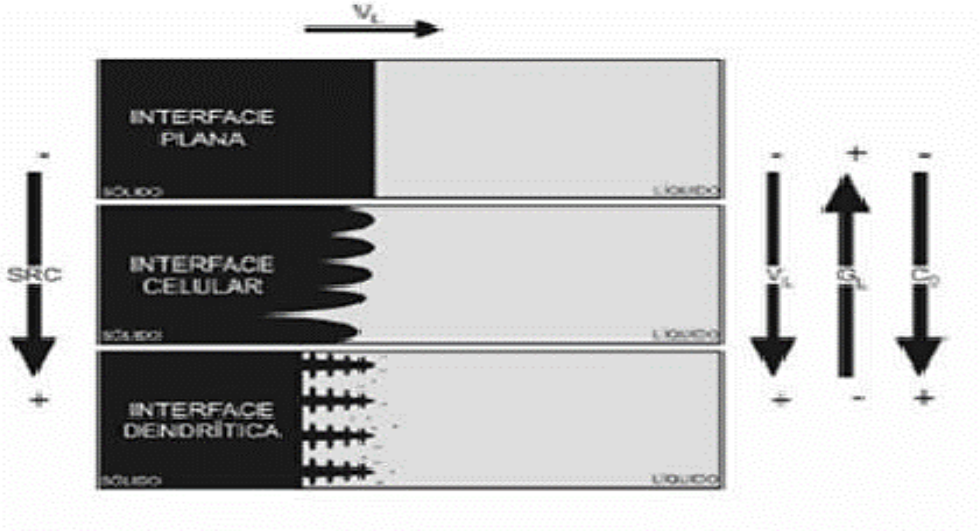
dos cristais colunares continua enquanto o calor latente de solidificação é progressivamente retirado por condução através do sólido. Os núcleos geradores têm várias origens, mas só podem crescer após o líquido ter atingido temperaturas abaixo da *liquidus*(GARCIA, 2001).

2.62. Microestrutura

As microestruturas, que resultam de um processo de solidificação, estão relacionadas com a forma da interface entre o sólido e o líquido. (NASCIMENTO, 2011). A solidificação é regida por duas condições: a de equilíbrio e fora de equilíbrio. Em condições de equilíbrio, o avanço da fronteira sólido /líquido é suficientemente lento para que o soluto rejeitado seja homogeneizado ao volume do líquido por difusão e movimentação do fluido nessas condições a interface permanece plana, típica dos metais puros. No caso de uma solidificação fora de equilíbrio, a velocidade de deslocamento da interface (S/L) é alta o que provoca uma distribuição não uniforme no líquido à frente da interface, originando instabilidade. (CARVALHO, 2016)

Este acúmulo de teor de soluto à frente da fronteira sólido/líquido dá origem a um fenômeno que favorece a nucleação, conhecido na literatura como super-resfriamento constitucional (SRC) (GARCIA, 2011). O aumento do super-resfriamento constitucional causa instabilidades na interface (S/L), originando diferentes morfologias: plana, celular e dendrítica. A instabilidade de uma interface plana ou a passagem para condição de celular, celular-dendrítica e dendrítica, depende das variáveis que compõem o critério do super-resfriamento constitucional, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática da atuação dos fatores de influência na formação das microestruturas de solidificação.



Fonte – Garcia (2007).

A morfologia de solidificação é tipicamente dendrítica e não se altera da superfície a outras posições da peça, exceto pelo tamanho do espaçamento dendrítico. O crescimento das dendritas depende tanto da taxa de solidificação como do gradiente de temperatura. Os braços dendríticos primários crescem na direção dos eixos principais com direção cristalográfica preferencial da estrutura cristalina. Os espaçamentos primários são dependentes do produto do gradiente pela velocidade de crescimento, ou pela taxa de resfriamento. (CARVALHO, 2016)

Os braços dendríticos secundários também dependem da taxa de resfriamento de acordo com a literatura. Formam-se nas proximidades das pontas das dendritas e com poucas ramificações uniformemente espaçadas, sendo fortemente influenciados pelas pela taxa de resfriamento (T) e o tempo local de solidificação (tSL). À medida que se aproximam da raiz da dendríta , esses espaçamentos aumentam, que corresponde à diferença entre os tempos de passagem da isoterma *solidus e líquidos,* por uma determinada posição. Segundo Canté(2009), os espaçamentos dendríticos secundários diminuem com o aumento da taxa de resfriamento, e para ligas hipoeutéticas o aumento do teor do soluto faz com que ocorre uma diminuição do espaçamento secundário. Uma vez nucleadas, as dendritas formam braços secundários que consiste no crescimento lateral da dendrita. Esses braços secundários denominados dendritas secundarias crescem até a formação de uma rede.

Quando a solidificação termina, as dendritas formadas a partir de um mesmo núcleo, são denominadas com grãos. Essa desorientação cristalográfica formada entre os braços das dendritas são acomodados por contornos de grão, que consistem de arranjos de discordâncias. Quando a formação entre dois contornos de grãos possuírem ângulo menor que 15°, esses arranjos são considerados como parte do mesmo grão, já para organizações cristalográficas com ângulos desorientação maiores que 15°, esses arranjos são considerados grãos diferentes (ALMADA, 2014).

2.7 Técnicas de caracterização

As técnicas de caracterização do material reciclado, serão apresentados na sequência.

2.7.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, o que permite solucionar o

problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca.O MEV é um equipamento que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. (DEDAVID, 2007)

A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (NAGATANI et al., 1987).

Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica. As técnicas relacionadas com preparação de amostras para a observação por microscopia óptica ou eletrônica de varredura são denominadas de técnicas metalográficas (METALS HANDBOOK,1985)

2.7.2 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

A técnica de EDS considera o princípio de que a energia de um fóton (E) está relacionada com a frequência eletromagnética (ν) pela relação $E = h\nu$, onde “h” é a constante de Planck. Fótons com energias correspondentes a todo espectro de raios-X atingem o detector de raios-X quase que simultaneamente, e o processo de medida é rápido, o que permite analisar os comprimentos de onda de modo simultâneo.

O detector é capaz de determinar a energia dos fótons que ele recebe. Fica possível, portanto, traçar um histograma com a abscissa sendo a energia dos fótons (keV) e a ordenada o número de fótons recebidos (contagens). O tempo necessário para adquirir o espectro de boa qualidade fica em torno de 2 minutos.

A determinação das porcentagens dos elementos por microanálise de raios-X é uma operação possível no microscópio eletrônico. Existem vários métodos para quantificação dos elementos químicos presentes na amostra, sendo o método mais simples o sem padrões. Neste caso, a análise é denominada semi-quantitativa. O princípio consiste em avaliar a superfície dos picos que é proporcional à quantidade de átomos que produziu a raia. A quantificação consiste, portanto, em medir a superfície dos picos que se tem previamente identificada a ser atribuído um coeficiente e então calcular as porcentagens. (DEDAVID, 2007)

2.7.3 Fluorescência de raios-X

A análise por fluorescência de raios-X é um método qualitativo e quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios-X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra.

Os raios X emitidos por tubos de raios-X, ou raios-X ou gama por uma fonte radioativa, excitam os elementos que constituintes, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (BOUMANS et al., 1989).

Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios-X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X (FILHO, 1999).

