

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL
MESTRADO E DOUTORADO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

GILSON GILMAR HOLZSCHUH

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FITA CONDUTORA DE
CORRENTE ELÉTRICA A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLADO
COM POTENCIALIDADE DE APLICAÇÃO NA INTERCONEXÃO
DE CÉLULAS SOLARES NA MONTAGEM DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS.**

Santa Cruz do Sul

2020

Gilson Gilmar Holzschuh

DESENVOLVIMENTO DE UMA FITA CONDUTORA DE CORRENTE ELÉTRICA A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLADO COM POTENCIALIDADE DE APLICAÇÃO NA INTERCONEXÃO DE CÉLULAS SOLARES NA MONTAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito para o título de Doutor em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jorge André Ribas Moraes

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Boscato Garcia

Santa Cruz do Sul

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao meu orientador Professor Jorge André Ribas Moraes pelo apoio e parceria que formamos nesta trajetória, bem como pelas incansáveis correções realizadas dos artigos que compõem esta tese.

Ao coorientador Professor Sergio Boscato Garcia pelo entendimento e compreensão nos momentos decisivos desta pesquisa. Pela possibilidade proporcionada de conhecer o NT-SOLAR da PUC-RS e orientar-me quanto aos tipos de ensaios que seriam necessários serem realizados.

A professora Rosana de Cássia de Souza Schneider pelo apoio técnico e dedicação na reta final, principalmente com a ajuda para a submissão do Artigo de Revisão Sistemática de Literatura – RSL e na publicação dos resultados finais.

A professora Liane Mahlmann Kipper por acompanhar a minha trajetória acadêmica, como orientadora no Mestrado, e agora também com uma participação bastante significativa, sugerindo alguns caminhos a seguir na banca de qualificação, bem como valiosas considerações para a publicação dos artigos de revisão de literatura e de resultados finais.

A professora Izete Zanesco da PUCRS pelas contribuições na Banca de Qualificação e pelas correções dos artigos que foram submetidos.

Ao Professor Adriano Moehlecke da PUCRS pela relevante participação na Banca Final e suas relevantes contribuições para a Tese na versão final.

Aos Técnicos dos Laboratórios de Fundição e Engenharia de Produção da Universidade de Santa Cruz do Sul, Ítalo Policena, Rafael Vogt e José Mateus por sua colaboração na confecção da coquilha, ensaios de fundição e ensaios de homogeneização dos corpos de prova.

Aos Técnicos, Alunos e Professores de Graduação e Pós Graduação do Laboratório de Fundição e Laboratório de Conformação da UFRGS que colaboraram nos procedimentos de fundição e ensaios laboratoriais e formação dos corpos de prova.

Em especial, a minha esposa Ângela e minha filha Alana, por terem acreditado em mim e em muitos momentos que tive que abrir mão do convívio familiar, terem compreendido com paciência.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo obter uma fita condutora de corrente elétrica, a partir de alumínio secundário oriundo do reciclo de latas de alumínio, visando sua aplicação como barramento condutor de energia elétrica para realizar a conexão de conjuntos de células solares na montagem de módulos fotovoltaicos. Para fundamentar a pesquisa, realizou-se um artigo de Revisão Sistemática de Literatura que teve como objetivo realizar um mapeamento científico sobre o estado atual dos processos de reciclagem de latas de alumínio, processos de fundição e formação de ligas de alumínio nos últimos 15 anos. Os resultados desta pesquisa, foram apresentados por meio de três artigos. O primeiro artigo apresentou os resultados preliminares, o segundo demonstrou a aplicação da metodologia experimental e caracterização química, e por fim, o terceiro artigo, apresentou os resultados finais, concluindo a pesquisa. A produção da fita condutora de corrente elétrica, ocorreu com o processo de fundição por gravidade e posterior escoamento em uma coquilha, projetada especificamente para o experimento. Adicionou-se elementos de liga como Cu e Mg para avaliar se haveriam melhorias nas propriedades das ligas, obtendo-se então, três ligas como amostras: (A) liga à base de alumínio secundário; (B) liga Al - Cu; (C) liga Al - Cu - Mg. Aplicou-se um processo de homogeneização para reduzir as segregações da estrutura heterogênea dos lingotes fundidos. Com o propósito de reduzir a espessura da fita para 0,5 mm, realizou-se o processo de laminação à frio. Ocorreram quatro (04) passes de laminação, onde a espessura inicial foi de 4,04 mm, resultando em uma redução de 85,4 % da espessura inicial, alcançando $(0,59 \pm 0,04)$ mm de espessura final. Após cada passe de laminação foi aplicado o processo de recozimento para restaurar as propriedades do material para os passes seguintes. Realizou-se os seguintes ensaios: análise química, micrografia ótica e Espectroscopia Dispersiva de Comprimento de Onda (WDS), microdureza Vickers, tração, nível de encruamento, anisotropia e condutividade elétrica. Em relação à microdureza, as amostras mostraram-se frágeis, com elevada ductibilidade, baixa região plástica com limite de resistência à tração próximo ao ponto de estrição. O nível de encruamento, anisotropia normal e planar indicaram uma tendência do material ser resistente à deformação, formação de orelhas e dobras na direção de 45 ° no sentido da laminação, o que justificou as fraturas nas laterais das fitas. A condutividade apresentou resultados entre 45,96 e 47,67 IACS (*International Annealed Copper Standard*). Concluiu-se que o resultado obtido pela pesquisa foi satisfatório em relação ao objetivo de produzir uma fita com utilização de alumínio reciclado com espessura de 0,5 mm e avaliar suas propriedades de condutividade elétrica.

Palavras-chave: Alumínio reciclado. Fundição por gravidade. Homogeneização. Recozimento. Laminação à frio. Fita condutora. Células solares. Módulos fotovoltaicos.

ABSTRACT

This research had as objective to obtain a conductive ribbon of electric current, from secondary aluminum originating from the recycling of aluminum cans, aiming at its application as conductive busbar of electric energy to make the connection of sets of solar cells in the assembly of photovoltaic modules. To support the research, a Systematic Literature Review article was carried out, which aimed to carry out a scientific mapping of the current state of aluminum can recycling processes, foundry processes and formation of aluminum alloys in the last 15 years. The results of this research were presented through three articles. The first article presented the preliminary results, the second demonstrated the application of the experimental methodology and chemical characterization, and finally, the third article, presented the final results, concluding the research. The production of the electric current conducting tape occurred with the gravity casting process and later flow into a shell, designed specifically for the experiment. Alloy elements such as Cu and Mg were added to assess whether there would be improvements in the properties of the alloys, thus obtaining three alloys as samples: (A) alloy based on secondary aluminum; (B) Al - Cu alloy; (C) Al - Cu - Mg alloy. A homogenization process was applied to reduce the segregation of the heterogeneous structure of the cast ingots. In order to reduce the tape thickness to 0.5 mm, the cold rolling process was carried out. There were four (04) lamination passes, where the initial thickness was 4.04 mm, resulting in a reduction of 85.4% of the initial thickness, reaching (0.59 ± 0.04) mm of final thickness. After each lamination pass, the annealing process was applied to restore the material properties for the following passes. The following tests were carried out: chemical analysis, optical micrograph and Wavelength Dispersive Spectroscopic (WDS), Vickers microhardness, traction, hardening level, anisotropy and electrical conductivity. In relation to microhardness, the samples were shown to be fragile, with high ductility, low plastic region with a limit of tensile strength close to the point of strain. The level of hardening, normal and planar anisotropy indicated a tendency for the material to be resistant to deformation, formation of ears and folds in the 45 ° direction in the lamination direction, which justified the fractures on the sides of the tapes. Conductivity showed results between 45.96 and 47.67 IACS (International Annealed Copper Standard). It is concluded that the result obtained by the research was satisfactory in relation to the objective of producing a tape using 0.5 mm thick recycled aluminum and evaluating its electrical conductivity properties.