2.7.4 Dureza

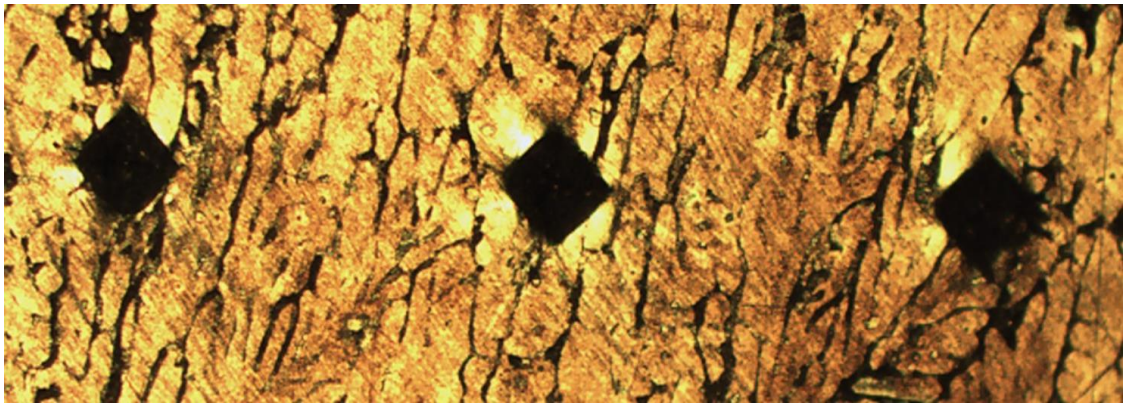
A propriedade mecânica denominada dureza é amplamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Existem várias maneiras de determinar a dureza, sendo as mais comuns a Brinell, a Vickers e a Rockwell.

O ensaio de dureza Vickers usa um penetrador de diamante em forma de pirâmide, aplicado sobre o corpo-de prova com carga conhecida, porém variável. A impressão, assim, tem o aspecto de uma pirâmide, e o valor de dureza é calculado a partir da média das duas diagonais de sua base, que forma um losango regular. Essas diagonais são medidas através de um ocular presente na máquina de ensaio de dureza, como mostra a Figura 10.

A magnitude da carga a ser aplicada no ensaio é função da dureza do material em estudo, gerando uma impressão regular, sem deformação e com tamanho adequado para medição através da ocular do equipamento. A seleção do valor de carga permite ainda a medição da dureza de fases discretas da microestrutura, denominada de microdurezaVickers que devem ser reveladas previamente através de polimento e ataque metalográfico. Neste caso, o valor da carga tem de ser pequeno – 25 a 50g, ou até menos.

A dureza assim medida representa um grande auxílio na identificação de fases ou dos mecanismos metalúrgicos que a geraram. O programa requer os seguintes dados: carga utilizada, e para cada ensaio, o tamanho das duas diagonais da impressão.

Figura 10 - Micrografia da impressão das pirâmides, produzidas pela carga aplicada na amostra da liga Al-Fe-Si no ensaio de microdureza 50x.



Fonte - Elaborada pela autora (2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A matéria prima utilizada para este trabalho foram embalagens de alumínio pós-consumo da indústria alimentícia. As embalagens de alumínio são fabricadas com a liga da série 8xxx, liga AA 8011 e sua composição química nominal é especificada pela norma ABNT- NBR 6834 e os principais elementos de liga são Al-Fe-Si. Na Tabela 5, estálistadoos elementos de composição química para a liga 8011 em percentagem em peso.

Tabela 5 - Composição química em % conforme a ABNT.

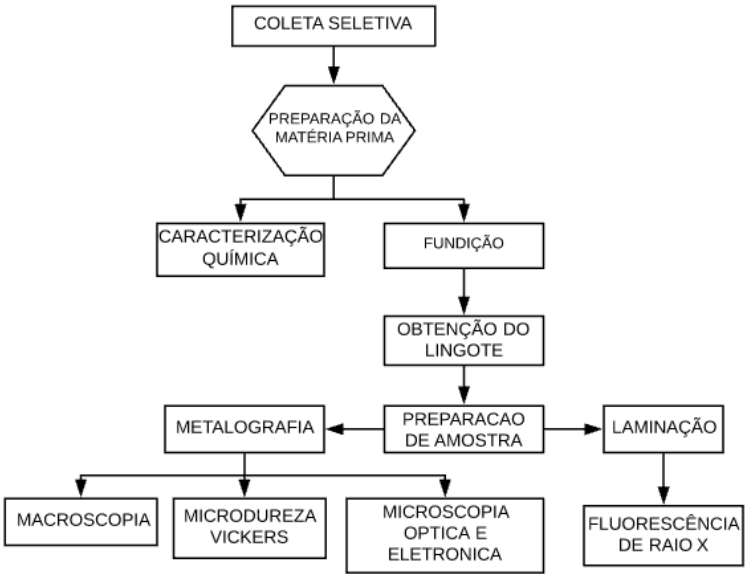
LIGA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Outros	Al
8011	0,50-0,90	0,60-1,00	0,10	0,20	0,05	0,05	0,10	0,05	Rest.

Fonte - ABNT-NBR, 2000.

3.2 Métodos

Neste capitulo é abordado à metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. O fluxograma da Figura 11 apresenta as etapas realizadas na pesquisa.

Figura 11 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

3.3 Coleta seletiva

A coleta foi realizada em uma churrascaria localizada em Belém, na ilha de Caratateua no mês de dezembro. A Presença de clientes no entorno da churrascaria que necessitam fazer a refeição fora das dependências da churrascaria contribuiu para a utilização das embalagens de alumínio, conhecida popularmente como *marmitex*.

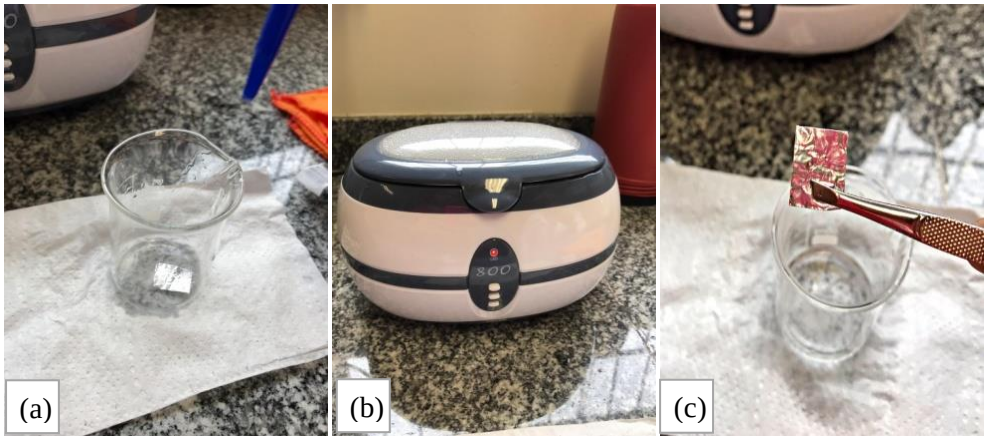
A churrascaria fornece em média 80 refeições por dia, utilizando esse tipo de embalagem. O material foi coletado com ajuda da clientela da referida churrascaria. A higienização foi realizada em três etapas de lavagem utilizando sabão neutro e água quente, para que fossem retiradas as impurezas presentes nas embalagens.

3.4 Caracterização química do material coletado

Foi retirada amostra para a caracterização qualitativa e semi-quantitativa das embalagens pós consumo de alimentos para isso foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi TM 3000, acoplado ao sistema EDS, do MATCAM/PRODERNA/ITEC da Universidade Federal do Pará campus Belém. A amostra retirada com 10 x 10 mm foi submersa em uma solução com 50% de álcool 90 e 50% de água destilada em um Becker de 100 mL.

Este conjunto foi colocado na cuba de ultrassom Afr-800 por dez minutos para melhor higienização, em seguida ela foi seca com jato de ar quente. As etapas dessa ação estão ilustradas na Figura 12.

Figura 12 - Higienização em cuba de ultrassom (a) amostra sendo submersa na solução (b) amostra na cuba deultrassom (c) amostrapronta para a análise.

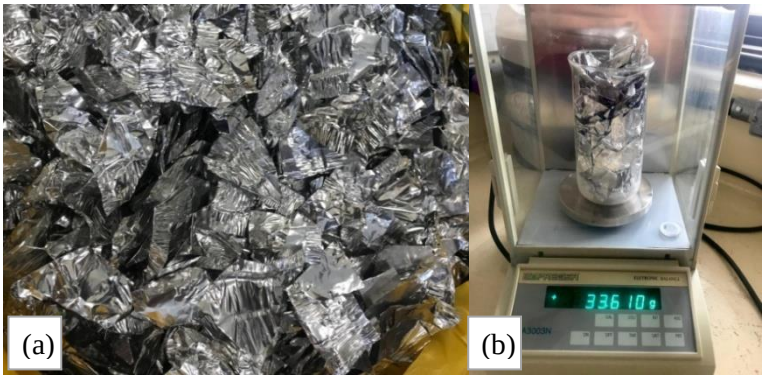


Fonte - Elaborado pela autora (2019).

3.5 Preparação da matéria prima para fundição

No Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Belém, foi realizado a preparação da matéria prima para fundição. As embalagens foram cortadas em pequenos pedaços Figura 13 (a) e pesada em uma balança analítica para obter o peso total das embalagens coletadas Figura 3 (b).

Figura 13 - Material cominuído (a) material pesado (b).



Fonte - Elaborado pela autora (2019).

3.5.1 Processo de fundição

O processo de fundição do metal foi realizado no Laboratório de Metalografia da Faculdade de Engenharia Mecânica (LABEM), localizado na UFPA, campus Belém. O forno utilizado para a fundição é do tipo mufla da marca Brasimet, Figura 14. A rampa de aquecimento ocorreu em 6 horas com a faixa de aquecimento de 150°C por hora.

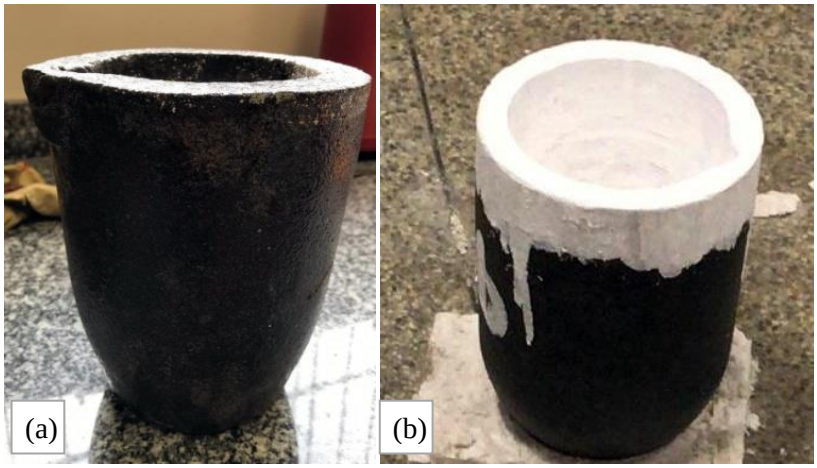
Figura 14 - Forno tipo mufla utilizado na fundição.

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

3.5.2 Preparação do Cadinho

O cadinho utilizado para a fundição Figura 15 (a) foi higienizado com uma escova de aço para retirar as impurezas e uma lixa 80 mesh para uniformizar suas paredes, após a higienização, este foi levado para aquecer em uma estufa com circulação de ar á 200ºC, em seguida o cadinho foi revestido internamente com alumina, Figura 15 (b), que tem por finalidade impedir a aderência do material nas paredes do cadinho e facilitar a retirada do metal liquido e rejeitos. Em seguida foi colocado na estufa na temperatura de 200ºC por aproximadamente 10 minutos para previa secagem. O cadinho é de que?

Figura 15 - Cadinho de carboneto de silício (a) cadinho preparado para fundição(b).



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

3.5.3 Fundição

O material cortado foi adicionado no cadinho previamente aquecido. Esse processo ocorreu em etapas, na primeira etapa o material foi adicionado até preencher o cadinho e inserido ao forno. Transcorrido trinta minutos o cadinho foi retirado do forno e a ele adicionado o material que fora previamente prensado em um tubo de PVC (polivinil), Figura 16 (a),até total preenchimento na sequencia foi levado ao forno.

Esse procedimento foi realizado por três vezes. Transcorridas 3 horas o material foi retirado do forno e homogeneizado, Figura 16 (b), durante sessenta segundos com um bastão de aço inox revestido com alumina e retornado ao forno. O vazamento ocorreu após 4 horas de fundição em um molde de cobre,Figura16 (c), fornecido pelo Laboratório de Engenharia Mecânica, obtendo-se um lingote,Figura16 (d).

O rendimento foi calculado pela Equação 1 a seguir:

$$X = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$$

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

Figura 16 - Etapas da fundição (a) material prensado despejado no cadinho (b) homogeneização do material (c) vazamento do metal liquido (d) obtenção do lingote.

Fonte - Elaborado pelo autor, 2019.

3.6 Obtenções do corpo de prova

Para a obtenção do corpo de prova o lingote foi cortado como apresentado nas fotos da Figura 17 (a), foi utilizada a cortadora CMR-60, Figura 17 (b)disponibilizado pelo laboratório de metalografia FEM, possibilitando cortes com maior precisão, utilizando-se de um fino disco abrasivo e uma bomba d'agua que tem por finalidade não provocar alterações por calor na amostra.

O lingote foi cortado em quatro segmentos para ser usado em analises, figura 17 (c) A parte um foi preparada para a análise de fluorescência de raios x, a dois foi cortada, embutida e preparada metalograficamente para analisemicroestrutural e a três foi preparada metalograficamentepara as análise macroestrutural e o ensaio mecânico de microdurezaVickers.

Figura 17 - (a) ilustração do corto do corpo de prova (b) cortadora CMR-60 (c) corpo de prova cortado.

Fonte - Elaborado pela autora (2019).

3.7 Técnicas de análises químicas

Para a análise química do material reciclado foi utilizado as técnicas de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) a técnicadeespectroscopia de raios-X pordispersãoemenergia (EDS).

3.7.1 Fluorescência de raios-X

Para a análise química foi retirada uma amostra do lingote produzido experimentalmente e utilizada a técnica de espectrometria de fluorescência de raios -X (FRX), disponibilizado pelo Instituto Federal do Pará.

A amostra foi preparada por laminação utilizando laminador duo elétricoMenac,laminada no LABEM/UFPA, até a espessura de 1 mm conforme a Figura 18 (a), e cortada com tesoura para corte metálico nas dimensões de 40mm de diâmetro, em seguida a amostra foi lixada sequencialmente por lixas com granulometria de 100, 220 e 400 meshs respectivamente. Para a remoção de possíveis resíduos na amostra foi utilizada a mesma metodologia apresentada no tópico 3.4. Como mostra na Figura 18 (b).

Figura 18 - (a) amostra laminada (b) amostra higienizada por ultrassom.

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

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

Para a análise química realizada por EDS, foram utilizadas as amostras que foram preparadas para análisemicroestrutural descrita no tópico 3.9.

3.8 Procedimentos metalográficos

3.8.1 Macroestrutura

A preparação da amostra foi realizada utilizando a técnica rotineira de metalografia. O método consiste em lixar a amostra consecutivamente com lixas de granulometria cada vez menores, mudando-se de direção (90°) a cada mudança de granulometria de lixa até desaparecerem os traços da lixa anterior. Foi utilizada uma politrizmetalográfica, modelo PLO2E da TECLAGO, Figura 19.

Figura 19 – Politrizmetalografica, modelo PLO2 E da TECLAGO.

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

As amostras foram preparadas usando lixas de carbureto de silício com as seguintes granulometrias 220, 400 e 600 mesh, utilizando-se água como refrigerante em seguida, foram polidas em um processo mecânico utilizando um pano metalográficoe como agente polidor de alumina 0.5µm. Para a remoção de possíveis resíduos na amostra foi utilizada a mesma metodologia apresentada no tópico 3.2.2.

Para revelar as interfaces dos grãos, a amostra precisa passar por um processo de oxirredução através de reagentes específicos. Para a obtenção da macroestrutura uma amostra foi submetida ao ataque químico por imersão com o reativo de Tucker (10 ml HCL + 10 ml HNO_3 + 0,5ml HF + 10 ml H_2O_2), de acordo a norma da ASTM E407 − 07. A amostra foi imersa por 10 segundos na solução, logo após o ataque, o material foi enxaguado com água corrente e álcool, seco com ar quente. Este procedimento foi realizado no LEQ/UFPA.