Keywords: Aluminum recycling. Gravity casting. Lamination. Alloy formation. Electric conductivity. Cold rolling. Solar cells. Photovoltaic modules.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 3: Fundamentação Teórica - Artigo 1

Figura 1	Publicações entre 2005 – 2019 na Base Scopus usando as palavras-chave apresentadas na Tabela 1.....	22
Figura 2	Média e desvio padrão da produção encontrada relativa as três questões em estudo relacionadas em períodos, conforme o software <i>SciMAT</i>	24
Figura 3	Mapa de evolução das palavras-chave em cada subperíodo.....	25
Figura 4	Evolução longitudinal das áreas de pesquisa no período estudado, obtidos pelo <i>SciMAT</i>	26
Figura 5	Diagrama estratégico destacando o tema motor em cada um dos 5 subperíodos pesquisados, onde A) 2005 – 2007; B) 2008 – 2010; C) 2011 – 2013; D) 2014 – 2016 e E) 2017 – 2019.....	28
Figura 6	Diagrama estratégico destacando os autores em cada subperíodo da pesquisa; onde A) 2005 – 2007; B) 2008 – 2010; C) 2011 – 2013; D) 2014 – 2016 e E) 2017 – 2019.....	29
Figura 7	<i>Timeline</i> de autores relevantes no período da pesquisa.....	31
Figura 8	Fluxograma de reprocesso do alumínio.....	38
Figura 9	Diagrama do processo de refusão das ligas de alumínio de acordo com (Wei <i>et al.</i> , 2019)	39
Figura 10	Tipos de resíduos de alumínio e tipos de processos de fundição.....	43

Capítulo 4: Metodologia

Figura 1	Fluxograma da metodologia da pesquisa realizada na etapa experimental...	52
-----------------	--	----

Capítulo 5: Resultados - Artigo 2

Figura 1	Procedimento aplicado para a segunda fundição.....	64
Figura 2	Análise estatística da variabilidade das amostras.....	68

Figura 3	Micrografia da matriz de amostra 1–50 % de alumínio reciclado 50 % + alumínio comercial: (a) ampliação 100 ×; (b) ampliação 200 ×.....	70
Figura 4	Micrografia da amostra de 1-50 % de alumínio reciclado + 50 % de alumínio comercial + 1% de casca de arroz cinza + 2% de magnésio com 99 % de pureza: (a) uma ampliação de 100 x; (b) ampliação 200 ×.....	70
Figura 5	Micrografia da matriz de amostra 2–50 % de alumínio reciclado + 50 % de alumínio comercial: (a) ampliação de 100 ×; (b) ampliação 200 ×.....	71
Figura 6	Micrografia da amostra 2–50 % de alumínio reciclado + 50 % de alumínio comercial + 4 % de cinza de casca de arroz + 2 % de magnésio com 99 % de pureza: (a) ampliação 100 ×; (b) ampliação 200 ×.....	72
Figura 7	Variação da densidade das amostras.....	72
Figura 8	Ensaio de dureza das matrizes e amostras 1 e 2.....	73
Capítulo 5: Resultados - Artigo 3		
Figura 1	Eficiência da fundição com adição de fluxo e evolução da temperatura.....	84
Figura 2	Sequência metodológica das etapas da pesquisa durante o processo de fundição.....	86
Figura 3	Processo de fundição de latas de alumínio. a) Colocação manual das latas de alumínio. b) Escória retirada do fundido.....	87
Figura 4	Lingotes de alumínio - lingote 50 % / 50 %.....	87
Figura 5	Coquilha confeccionada para escoamento do fundido.....	88
Figura 6	Processo de escoamento do alumínio fundido na coquilha. a. vazamento do alumínio formado pelo primeiro lingote na coquilha. b. Abertura da coquilha e retirada dos corpos de prova do 1º lote de amostras.....	90
Figura 7	Identificação e verificação da validade do corpo de prova.....	91
Figura 8	Processo de laminação dos corpos de prova. a. Corpos de prova como retirados da coquilha. b. Laminador de bancada – limite máximo de entrada 5 mm e limite mínimo de 0,5 mm. c. Fitas laminadas com espessuras finais entre 0,6 mm e 0,5 mm.....	91

Capítulo 5: Resultados - Artigo 4

Figura 1	Representação das etapas da recuperação de um metal deformado. a. Emaranhado de discordâncias. b. Formação de células. c. Aniquilação de discordâncias. d. Formação de subgrãos.....	105
Figura 2	Fluxograma da metodologia da pesquisa realizada na etapa experimental...	108
Figura 3	Vistas da coquilha. (a) Coquilha particionada com os canais de escoamento em detalhe. (b) Vista superior da coquilha montada para receber o fundido	110
Figura 4	Microscopia óptica e WDS das amostras antes da laminação. Figura 4 (A), (B) e (C) apresenta análise de microscopia óptica a 100 μm . Figura 4 (A´), (B´) e (C´) apresenta as análises quantitativas da WDS.....	115
Figura 5	Microestrutura após o processo de homogeneização das amostras (A), (B) e (C) retiradas em 4 h, 6 h e 8 h a 100 μm	116
Figura 6	Microscopia óptica de luz polarizada na direção de laminação ao longo do processo de recozimento. As letras (a), (b) e (c) representam as amostras e i., ii., iii. e iv. representam a sequência de recozimentos após cada passe de laminação	118
Figura 7	Gráfico apresentando a simetria e dispersão das amostras ao longo do processo de laminação à frio.....	120
Figura 8	Curvas de tensão-deformação após cada passe de laminação. i) 0 ° no sentido da laminação, ii) 45 ° no sentido da laminação, iii) 90 ° no sentido da laminação. (A) – Cor Azul, (B) – Cor Laranja e (C) – Cor Cinza	121
Figura 9	Condutividade elétrica das amostras em IACS.	123

LISTA DE TABELAS

Capítulo 3: Fundamentação Teórica – Artigo 1

Tabela 1	Strings de busca na base Scopus e dados de citação e co-citação inventariados para realização dos estudos quantitativos	23
Tabela 2	Principais desafios e perspectivas na área de reciclagem, fundição e formação de ligas de alumínio.....	46

Capítulo 5: Resultados – Artigo 2

Tabela 1	Composições químicas das ligas utilizadas na fabricação das latas de alumínio	59
Tabela 2	Composição química da liga de alumínio 3xxx e 5xxx	60
Tabela 3	Propriedades mecânicas das latas de alumínio séries 3004 e 5182	60
Tabela 4	Composição química da liga resultante da fundição 1	67
Tabela 5	Composição química da liga resultante da fundição 2	67
Tabela 6	Análise da composição química da fundição	68
Tabela 7	Estatística univariada dos dados da densidade das amostras	73
Tabela 8	Resultados da força de impacto <i>Charpy</i>	74

Capítulo 5: Resultados – Artigo 3

Tabela 1	Composição química da liga de alumínio 3xxx e 5xxx.....	82
Tabela 2	Propriedades mecânicas das latas de alumínio séries 3004 e 5182	83
Tabela 3	Composições químicas das ligas utilizadas na fabricação das latas de alumínio.....	81
Tabela 4	Análise da composição química da fundição de latas de alumínio utilizado por Verran e Kurzawa(2008)	84
Tabela 5	Especificações das medidas dos corpos de prova dentro da coquilha	89
Tabela 6	Composição final da liga de alumínio, cobre e magnésio	92

Tabela 7	Análise da composição química do alumínio fundido (lingote 50 % / 50 %)	93
Tabela 8	Análise química dos corpos de prova referente à pesquisa de Verran <i>et al.</i> (2004)	93
Tabela 9	Análise química da liga de alumínio (lingote 50 % / 50 %) com adição de 60 g de Cu	94
Tabela 10	Análise química da liga de alumínio (lingote 50 % / 50 %) com adição de 60 g de Cu e 80 g de Mg (liga Al-Cu-Mg)	94
Capítulo 5: Resultados – Artigo 4		
Tabela 1	Sequência de fundição e formação da liga Al – Cu – Mg	109
Tabela 2	Análise química das ligas (A), (B) e (C) à base de Al.....	114
Tabela 3	Registro da média das medidas após cada passe de laminação	117
Tabela 4	Evolução da microdureza em relação ao percentual de redução no processo de laminação	119
Tabela 5	Valores do expoente de encruamento n e o índice de anisotropia R , R^- e ΔR nas respectivas direções de laminação	122

LISTA DE QUADROS

Capítulo 3: Fundamentação Teórica - Artigo 1

Quadro 1	Áreas comuns compartilhadas pelos principais autores do período.....	30
-----------------	--	----