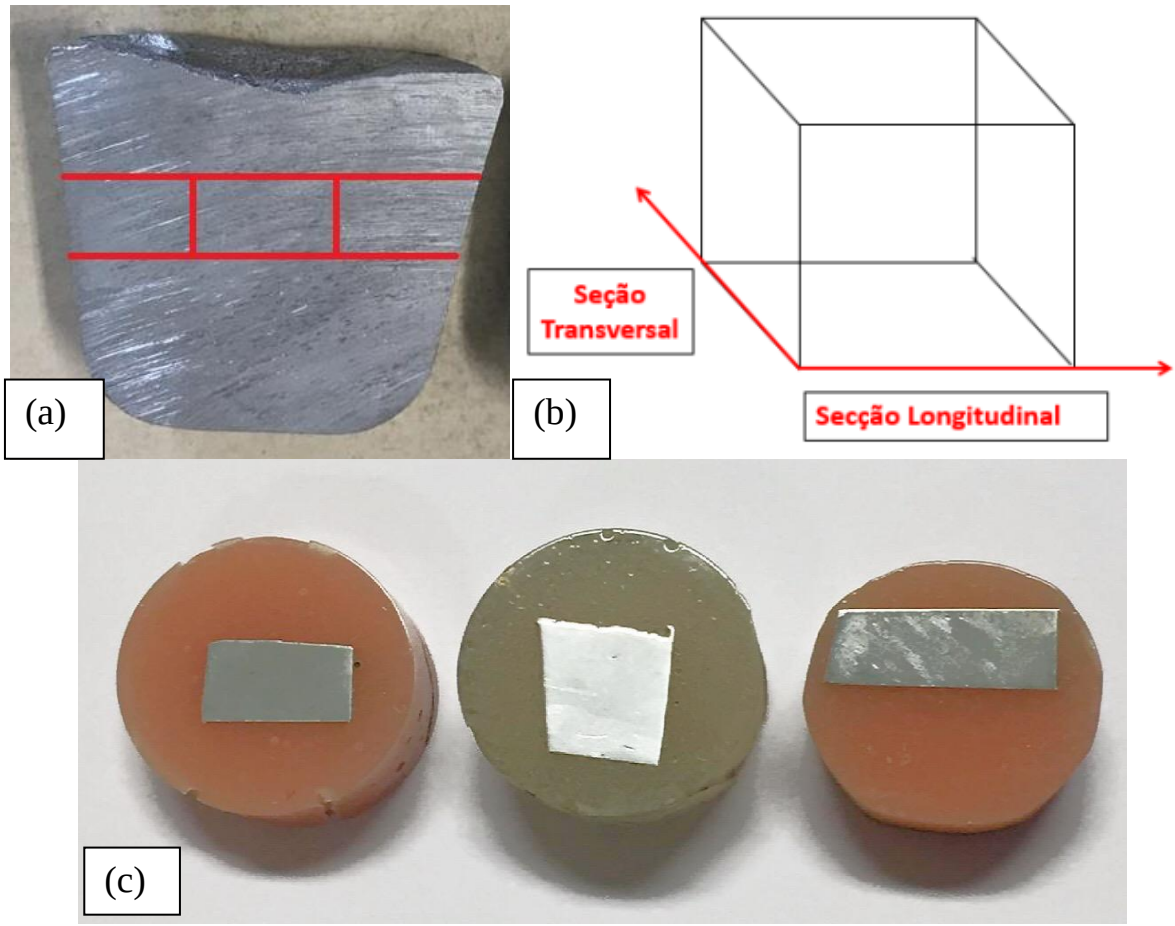
3.8.2 Microestrutura

Para a análise da microestrutura do material reciclado, a amostra foi cortada na região central em três partes conforme o esquema na figura 20 (a) e foram embutidos utilizando a resina acrílica auto polimerizável. Foram definidos os sentidos da caracterização de acordo com o esquema da Figura 20 (b), uma amostra foi embutida no sentido transversal, e duas amostras no sentido longitudinal representada na Figura 20 (c).

Em seguida, as peças foram preparadas pelo processo metalográfico, foram lixadas com as lixas com as seguintes granulometrias 220. 400, 600, 1.000 e 1.200, mesh, polidas

com alumina 0,1 µm. O ataque químico para revelar a estrutura foi realizado com o reagente Tucker em imersão por 25 segundos.

Figura 20 - (a) representação do corte para microestrutura, (b)Definição do sentido de caracterização das amostras para análise metalográfica, (c)Corpos de prova de análise embutidos.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

3.9 Técnicas de observação

3.9.1 Microscopia ótica (MO)

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

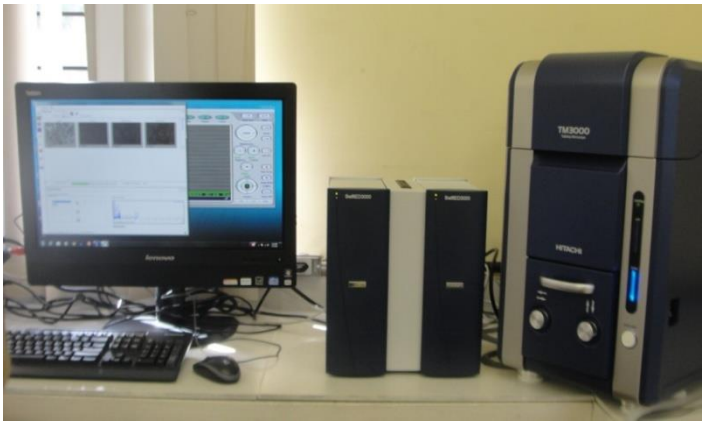
Figura 21 - Microscópio óptico.

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

3.9.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

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

Figura 22 - Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

3.10 MicrodurezaVickers

O ensaio de microdureza foi realizado Laboratório de Caracterização de Materiais da Amazônia (LCAM) FEM/UFPA, foi utilizado um microdurometroda marca MITUTOYO mostrado na Figura 23, com endentador de diamante em formato piramidal, um microscópio acoplado e um monitor com software para o cálculo do valor de dureza em HV. O ensaio foi aplicado em três regiões do corpo de prova (lado direito, centro e lado esquerdo) cada um com medição de cinco pontos. A carga aplicada pelo endentador foi de 0,3 kgF com o tempo de 10 segundos.

Figura 23 - Microdurometro.

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

4 RESULTADOS

4.1 Matéria prima

Na coleta de material de embalagens de alumínio pós-consumo da indústria alimentícia, foram obtidos 400 g de laminados, os quais foram reciclados por processo de fusão.

4.2 Composição química da matéria prima.

As análises qualitativas e semi quantitativas da composição química das ligas foram realizados utilizando a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado ao MEV. A Tabela 6, apresenta a média dos elementos da composição química. Dez pontos na amostra foram analisados.

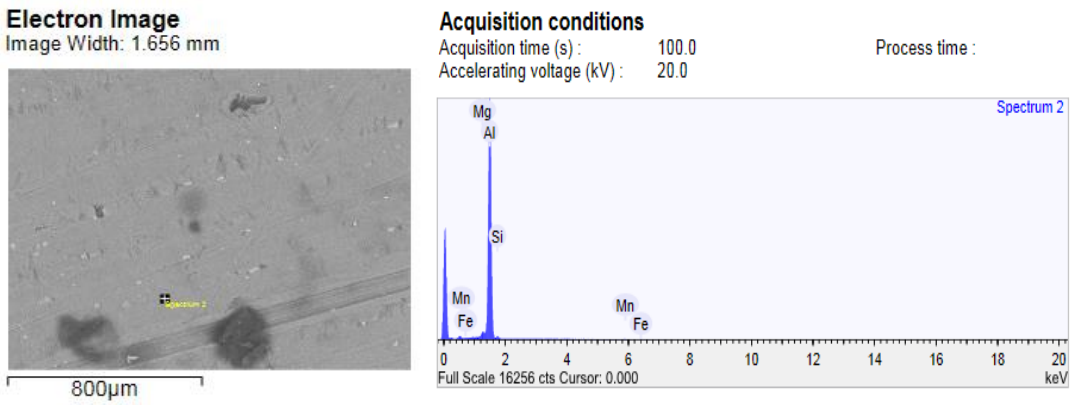
Tabela 6 - Composição química da matéria prima.

	Si	Fe	Mn	Mg	Al
NBR	0,50-0,90	0,60-1,00	0,20	0,05	Restante
EDS	0,77	0,66	0,40	1,7	92,7

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

A Figura 24 é composta por uma micrografia da lâmina da amostra da matéria prima e um dos espectros dos pontos analisados, o que permite observar a presença dos elementos de liga.

Figura 24 - Micrografia da matéria prima.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

Os resultados de composição química do material obtido permitem comparar com os elementos que constituem a liga de alumínio 8011, de acordo com a norma ABNT- NBR 6834 em que destaca que os principais elementos de liga são Al-Fe-Si.

Os valores obtidos pela análise realizada por EDS apresentaram valores superiores para o Mn e para o Mg, quando comparados aos da norma, isso pode estar relacionado ao fato das análises serem realizadas pontualmente, o que possibilita que os pontos analisados estejam posicionados sobre um intermetálico ou mesmo sob uma inclusão.

4.3 Obtenção do lingote

A fusão de 400 g do material coletado teve como resultado um lingote com as seguintes dimensões: 45 mm de largura, 39 mm de altura e 14 mm de espessura e com 191,6g, e rendimento de 47.9 %.

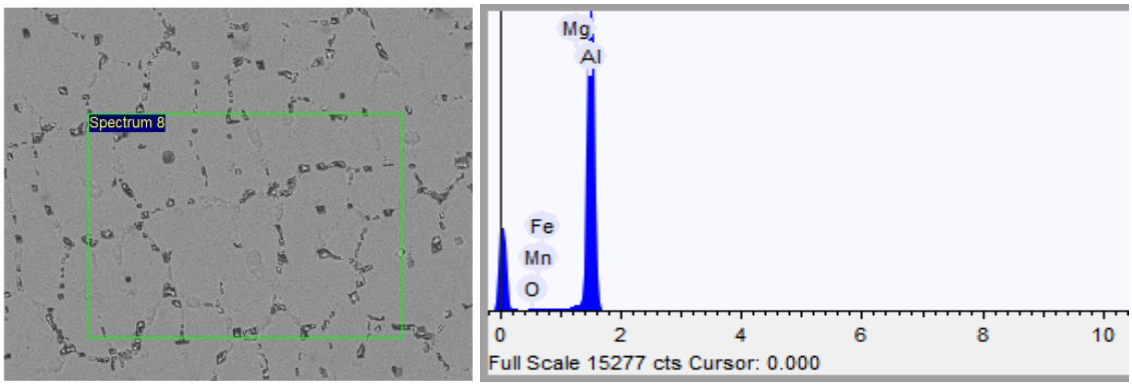
Esse rendimento pode ser considerado baixo, se comparado a reciclagem realizada por Verran (2005) de latas de alumínio da indústria de bebidas que obteve rendimento 60% quando realizou a fusão sem a aplicação de fluxo escorificante, como foi realizada a fusão das marmitex.

Mashhadi, et al., (2009) em seu trabalho avaliou a influência na utilização da sucata prensada a frio e também do sal escorificante na reciclagem de ligas de alumínio, e concluiu-se que o uso do sal escorificante é o melhor caminho para o aumentar o rendimento. Outro fator importante é considerar a temperatura de vazamento.

4.4 Composição química do lingote de alumínio reciclado

A composição química da liga de alumínio reciclado foi analisadapor espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e Fluorescência de raios-X. Amicroestrutura e um espectro de uma das áreas analisadas por EDS compõem aFigura 25 . Foram realizadas leituras por área e por pontos de três amostras retiradas do lingote obtido.

Figura 25 - Microestrutura da amostra de corte transversal e espectro do reciclado.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

A Tabela 7 apresenta a composição química para a liga 8011 de acordo com a NBR6834 (2000), a média da composição química obtida por EDS e a composição química obtida por FRX.

Tabela 7 - Composição química do material reciclado em %.

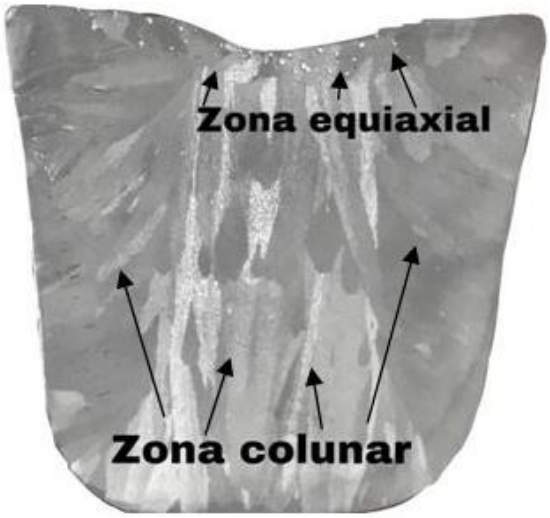
	Si	Fe	Mg	Mn	Cr	V	Al
NBR	0,5 – 0,9	0,6 – 1,0	0,05	0,20	0,05	0,05	Restante
EDS	0,32	0,33	0,4	0,6	0,3	0,006	95,1
FRX	0,68	0,71	1,5	0,07	-	0,002	97,0

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

4.5 Macroestrutura

Amacroestrutura do lingote revelado na Figura 26, pode-sevisualizar a direção de fluxo de calor em relação as paredes do molde. Apresentando uma estrutura predominantemente colunar e com uma pequena região, no final da solidificação, com estruturas equiaxiais, isto é, na face em contato com o ar, onde têm-se a região de rechupe.

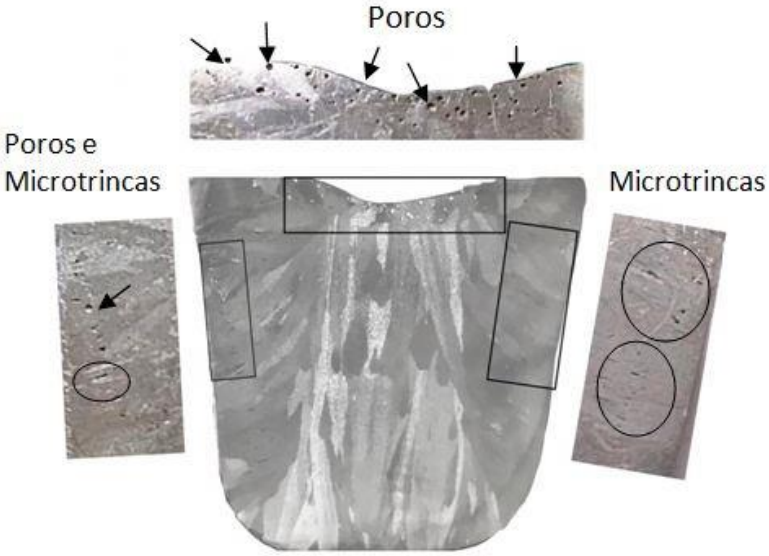
Figura 26 - Macroestrutura do lingote.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

Sendo assim, com base nos resultados e possível inferir que os grãos colunares são formados pela baixa velocidade de extração de calor pelo sistema de solidificação adotado. De acordo com Carvalho (2016), esses grãos são formados a medida que o calor latente de solidificação diminui, ou seja, as estruturas são ditas pela quantidade de calor retirada pela interface metal/molde. Quanto maior a retirada de calor, maior será a existência de estruturas colunares. Observa-se também a presença de poros e microtrincas.

Figura 27 - Poros e microtrincas do lingote.