Capítulo 5: Resultados - Artigo 3

Quadro 1	Sequência experimental da formação das ligas a partir do lingote 50 % / 50 %	89
-----------------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Cellular Automaton – Autômato Celular
ASTM	American Society for Testing Materials
CAP	Casting Adjusted Pressure – Fundição com Pressão Ajustada
CCA	Cinzas de Casca de Arroz
CDC	Casting and Coupling-Stirring Direct Chill - Fundição com Resfriamento Direto com Agitação por Acoplamento
CMP	Chemical Polishing Model – Modelo de Polimento Químico
DC	Direct Chil – Fundição com Resfriamento Direto
EDE	Energia de Defeito de Empilhamento
EDS	Energy Dispersive Spectrometry - Espectrometria Dispersiva em Energia.
HPDC	High Pressure Die Casting - Fundição sob Pressão em Alta Pressão
IHTC	Interfacial Heat Transfer Coefficient - Coeficiente de Transferência de Calor Interfacial
GEE	Gases de Efeito Estufa
HTF	Heat Transfer Fluid
IACS	International Annealed Copper Standard
ICME	Integrated Computational Materials Engineering – Engenharia de Materiais Computacionais Integrada
ISO	International Organization for Standardization
LiCMA	Liquid cleaning Metal Analyzer
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
NDC	Normal Direct Chil - Fundição Normal com Resfriamento Direto
RF	Radio frequency – Rádio Frequência
RL	Reverse Logistic – Logística Reversa
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
SciMAT	Science Mapping Anaylsis Tool
VAC	Virtual Aluminum Casting – Fundição Virtual de Alumínio
VDC	Voltage Direct Current
WDS	Wavelength Dispersive Spectroscopic - Espectroscopia Dispersiva de Comprimento de Onda.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.3 ASPECTO INOVADOR DA TESE	18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 ARTIGO 1 – APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS PARA DESCARTE DE ALUMÍNIO RECICLADO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA USANDO O SOFTWARE SCIMAT.	19
3.1.1 Introdução.....	21
3.1.2 Metodologia.....	21
3.1.3 Resultados.....	24
3.1.4 Estado da arte.....	31
3.1.5 Considerações finais	47
4. METODOLOGIA	50
4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	51
5. RESULTADOS	53
5.1 ARTIGO 2 - PRODUÇÃO DE MATRIZ METÁLICA: FUNDIÇÃO DE LATAS DE ALUMÍNIO RECICLADAS E INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE CASCA DE ARROZE E MAGNÉSIO	53
5.1.1 Introdução.....	55
5.1.2 Fundamentação Teórica	57
5.1.3 Metodologia.....	62
5.1.4 Resultados e Discussões.....	66
5.1.5 Conclusão.....	74
5.2 ARTIGO 3 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DAS LIGAS AL + CU + MG, PRODUÇÃO DE UM CONDUTOR PLANO PELO PROCESSO DE LAMINAÇÃO À FRIO	77
5.2.1 Introdução.....	79
5.2.2 Fundamentação Teórica	81
5.2.3 Metodologia.....	86
5.2.4 Resultados.....	92
5.2.5 Conclusão.....	95
5.3 ARTIGO 4 – DESENVOLVIMENTO DE UMA LIGA A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLADO PARA FABRICAÇÃO DE UMA FITA CONDUTORA DE CORRENTE ELÉTRICA	97
5.3.1 Introdução.....	99
5.3.2. Fundamentação teórica.....	101
5.3.3 Materiais e métodos.....	107
5.3.4 Resultados.....	114
5.3.5 Conclusão.....	124
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
7. REFERÊNCIAS	129

1. INTRODUÇÃO

O aprofundamento de estudos científicos voltados a reciclagem de alumínio tem relevância para a indústria e para a população em geral. As inovações nesta área trazem novas soluções para aplicações destes materiais que, além de gerarem oportunidade de renda para famílias de recicladores em centros urbanos, propiciam o retorno destes materiais para a cadeia produtiva como matéria prima, e neste processo, impactam positivamente com menor consumo de energia, reduzindo a emissão de gases efeito estufa, além de substituir e também evitar, maiores extrações de minério da crosta terrestre.

Em 2010, com base na análise de reservas secundárias de alumínio de 19 países, haviam 85 milhões de toneladas nos EUA, 65 milhões de toneladas na China, 29 milhões de toneladas no Japão e mundialmente os valores eram de 413 milhões de toneladas. Nos EUA, as estimativas apresentadas eram que suas reservas secundárias seriam maiores que as suas reservas primárias e que quantidades consideráveis de materiais secundários de alumínio ainda estavam sendo acumuladas em aterros sanitários (Maung *et al.*, 2017).

Na fundição de metais reciclados, ocorre a formação de escórias formando óxidos de alumínio. Este resíduo de processo industrial é nocivo ao homem e ao meio ambiente sendo relevante o reconhecimento da reciclagem direta e indireta, além de estratégias de recuperação destes resíduos, bem como, métodos de gerenciamento e reuso destes materiais (Mahinroosta e Allahverdi, 2018). A escória de sal de alumínio é formada durante a fundição do resíduo de alumínio, a qual contém de 15 % a 30 % de óxido de alumínio, de 30 % a 55 % de cloreto de sódio, de 15 % a 30 % de potássio, de 5 % a 7 % de alumínio metálico e impurezas como carbetos, nitretos, sulfetos e fosfetos. Seu descarte em aterros é proibido na maioria dos países europeus, devendo ser gerenciada em conformidade com a legislação vigente. Dependendo da mistura bruta, a quantidade de escória pode variar de 200 a 500 kg por tonelada de alumínio secundário (Tsakiridis, 2012).

A reciclagem convencional de refundição de alumínio e cavacos de liga leve também necessita estudos, podendo ser substituídas por técnicas de reciclagem em estado sólido, convertendo os cavacos diretamente em materiais densos a granel ocasionando vantagens como a redução do consumo de energia, menores perdas de metal, bem como, menores emissões de gases nocivos. Fatores associados às propriedades mecânicas de amostras recicladas em estado sólido, as quais dependem principalmente da qualidade do cavaco e da microestrutura dos

correspondentes materiais a granel apresentando recomendações para o aprimoramento das técnicas de reciclagem em estado sólido e as perspectivas futuras do processo (Wan *et al.*, 2017).

Em uma visão geral do processo de reciclagem de alumínio desde a atualização do refugo até o processo de fundição existem inovações e novas tendências relacionadas às tecnologias de reciclagem de alumínio, bem como, a evolução dos tratamentos preliminares da sucata, como triagem, trituração e desmembramento. As tecnologias de fundição, assim como as condições operacionais e relações entre custos e eficiência dos processos de fundição e funcionamento do forno também são relevantes para garantir a efetiva reciclagem do alumínio e menores impactos econômicos e ambientais (Capuzzi e Timelli, 2018).

Outro fator a ser considerado, são os processos de fundição do alumínio que são determinísticos para o sucesso da reciclagem e reprocesso do alumínio secundário. As ligas secundárias de alumínio são produzidas a partir de sucata de alumínio industriais e resíduos de alumínio oriundos do reciclo. Segundo Hortalová *et al.* (2014) estes metais reciclados contêm diferentes elementos de liga, como Al, Cu, Fe, Si e Mg, que formam fases intermetálicas na matriz de alumínio e influenciam na microestrutura, propriedades mecânicas básicas e interferem na microdureza da liga de alumínio secundária. No entanto, de acordo com Brommer *et al.* (2011), a incerteza da composição em materiais secundários e condições variáveis de processamento inibem a utilização mais expressiva de materiais secundários na produção de novas ligas de alumínio.

Um dos desafios para a reutilização do alumínio secundário é encontrar aplicações que admitam em sua composição, ligas à base de alumínio secundário, que possam resultar em produtos de uso comercial com as mesmas características dos produtos à base de alumínio primário. Para Ibragimov e Ismailov (2018) uma solução é encontrar elementos de liga (solutos) para adicionar às ligas à base de alumínio secundário, que proporcionem as propriedades necessárias do produto de interesse. As ligas à base de alumínio, possuem características únicas, entre as quais, a alta condutividade elétrica, sendo amplamente utilizadas em indústrias do ramo elétrico na produção de fios de linhas de alta tensão.

Segundo Smyrak *et al.* (2011) a condição atual é baseada, por um lado, nos condutores tradicionais de aço e alumínio, com suas inúmeras fraquezas, e por outro lado, soluções de última geração que empregam ligas de alumínio autoportantes, altamente condutoras, termicamente e reologicamente resistentes. Uma composição apropriada desses elementos, bem

como a tecnologia de fabricação e produção de ligas (fundição, laminação e trefilação), criam oportunidades potenciais para a obtenção de fios e condutores com propriedades de aplicação exigidas pela engenharia de energia elétrica.