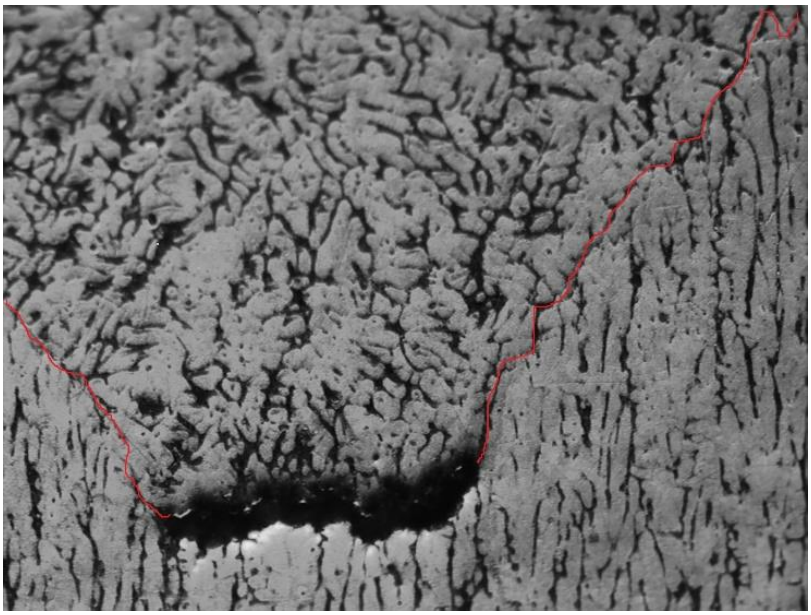
Fonte - Elaborado pela autora (2019)

4.6 Microscopia óptica (MO)

As fotomicrografias obtidas via microscopia óptica foram realizadas em amostras mediante o corte longitudinal e transversal. Na microestrutura da seção longitudinal da amostra da liga,Figura 28, a estrutura dendrítica é observada, isto está em consonância para as ligas de alumínio no estado bruto de solidificação que se apresentam na região de solução sólida para o ternário Al-Fe-Si.

Observa-se nesta micrografia o que prediz a teoria de solidificação, de que ligas metálicas apresentam em sua estrutura crescimento preferencial, determinada pelo fluxo de calor, é clara a região de contorno de grão onde se observa a estrutura dendrítica e a estrutura na forma de rosáceas. Nesta fotomicrografia notou-sea presença do defeito de solidificação, isto é, uma inclusão no contorno de grão, assim como microporos.

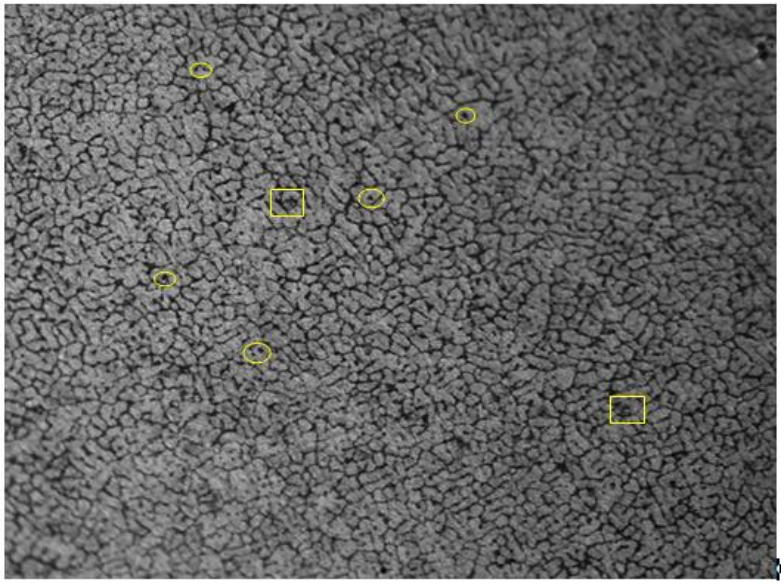
Figura 28 - Microestrutura do material reciclado longitudinal 50X.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

A Figura 29 apresenta a microestrutura da seção transversal da amostra, nela observou-se que na seção de corte, as dendritas foram seccionadas, sendo, portanto observado na fotomicrografia do topo das dendritas. É constatado também a presença de poros e inclusões.

Figura 29 - Microestrutura o material reciclado transversal 50X.

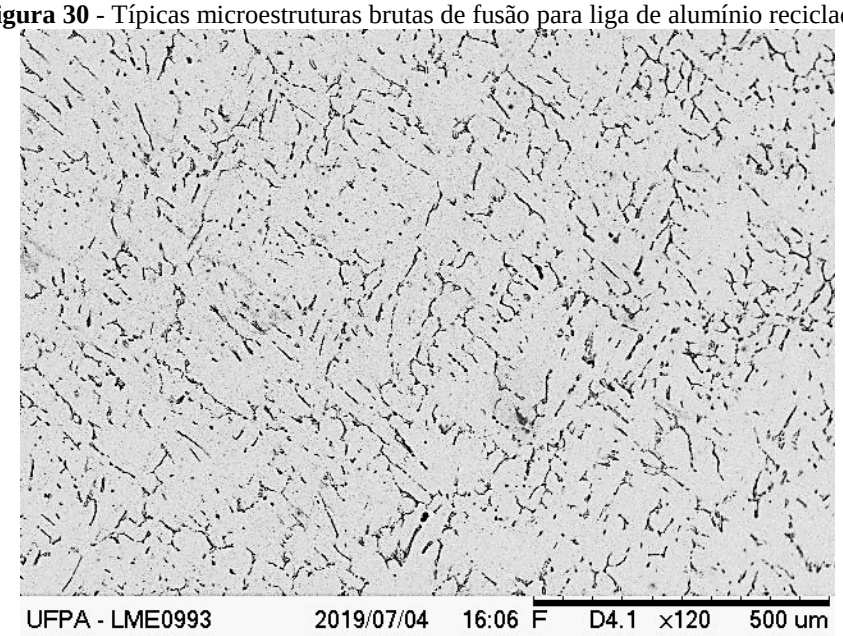


Fonte - Elaborado pela autora (2019)

4.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 30 é a microestrutura da liga no seu estado bruto de fusão, a qual apresenta microestrutura típica para as ligas de alumínio. A microestrutura do fundido é composta de células dendríticas de alumínio e vários elementos tais como Fe, Si, Mg, Mn e Ti que se distribuem nos limites dos braços dendríticos.

Figura 30 - Típicas microestruturas brutas de fusão para liga de alumínio reciclada.

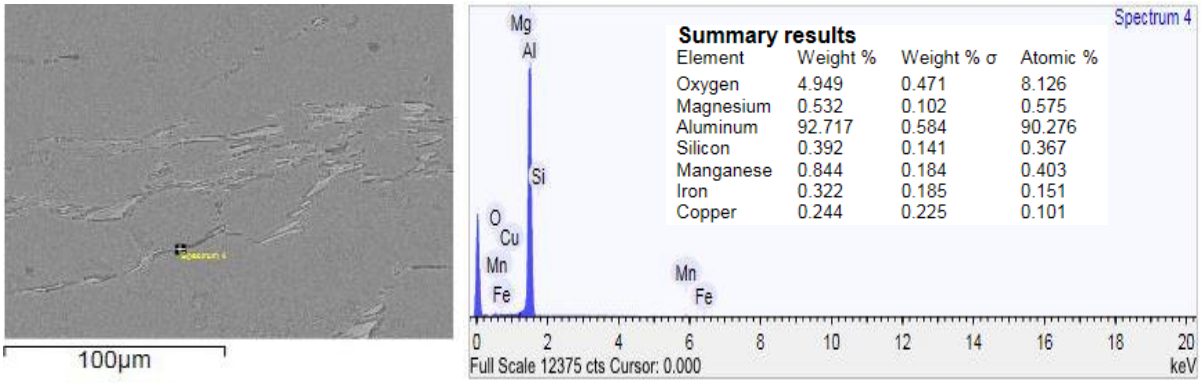


Fonte - Elaborado pela autora (2019)

Uma análise mais acurada mediante o MEV e o EDS pôde facilitar na correta identificação dos precipitados.

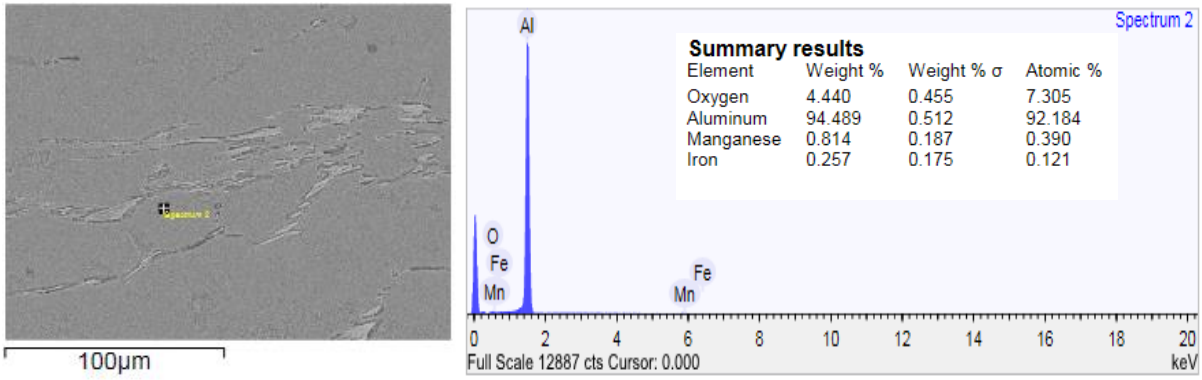
A Figura 31,é composta pela micrografia obtida por MEV com um ponto analisados por EDS no contorno do braço dendrítico e oespectro mostrando a presença dos elementos presentes na naquele ponto naliga,ondeas maiores concentrações de elementos de liga encontram-senos contornos dos braços dendritos e a Figura 32é composta pela micrografia com um ponto analisado por EDS, dentro do braço dendrítico e o espectro com a concentração de elementos químicos.

Figura 31 - Micrografia e espectro no contorno do braço dendrítico.



Fonte - Elaborado pela autora (2019).

Figura 32 - Micrografia e espectro dentro do braço dendrítico.

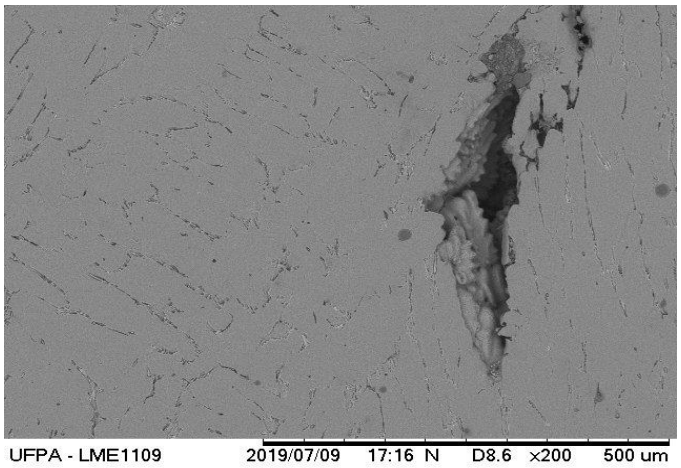


Fonte - Elaborado pela autora (2019).

A presença de defeitos de solidificação é exibida na micrografia da Figura 32, tais como pequenos poros,inclusões e trincasde solidificação.Segundo Sanguinetti (2000), o vazamento para ligas Al-Fe-Si acima de 720°C propicia a macrosegregação. A formação de

rosáceas como mostrada na microscopia da Figura 33, podendo desprender-se e formar grandes poros.

Figura 33 - Micrografia dos defeitos de solidificação.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

4.8 MicrodurezaVickers

A média para 15 pontos analisadospara a dureza foi de 35,54 HV, utilizando a escala de microdurezaVickers. As endentações foram realizadas no corpo de prova atacado, isto é, na peça que apresenta a macroestrutura. As regiões escolhidas para tais endentações tomaram como referência as regiões distintas da amostra, a interface direita, centro e interface esquerda como está exposto na Tabela 8.

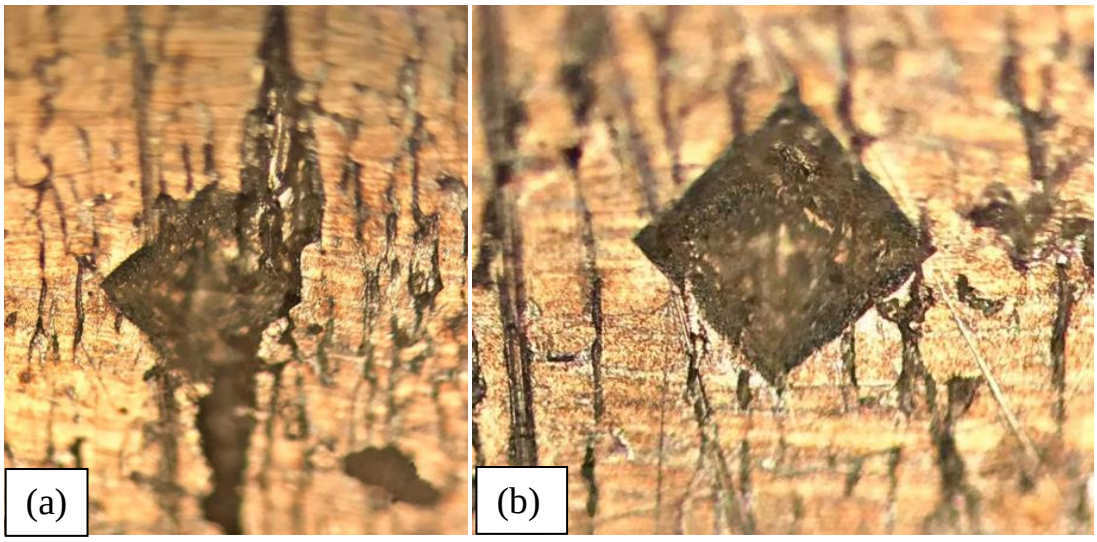
Tabela 8 - Pontos de microdureza em HV.

	Interface Direita	Centro	Interface Esquerda	Média geral
	36,1	28,1	37,9	
	36,2	29,4	35,5	
	34,9	40,3	31,5	
	33,6	39,8	37,6	
	37,1	37,3	37,9	
Média	**35,58**	**34,98**	**36,08**	**35,54**

Fonte - Elaborado pela autora (2019)

O maior valor encontrado foi 40,3 HV e o menor valor foi 28,1 HV ambos encontrados nas endentações realizadas no centro da amostra como pode ser observado na Tabela 8. Nas observações de tais endentações aomicroscópio ótico constatou-se que o maior valor encontrado está sobre uma inclusão Figura 33 (a), o menor valor está localizado dentro de um braço dendrítico primário, Figura 34 (b)

Figura 34 - (a) endentação sob uma inclusão (b) endentação dentro de um braço dendrítico primário.



Fonte - Elaborado pela autora (2019)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho experimental teve início com a coleta de material descartado seguido da caracterização química. O material coletado foi fundido e caracterizado. A estrutura foi avaliada observando a macroestrutura e a microestrutura com auxílio da microscopia óptica e eletrônicade varredura. Os resultados da macroestrutura permitiram avaliar a estrutura bruta de solidificação, que se apresentaram preferencialmente colunares e observar os defeitos macros de solidificação.

A composição química foi avaliada por espectroscopia de energia dispersiva dos raios X emitidos pelas partículas e por fluorescência de raios-X, o que permitiu constatar a presença predominante dos elementos de liga Al, Fe e Si.

A microestrutura do reciclado revelou estrutura dendríticaem seu estado bruto de fusão a qualapresentamicroestruturatípica para as ligas de alumínios em soluçãosólida, assimcomopossibilitouavaliar a presença dos principais defeitos de solidificação, tais como pequenos poros, inclusões e trincas.

O ensaio mecânico de microdureza apresentou como resultado 35,54 HV

REFERÊNCIAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio, **Fundamentos e aplicações do alumínio** 2007, 68 p.

ABNT, NBR. 6834: 0 Alumínio e suas ligas-Classificação. **Rio de Janeiro**, 2000.

ALMADA, Gabriel Carvalho. (Estudo da influência do agente nucleante) ALTi5% B1%) na microestrutura de chapas AA8011 obtidas por lingotamento contínuo. 2015.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOKS, **Metallography and microstructure**,

Associação Brasileira do Alumínio – ABAL Alumínio brasileiro: soluções para uma vida sustentável / Associação Brasileira do Alumínio – São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2017. 61 p.: Il

ASTM E407-07. Standard practice for microetching metals and alloys. 2015.