Com este sentido, esta pesquisa foi construída com o alicerce da reciclabilidade de latas de alumínio, energias renováveis e pelo viés da sustentabilidade. O desafio foi transformar latas de alumínio, por meio dos processos de fundição por gravidade e laminação à frio, em uma fita condutora de corrente elétrica para a conexão de células solares na montagem de módulos fotovoltaicos. Buscando assim, aplicar materiais recicláveis de forma sustentável aliada à produção de energias renováveis com o desenvolvimento de um produto tecnológico com maior valor agregado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e caracterizar uma fita condutora de corrente elétrica a partir de alumínio reciclado visando sua aplicação como barramento condutor de energia elétrica para a conexão de células solares na montagem de módulos fotovoltaicos.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar materiais pós consumo para formar a liga base para a produção da fita condutora de corrente elétrica, que formará o barramento condutor capaz de unir as células solares aos módulos fotovoltaicos;
- Identificar a composição química das ligas fundidas por meio de análises químicas.
- Tratar termicamente as ligas formadas, utilizando os processos de homogeneização e recozimento para facilitar o processo de laminação à frio.
- Realizar o processo de laminação à frio para reduzir a espessura dos corpos de prova – fitas condutoras;
- Analisar por meio de microscopia óptica e de varredura a microestrutura das ligas fundidas.
- Analisar por meio de testes de tração, dureza, anisotropia e encruamento as propriedades físicas e mecânicas da fita laminada.
- Realizar os testes de condutividade na fita condutora de corrente elétrica obtida.

2.3 Aspecto Inovador da Tese

O Programa de Mestrado e Doutorado em Tecnologia Ambiental possui uma linha de pesquisa denominada: revalorização, tratamento e disposição de resíduos sólidos. Nesta linha de pesquisa que esta tese está alicerçada.

O caráter inovador desta tese está fundamentado na composição e transformação de materiais pós consumo (alumínio, cobre e magnésio) em uma liga metálica. Com esta liga, procurou-se por meio de uma metodologia bastante robusta transformar aqueles materiais pós consumo, por meio dos processos de fundição por gravidade e posterior processo de laminação à frio, em uma fita condutora de corrente elétrica que tinha como objetivo a interconexão de células solares na montagem de módulos fotovoltaicos. A fita formada apresentou características de condutividade elétrica bastante semelhantes aos barramentos comercialmente utilizados.

Além de desenvolver um produto com materiais secundários, sua aplicação na interconexão de células solares na montagem de módulos fotovoltaicos também foi considerada inovadora, pois atualmente esta interconexão, é realizada apenas por produtos fabricados com materiais primários.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica da pesquisa foi realizada por meio de uma publicação científica de um artigo de revisão sistemática de literatura. Este artigo, realizou a fundamentação do estado da arte em três áreas principais, com base nos objetivos definidos na pesquisa: Reciclagem de alumínio secundário, Processo de fundição e formação de ligas à base de alumínio.

3.1 ARTIGO 1 – Aplicações sustentáveis para descarte de alumínio reciclado: uma revisão sistemática da literatura usando o software *SciMAT*.

Gilson Gilmar Holzschuh¹, Jorge André Ribas Moraes²; Sérgio Boscato Garcia³; Izete Zanesco⁴; Rosana de Cássia de Souza Schneider⁵; Liane Mahlmann Kipper⁶

- 1- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil – gilsonh@unisc.br
- 2- Head Department of Engineering Architecture and Computing, Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - jorge@unisc.br
- 3- Mechanical Engineering Course Coordinator - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul², RS, Brazil – sergio.garcia@pucrs.br
- 4- Postgraduate Program in Materials Engineering and Technology - Coordinator of the Solar Energy Technology Nucleus - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul², RS, Brazil – izete@pucrs.br
- 5- Coordinator of the Postgraduate Program in Environmental Technology - Master and Doctorate – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - rosana@unisc.br
- 6- Postgraduate Programs in Environmental Technology and Industrial Systems and Processes – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - liane@unisc.br

¹ Independência Avenue, 2293 - University, Santa Cruz do Sul - RS, Brazil, ZIP Code 96815-900.

² Ipiranga Avenue, 6681, Porto Alegre - RS, Brazil, ZIP Code 90619-900.

Resumo

Esta revisão tem como objetivo realizar um mapeamento científico sobre o estado atual dos processos de reciclagem de latas de alumínio, processos de fundição e formação de ligas de alumínio nos últimos 15 anos. Assim, a questão da pesquisa foi definida pela identificação da estrutura do campo científico da pesquisa e a relação da reciclagem de alumínio, processos de fundição e formação de ligas à base de alumínio, bem como suas aplicações. Portanto, três questões foram estudadas: Como está o estado da arte nas práticas e processos de reciclagem de alumínio? Quais processos, métodos e técnicas de fundição de alumínio estão sendo realizados? E, como está o estado atual da formação de ligas secundárias à base de alumínio e quais são os elementos de liga utilizados, bem como suas aplicações após a formação das ligas? As questões foram descritas como pontos de pesquisa A) reciclagem de alumínio; B) processos de fundição; e C) formação de ligas à base de alumínio e suas aplicações, respectivamente. Para análise bibliométrica foi aplicado o software *SciMAT*. Através do mapa sobreposto e do mapa da evolução, foi possível detectar a evolução temporal do campo científico na área pesquisada. A análise de agrupamento permitiu identificar as palavras motoras. Por meio da rede de conexões, foram verificadas palavras-chave ligadas aos temas motores, indicando as áreas de conexão do campo de pesquisa e os principais autores. Os modelos de simulação foram fatores de inovação na área, bem como os softwares *ANSYS* e *ProCAST*. Na área de formação de ligas, a técnica de *Liquid Cleaning Metal Analyzer* (LiCMA) foi destacada na produção de ligas de alta qualidade e no uso de refinadores de grãos como o TiB_2 . As importantes conexões com a viabilidade da reciclagem de alumínio foram apresentadas nesta revisão.

Palavras-chave: Revisão Sistemática da Literatura. Reciclagem de Alumínio. Processos de Fundição. Ligas de Alumínio. *SciMAT*.

DESTAQUES (HIGHLIGHTS):

- Realiza uma revisão sistemática da literatura sobre o estado atual da reciclagem de alumínio, processos de fundição e formação de ligas de alumínio.
- Realiza um mapeamento científico usando o software *SciMAT*.
- Identifica o campo científico apresentando as principais palavras-chave.
- Apresenta uma linha do tempo dos principais autores da área de pesquisa.
- O estado da arte apresenta as principais inovações apresentadas pelos autores no período da pesquisa.
- Os principais desafios e perspectivas na área de reciclagem, fundição e formação de ligas de alumínio.

3.1.1 Introdução

O aprofundamento do estado da arte sobre a reciclagem e tecnologias para a reciclagem do alumínio é importante, sobretudo com o emprego de técnicas sistemáticas de revisão como as Bibliométricas Zupic e Čater (2015), Cobo *et al.* (2018) e Kipper *et al.* (2019), a Metanálise Hermansson *et al.* (2019) ou a Revisão Sistemática de Literatura - RSL (Thomé *et al.*, 2016). Considera-se que realizar a síntese de pesquisas anteriores é uma das tarefas mais importantes para o avanço de uma tecnologia e implantação de inovações. As tradicionais abordagens qualitativas de revisão e quantitativas de análise podem ser complementadas com o uso de métodos de mapeamentos científicos, baseados em análise quantitativa e métodos bibliométricos e desta forma, tornarem a revisão do estado da arte, muito mais precisa e assertiva (Zupic e Čater, 2015).

Assim, objetivou-se reconhecer o estado da arte atual sobre a reciclagem do alumínio secundário, em especial, sobre latas de alumínio oriundas da coleta dos resíduos nos principais centros urbanos do mundo, contribuindo para inovar no reuso/reciclo do alumínio secundário. Além disso, analisar os processos de fundição do alumínio, investigando métodos e técnicas de fundição, quais as ligas formadas e os elementos de liga recomendados e suas aplicações após fundidos e transformados em produto final.

3.1.2 Metodologia

Para este estudo, foram utilizados métodos sistemáticos de revisão da literatura e bibliométricos de acordo com Kitchenham e Charters (2007), Neto *et al.* (2007) e Cobo *et al.* (2012) que possibilitam a análise objetiva dos resultados, evitando viés tendencioso da pesquisa de revisão. Da mesma forma, outras pesquisas foram consideradas para a definição metodológica porque consideram que a revisão sistemática da literatura (RSL) é baseada em evidências, apresenta síntese qualitativa e quantitativa, baseiam-se em critérios explícitos e uniformemente aplicados, estratégias de busca definidas em fontes abrangentes, (Dyba *et al.*, 2007; Sampaio e Mancini, 2007; Kitchenham *et al.*, 2009; Zupic e Čater, 2015; Thomé *et al.*, 2016; Donato e Donato, 2019; Kipper *et al.*, 2019).