BESKOW, Arthur Bortolin et al. Estudo da solidificação unidirecional ascendente para obtenção de estruturas colunares grosseiras. 2008.

BOLLADA, P. C.; JIMACK, P. K.; MULLIS, A. M. Faceted and dendritic morphology change in alloy solidification. **Computational Materials Science**, v. 144, p. 76-84, 2018.

CANTÉ, M. V., Solidificação Transitória, Microestrutura e Propriedades de Ligas Al-Ni, Tese de Doutorado. UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas – São Paulo. 2009.

CARVALHO, Rosimeire Silva de. A influência do cobre nas microestruturas e propriedades mecânicas de uma liga Al2% Ni solidificadas com fluxo de calor unidirecional e transiente. 2016.

CASTANHO, Manuel António Pires et al. Solidificação unidirecional transitória de ligas peritéticas do sistema Pb-Bi. 2013.

CRUZ, Kleber Augustin Sabat da et al. Microestrutura de solidificação, resistências mecânica e ao desgaste de ligas Al-Sn e Al-Si. 2008.

DANTAS, Patrícia Pereira. Caracterização de ligas hipereutéticas de Al-Ni solidificadas unidirecionalmente. 2014.

DIAS FILHO, José Marcelino da Silva et al. Análises térmica e microestrutural na solidificação de ligas monofásica e peritéticas do sistema Zn-Ag. 2013.

FARIA, Jonas Dias et al. Correlações entre variáveis térmicas, microestrutura e propriedades mecânicas das ligas Al-4% Cu e Al-4% Cu-4% Ag solidificadas em regime transitório. 2015.

FERRARI, Ricardo Bulcão. **Caracterização de liga metálica a base de alumínio-magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas microcristalinas**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti et al. **Estudo do comportamento mecânico da liga de aluminio AA 801 1 em diferentes sequências termomegênicas**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

FUNDAMENTOS, A. B. A. L. aplicações do alumínio. **São Paulo**, p. 35, 2007.
GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações** São Paulo. Ed. Unicamp, 2001. 1a edição

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

GARCIA, Amauri. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Editora da UNICAMP, 2007.

GARCIA, Leonardo Richeli et al. Microestrutura de solidificação e propriedades mecanicas de ligas Sn-Zn para soldagem e recobrimento de superficies. 2008.

GHOSH, Gautam et al. Aluminium–iron–silicon. In: **Iron Systems, Part 1**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. p. 184-266.

GOMES, Laercio Gouvea et al. Microestrutura dendrítica, macrossegregação e microporosidade na solidificação de ligas ternárias Al-Si-Cu. 2012.

GOMES, R. C. F. Caracterização térmica e mecânica de ligas hipoeutéticas de alumínioníquel (Al-Ni). Brasília: Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, 2013. Dissertação.

GOULART, Pedro Roberto et al. Caractericação da microestrutura de solidificação de ligas Al-Fe e correlação com propriedades mecânicas. 2010.

HATCH, J. E. **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. Ohio: ASM, 5th edition. 1984. 424 p

JORGE, Neuza. Embalagens para alimentos. **São Paulo: Cultura Acadêmica**, 2013.

KIM, Hyoung Wook et al. Deformation textures of AA8011 aluminum alloy sheets severely deformed by accumulative roll bonding. **Metallurgical and Materials**

KUIJPERS, N. C. W. et al. The dependence of the β-AlFeSi to α-Al (FeMn) Si transformation kinetics in Al–Mg–Si alloys on the alloying elements. **Materials Science and Engineering: A**, v. 394, n. 1-2, p. 9-19, 2005.

KUMAR, Ranjeet et al. Microstructure and texture development during deformation and recrystallisation in strip cast AA8011 aluminum alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 742, p. 369-382, 2018.

LIMA, Emmanuel Pacheco Rocha. **Estudo da cinetica de recristalizacao da liga de aluminio AA8011 na condicao H18**. 2002. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

LENTZ, Martin; LAPTYEVA, Galyna; ENGLER, Olaf. Caracterização de partículas de segunda fase em duas ligas de alumínio. Journal of Alloys and Compounds. v. 660, p. 276-288, 2016.

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

MONDOLFO, L.F. **Aluminum Alloys: Structure and properties**. London – Boston: Butterworths, 1976. 971p.

MOREIRA, Marcelo F. Ligas de alumínio para fundição. 2012.

MOTA, Marilsa Aparecida et al. Microestrutura de solidificação e propriedades de ligas euteticas no sistema Fe-Al-Nb. 2002.

NASCIMENTO, L.G.Estudo das propriedades Mecânicas de Ligas Hipoeutéticas Al-Ni Solidificadas Unidirecionalmente em Condições Transitórias de Fluxo de Calor.Belém.Pará . Dissertação. 2011.

OHNO, A. Solidificação dos metais. **Livraria Ciência e Tecnologia Editora Ltda., São Paulo**, 1988.

OHNO, A.; **Formation mechanism of the equiaxed chill zone in ingots**. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, v. 10, pp. 459, 1970

OTOMAR, Heber Pires. **Estudo comparativo da estampabilidade da liga de aluminio AA1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PADILHA, Angelo Fernando; PLAUT, Ronald Lesley. Work Hardening, Recovery, Recrystallization, and Grain Growth. In: **Handbook of Aluminum**. CRC Press, 2003. p. 197-224.

PARASKEVAS, Dimos et al. Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 357-370, 2015.

PERES, Manoel Diniz et al. Desenvolvimento da macroestrutura e da microestrutura na solidificação unidirecional transitória de ligas Al-Si. 2005.

PETZOW, Günter; EFFENBERG, Günter. Ternary alloys. A comprehensive compendium of evaluated constitutional data and phase diagrams. Vol. 4. 1991.

ROSA, Daniel Monteiro et al. Estruturas celulares, transição celular/dendrítica e estruturas dendríticas na solidificação unidirecional transitória. 2007.

RYU, Jong-Ho; LEE, Dong Nyung. The effect of precipitation on the evolution of recrystallization texture in AA8011 aluminum alloy sheet. **Materials Science and Engineering: A**, v. 336, n. 1-2, p. 225-232, 2002.

SOARES, Glória Almeida. Fundição: mercado, processos e metalurgia. **Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ**, 2000.

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

SPINELLI, José E.; CHEUNG, Noé; GARCIA, Amauri. On array models theoretical predictions versus measurements for the growth of cells and dendrites in the transient solidification of binary alloys. **Philosophical Magazine**, v. 91, n. 12, p. 1705-1723, 2011.

TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott (Ed.). **Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing**. CRC press, 2003. **Transactions A**, v. 36, n. 11, p. 3151-3163, 2005.

VALT, Renata Bachmann Guimarães. Análise do Ciclo de Vida de Embalagens de Pet, de Alumínio e de Vidro para Refrigerantes no Brasil variando a Taxa de Reciclagem dos Materiais. 2004.

VERRAN, G.O., Kurzawa, U., Pescador, W.A. **Reciclagem de Latas de Alumínio Visando Melhor Rendimento e Qualidade Metalúrgica no Alumínio Obtido.** RevistaMatéria, v. 10, n. 1, pp. 72 – 79, Março de 2005
volume 9, 2010

YOSHIKAWA, Daniel Sierra. **Correlação entre microestrutura e comportamento de corrosão em duas ligas do sistema Al-Fe-Si produzidas pelos processos industriais de lingotamento contínuo e semi-contínuo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ZAPPAROLI, Irene D. A questão socioambiental da reciclagem: a prática da população londrinense. **Londrina: UEL**, 2008.

WEILER, J. P.; WOOD, J. T. Modeling fracture properties in a die-cast AM60B magnesium alloy II—The effects of the size and location of porosity determined using finite element simulations. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 1-2, p. 32-37, 2009.

WHITESELL, HS; OVERFELT, RA Influência de variáveis de solidificação na microestrutura, macrosegregação e porosidade de Mar-M247 solidificado direcionalmente. **Ciência e Engenharia de Materiais: A** , v. 318, n. 1-2, p. 264-276, 2001.