Para identificar a estrutura do campo científico da pesquisa, foram definidos três pontos de investigação relevantes: A) reciclagem de alumínio - (como está o estado da arte das práticas e processos de reciclagem de alumínio?); B) processos de fundição - (Como estão sendo

realizados os processos, métodos e técnicas de fundição de alumínio?); e, c) formação de ligas a base de alumínio e suas aplicações – (Como está o estado atual das pesquisas em formação de ligas a base de alumínio secundário e quais os elementos de liga utilizados, bem como, suas aplicações após a formação das ligas?).

Delimitou-se o período de busca em 15 anos, considerando que mais de 60% dos documentos publicados sobre reciclagem de alumínio na base Scopus ocorreu neste período conforme apresenta a Figura 1, sendo que, a partir de 2011, as pesquisas na área avançaram fortemente, sofrendo um leve declínio em 2015, mas em 2016, as pesquisas voltaram a crescer, formando um pico no ano de 2019.

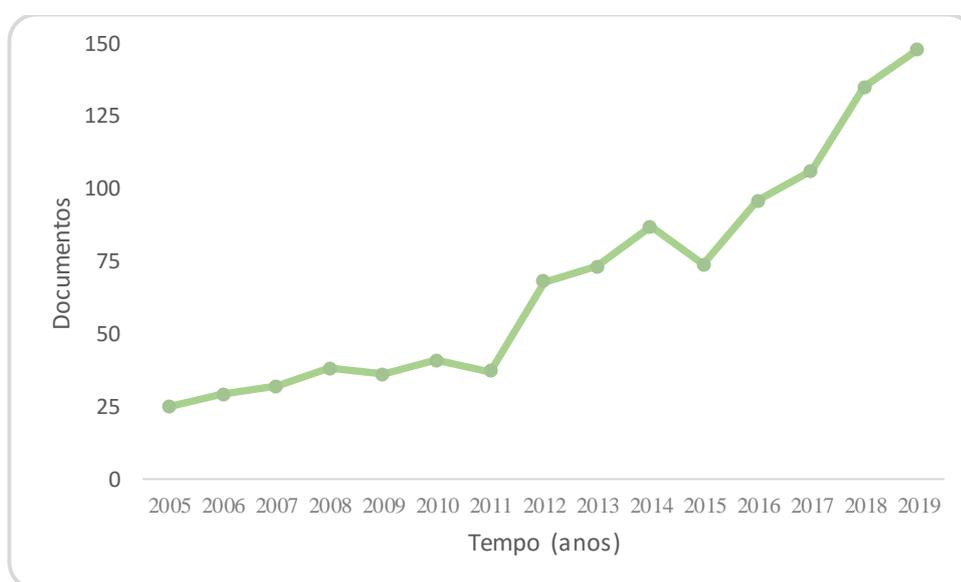


Figura 1: Publicações entre 2005 – 2019 na Base Scopus usando as palavras-chave apresentadas na Tabela 1.

Como ferramenta de pesquisa, de extração e de quantificação das informações, foi utilizado o software *SciMAT* que, segundo Cobo *et al.* (2012) e Kipper *et al.* (2019), além de ser gratuito para download, oferece métodos, algoritmos e medições de qualidade e desempenho para realização de todos os estágios do mapeamento científico, desde o pré-processamento até a visualização dos resultados.

Os critérios de inclusão aplicados para a busca dos estudos primários foram baseados no título, resumo e palavras-chave dos documentos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Strings de busca na base Scopus e dados de citação e co-citação inventariados para realização dos estudos quantitativos.

Pontos da Pesquisa	String de busca	Citação	Co-citação
A	"Aluminum recycl*" AND "Aluminum can*" OR "Aluminum reuse" OR "Aluminum reprocess*" OR "Process mapp*" OR "Recycl* process*" OR "Recycl* methods" OR "Recycl* techniques" OR "Identify process*".	67 documentos primários	763 documentos citaram 67 documentos
B	"Aluminum Cast*" AND "Aluminum Can*" OR "Yield" OR "Process*" OR "Reprocess*" OR "Reuse" OR "Cast* Methods" OR "Aluminum Reprocess*".	857 documentos	3.962 documentos citaram 857
C	"Aluminum Alloy" AND "Alloy formation" OR "Alloy production" OR "Alloy preparation" OR "Addition of metals" OR "Metal incorporation" OR "Metal inclusion" OR "Metal Melting" OR "Alloy Applications" OR "Alloy Purposes".	302 documentos primários	3.304 documentos citaram 302 documentos

Na etapa do pré-processamento, que corresponde a extração e análise dos dados, ocorreu a verificação de itens duplicados, palavras e documentos, formando agrupamentos, bem como, termos similares. Permaneceram no tratamento de dados um total de 1.182 documentos, distribuídos dentro de 5 subperíodos (2005-2007; 2008-2010; 2011-2013; 2014-2016; 2017-2019). A análise foi realizada com base em Cobo *et al.* (2012) e Kipper *et al.* (2019), definida pelos autores, por fonte e por palavras citadas sendo que para a redução de palavras, foi aplicado a frequência mínima de duas palavras e, unidas as palavras similares. A seleção do tipo de matriz foi por co-ocorrência como forma de construir a rede.

Devido ao grande número de palavras identificadas, foram aplicados filtros de redução de rede. Para isso, selecionou-se apenas palavras-chave com no mínimo 6 documentos associados. A semelhança entre as palavras-chave foi avaliada usando o índice de equivalência Callon *et al.* (1991) que calcula a força de ligação entre os clusters (Cobo *et al.*, 2013). Para os critérios de formação dos clusters, foi aplicado um algoritmo de centro simples que demonstra a força do vínculo entre clusters, e para a construção da rede, foi aplicada a configuração de tamanho máximo e mínimo do cluster em 25 e 4 palavras, respectivamente (Cobo *et al.*, 2011). Para realizar o mapeamento dos documentos, utilizou-se a configuração: *core-mapper* e *secondary mapper*. Como medida de qualidade, aplicou-se o indicador *h-index* e *sum citations*. Para analisar as medidas longitudinais dos mapas, utilizou-se o índice *Jacard's* para avaliar o mapa de evolução, e para avaliar o mapa sobreposto, utilizou-se do índice de inclusão.

Os temas detectados foram visualizados por meio de dois instrumentos de visualização diferentes: diagrama estratégico He (1999), e rede temática (Cobo *et al.*, 2011). Para a descoberta de áreas temáticas foi analisada a evolução dos temas de pesquisa para identificar a evolução temporal dos temas, bem como o mapeamento e identificação do campo de pesquisa. Para a construção dos mapas temáticos, foi utilizado o índice de inclusão. Por fim, a contribuição relacionada aos temas de pesquisa foi avaliada de forma quantitativa e qualitativa utilizando-se o índice h que mede a quantidade de documentos publicados e o número de citações recebidas em cada documento.

3.1.3 Resultados

Em uma análise geral, países como EUA, Alemanha e China e, em menor expressão, Brasil, Federação Russa e Noruega apareceram entre as três primeiras posições. Quanto as publicações por área, tem destaque a Engenharia, Ciência dos Materiais, Física, seguida por Engenharia Ambiental e Ciência Ambiental.

Para os resultados iniciais, analisou-se os períodos estatisticamente, relacionando os períodos com a quantidade de documentos e palavras-chave listadas como mostra a Figura 2. Observa-se que a produção se mantém ao longo dos períodos de dois anos indicando que a área continua em desenvolvimento científico.

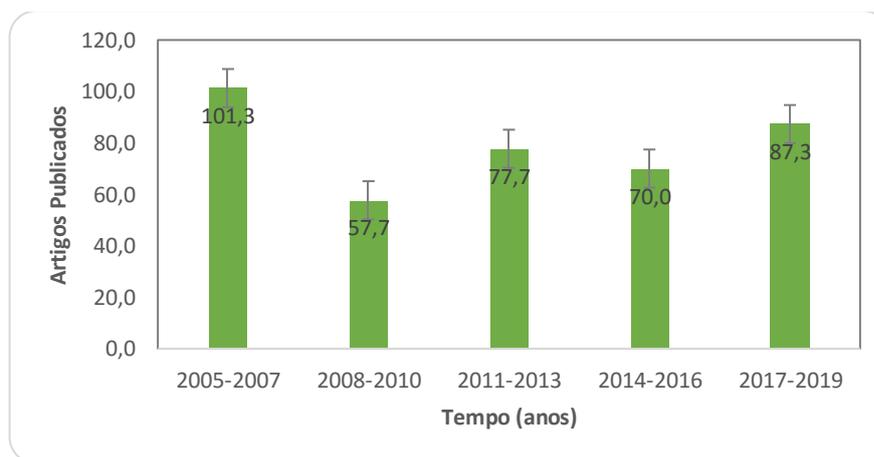


Figura 2. Média e desvio padrão da produção encontrada relativa às três questões em estudo relacionadas em períodos, conforme o software *SciMAT*.

Corroborando com estes valores, tem-se a Figura 3 relativa a evolução das palavras-chave, na qual os círculos representam o número de palavras-chave no subperíodo, as setas

horizontais representam o número de palavras-chave compartilhadas entre os subperíodos e índice de estabilidade (%) e as setas convertidas ou não para o círculo correspondem a variação ocorrida no período, onde a seta superior de entrada representa o número de novas palavras-chave que entram no período e a seta superior de saída, representa as palavras exibidas naquele subperíodo e que não são citadas no subperíodo seguinte, sendo descartadas devido a um processo de inovação na área (Cobo *et al.*, 2012; Cobo *et al.*, 2018; Kipper *et al.*, 2019).

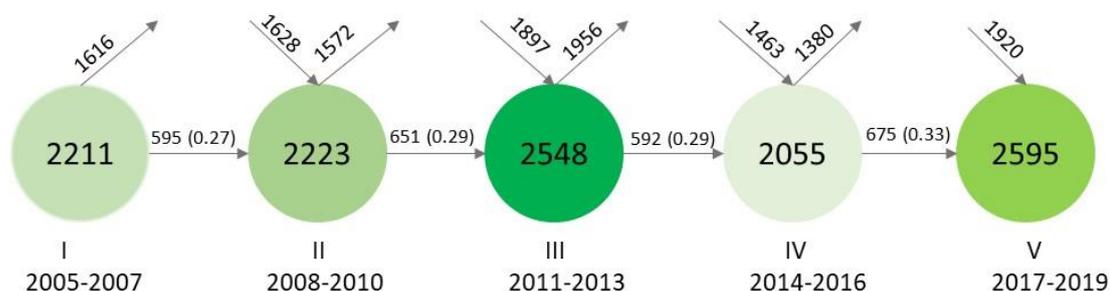


Figura 3: Mapa de evolução das palavras-chave em cada subperíodo.

Com relação aos tópicos mais relevantes, observa-se que a linha principal de pesquisa ao longo dos 15 anos, deu-se em toda a linha superior da Figura 4, evidenciando o tema principal na área/subperíodo. No primeiro subperíodo, as pesquisas estavam concentradas em ligas de alumínio, no segundo período destacou-se como foco a palavra “Alumínio”.

No terceiro período, os interesses voltaram-se para fundição do alumínio e no quarto e quinto períodos, a concentração retornou para pesquisas por ligas de alumínio. Percebe-se que a partir do terceiro período a palavra “Reciclagem” surgiu com uma linha contínua, demonstrando interesse em sua exploração, o qual manteve-se no quarto período, alcançando um papel mais importante no quinto período, confirmando o interesse dos pesquisadores por esta área associada a formação de ligas, destacada como tema principal.

Para a análise longitudinal das áreas temáticas da pesquisa, elaborou-se um mapa sobreposto das palavras-chave, ao longo do período pesquisado. A Figura 4 apresenta a evolução das palavras-chave no campo científico, representadas por meio de um mapa sobreposto, sendo destacado em cada subperíodo, as palavras chave que mais obtiveram citações. As linhas que conectam os clusters das palavras-chave representam a força de ligação entre as palavras e, quanto mais espessa a linha, mais forte é a relação entre as palavras conectadas.

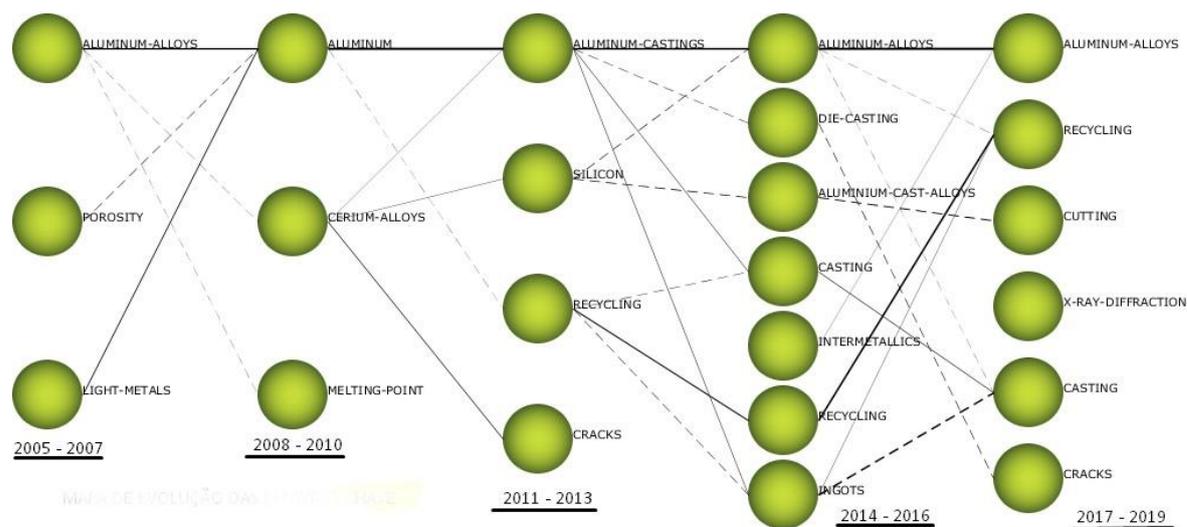


Figura 4: Evolução longitudinal das áreas de pesquisa no período estudado, obtidos pelo SciMAT.

Para uma análise detalhada em cada subperíodo da pesquisa, foi realizada a síntese dos dados na forma de diagramas estratégicos do campo de pesquisa (Figura 5), que classificam os clusters de acordo com sua centralidade e densidade. A centralidade mede, para um determinado cluster, a intensidade de seus vínculos com outros clusters. Quanto mais numerosos e fortes esses vínculos, maior sua importância para o campo de pesquisa estudado. Segundo Callon *et al.* (1991) e Cobo *et al.* (2012), o cluster é um ponto de passagem necessário e essencial para qualquer pessoa interessada em investir esforços nos clusters associados, direta ou indiretamente. A densidade fornece uma boa representação da capacidade do autor de se manter e, se desenvolver, ao longo do tempo no campo da pesquisa.

O primeiro subperíodo de pesquisa, apresentado na Figura 5 A, demonstrou como tema motor, a palavra-chave “*Aluminum Alloy*”, com 3.209 citações acumuladas, índice h de 29, sendo citada em 225 documentos. Aparecem ainda no quadrante de temas motores, as palavras-chave “*Porosity*”; “*Light-Metals*” e “*Castability*” com 261, 120 e 33 citações respectivamente. Isto demonstra que, embora o tema motor principal seja “*Aluminum Alloys*” os pesquisadores realizaram combinações com estas palavras em conjunto com a palavra principal. Para o segundo subperíodo, representado pela Figura 5 B, destacou-se como tema motor a palavra-chave “*Aluminum*” com 1.228 citações. Mostrando forte ligação com o tema motor, apresentam-se as palavras: “*Alloys*”, “*Melting Point*” e “*Liquid Metals*” com 408, 168 e 121 citações acumuladas respectivamente, indicando como campo de pesquisa, neste

subperíodo, estudos centrados em investigar a relação do alumínio com a formação de ligas, bem como pontos de fusão dos metais no estado líquido.

A palavra-chave “*Aluminum-Casting*”, com 900 citações em 152 documentos, destacou-se como tema motor do terceiro subperíodo, apresentado na Figura 5 C, mostrando forte ligação com a palavra “*Scrap-Metal-Reprocessing*” apresentando 316 citações em 42 documentos e Índice h 10. Esta condição, demonstra que os pesquisadores, neste subperíodo, apresentaram maior interesse nas pesquisas sobre os resíduos de alumínio e sucatas. Para o quarto subperíodo, apresentado na Figura 5 D, a palavra “*Aluminum-Alloys*” recebeu 1.289 citações em 152 documentos, com Índice h 16. No quadrante dos temas motores, mostrando forte ligação com o tema motor, apresentam-se as palavras: “*Recycling*”, “*Laser-Beam-Welding*” e “*Die-Casting*”. Esta ligação demonstra o interesse na formação de ligas utilizando materiais reciclados, bem como, em processos de soldagem a laser e fundição sob pressão.

Da mesma forma, a palavra-chave “*Aluminum-Alloys*” voltou a ser destaque no último subperíodo, apresentada na Figura 5 E. Recebeu 334 citações em 172 documentos, com Índice h 8. No quadrante dos temas motores, mostrando forte ligação com o tema motor, apresentam-se as palavras: “*Recycling*”, “*Casting-Alloy*”, “*3D-Printers*” e “*Tensile-Testing*”, indicando o interesse das pesquisas relacionadas a formação de ligas de alumínio, materiais reciclados, fundição de ligas, impressão 3D e testes de tensão. No quadrante inferior direito, destaca-se a palavra “*Casting*” com 67 citações, em 30 documentos e Índice h 5, indicando a palavra como básica ou transversal sugerindo uma perda de conexão desta palavra com os temas motores deste subperíodo.

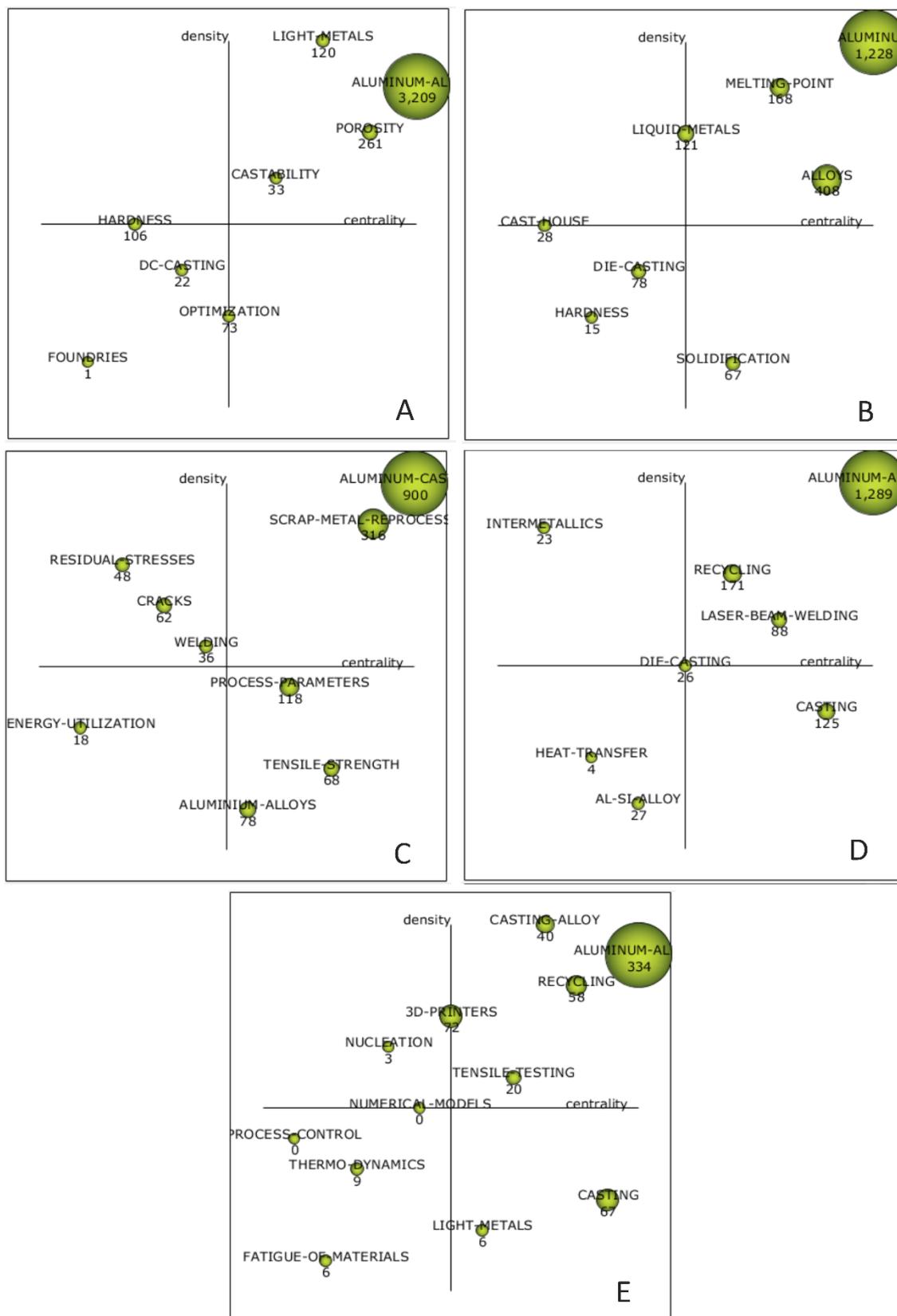


Figura 5: Diagrama estratégico destacando o tema motor em cada um dos 5 subperíodos pesquisados, onde A) 2005 – 2007; B) 2008 – 2010; C) 2011 – 2013; D) 2014 – 2016 e E) 2017 – 2019.

Para uma análise dos autores que realizaram publicações nos subperíodos analisados, foi desenvolvida a Figura 6. Esses autores representam a base teórica de referência para a pesquisa realizada. De acordo com a análise do diagrama estratégico, com base na sua posição no diagrama estratégico, foram identificados o número de documentos publicados no subperíodo e sua rede de conexões, assim como os principais autores em cada subperíodo de três anos. Assim, as referências para o estado da arte da pesquisa foram definidas em cada subperíodo conforme apresentado na Figura 6 e, distribuídos da seguinte forma: 6A - Viswanathan, S., Su, X.M., Yang, M.; 6B - Soares, D., Qingming, C., Valtierra, S.; 6C - Yan, X., Mercado-Solís, R.D., Wang, Y.; 6D - Yan, X., Mercado-Solís, R.D., Wang, Y.; and, 6E - Li, Q., Wang, Y., Gehre, P., Wang, H.

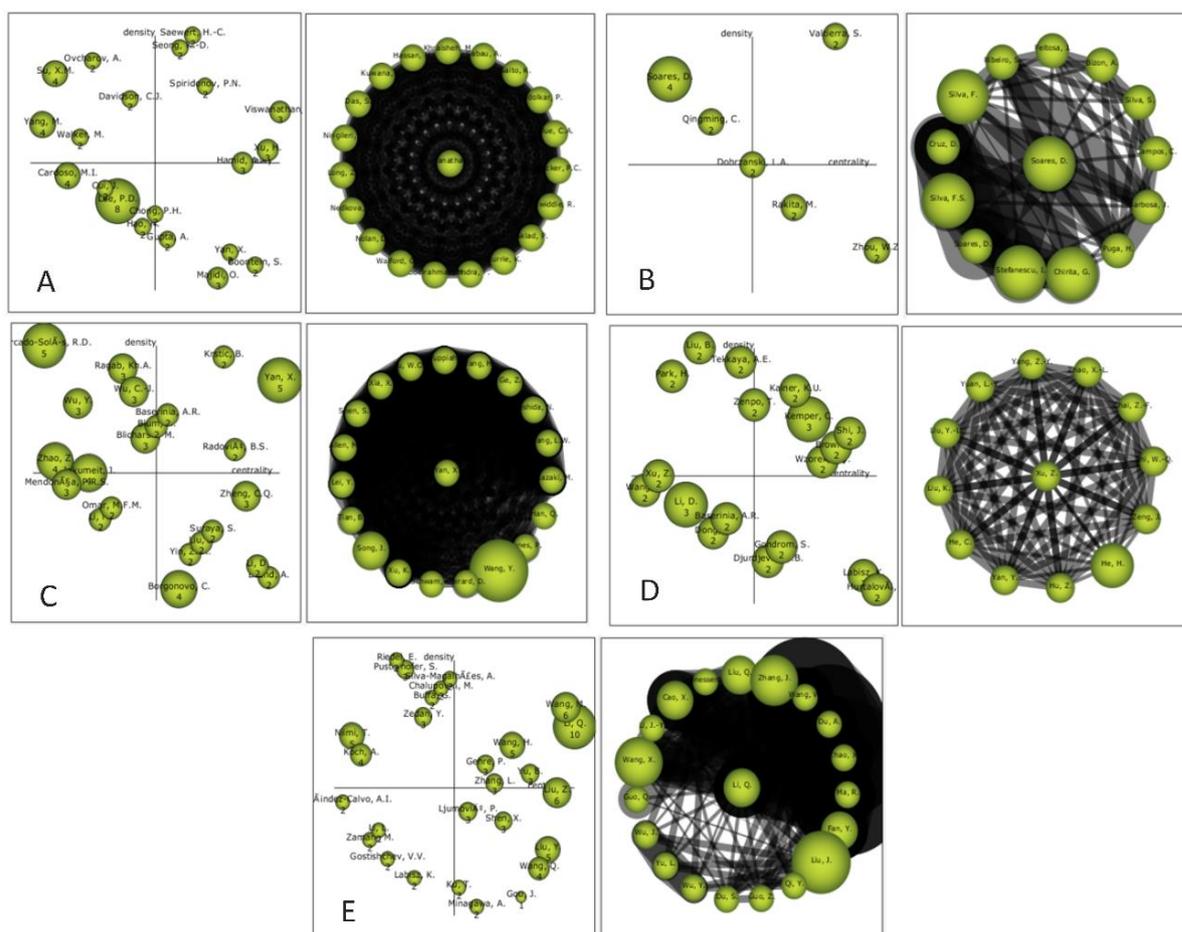


Figura 6: Diagrama estratégico destacando os autores em cada subperíodo da pesquisa; onde A) 2005 – 2007; B) 2008 – 2010; C) 2011 – 2013; D) 2014 – 2016 e E) 2017 – 2019.

Ao analisar os documentos listados, nota-se uma forte relação entre os principais autores no período pesquisado. Alguns autores participam de várias publicações simultaneamente. Da mesma forma, são citados em quase todos os subperíodos analisados, demonstrando a sua importância e relevância na área de pesquisa. Neste sentido, pode-se destacar de uma forma geral: Valtierra, S. Liu, B., Wang, Y., Wang, T. e Wang, H. assim como, Soares, D., Yan, X., Xu, Z. e Li, Q. Estes autores também compartilham áreas comuns de pesquisa conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Áreas comuns compartilhadas pelos principais autores do período.

Aplicações do alumínio no setor automobilístico.	(Han <i>et al.</i> , 2008; González <i>et al.</i> , 2011; Carrera, González, <i>et al.</i> , 2012; Carrera, Rodríguez, <i>et al.</i> , 2012; González <i>et al.</i> , 2013; Wang, Q. <i>et al.</i> , 2017).
Simulação de processos, utilizando sistemas computacionais e modelos matemáticos.	(Long <i>et al.</i> , 2005; Allison <i>et al.</i> , 2006; Yan and Lin, 2006; Xu <i>et al.</i> , 2009; Liu e Li, 2011; Wang <i>et al.</i> , 2011; Reis <i>et al.</i> , 2012; Wang and Schwam, 2012; Wang, H. <i>et al.</i> , 2017; Gu <i>et al.</i> , 2019; Wang, Y. <i>et al.</i> , 2019).
Aplicações específicas na formação de ligas à base de alumínio com inclusão de outros elementos, oferecendo novas propostas de ligas.	(Wang <i>et al.</i> , 2007; Mohamed <i>et al.</i> , 2008; Canales <i>et al.</i> , 2012; Xu <i>et al.</i> , 2012; Yang <i>et al.</i> , 2014; Samuel <i>et al.</i> , 2018; Wang <i>et al.</i> , 2018; Zhang <i>et al.</i> , 2019).
Processos de fundição, o desenvolvimento de materiais - análises de microestruturas e formações de grãos e de cristais das estruturas metálicas demonstradas por microscopia óptica, microscopia eletrônica, raios X e análises químicas, bem como ensaios físicos e mecânicos.	(Zhou <i>et al.</i> , 2005; Ning <i>et al.</i> , 2006; Xu, Z. <i>et al.</i> , 2007; Chirita <i>et al.</i> , 2008; Li <i>et al.</i> , 2008; Qingming <i>et al.</i> , 2009; Chirita <i>et al.</i> , 2010; Li <i>et al.</i> , 2011; Wang <i>et al.</i> , 2012; Zeng <i>et al.</i> , 2014; Wang, H. J. <i>et al.</i> , 2015).
Reciclagem de alumínio.	(Puga <i>et al.</i> , 2009; Wei <i>et al.</i> , 2019).

A frequência dos autores pode ser observada na linha do tempo da Figura 7.

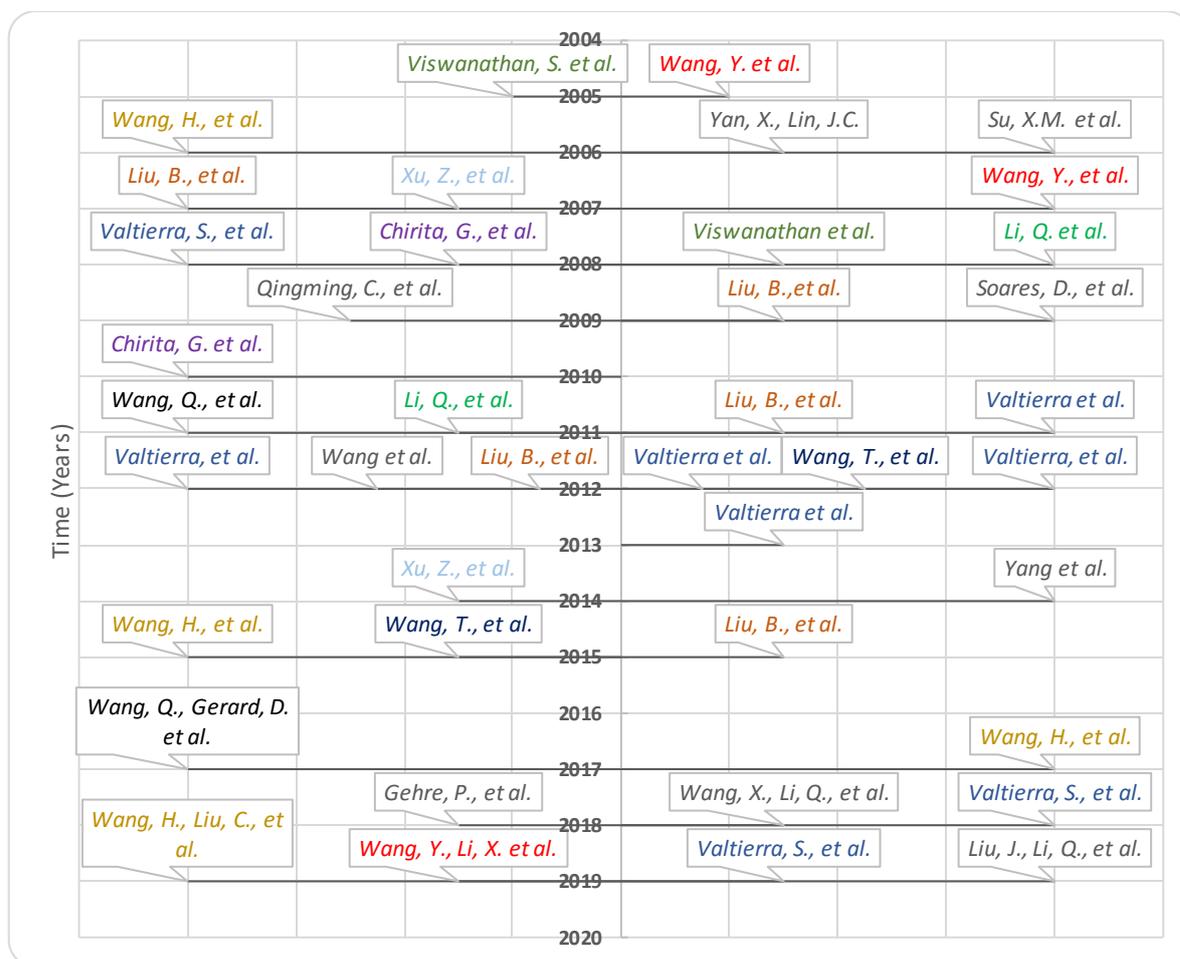


Figura 7: *Timeline* de autores relevantes no período da pesquisa.

Portanto, foi apresentada à base da RSL precedendo o estado da arte sobre as questões, considerando os destaques sobre o período, palavras-chave e autores.

3.1.4 Estado da arte

Fundição de alumínio

Os processos de fundição foram avaliados por meio de diferentes técnicas de fundição. Chirita *et al.* (2008) estudaram os efeitos centrífugos em peças fundidas com reforços funcionais a base de partículas de silício. Foi realizada uma caracterização de solidificação em vários pontos do molde durante a fundição para uma análise da dinâmica dos fluidos no interior do molde e verificou-se o comportamento de solidificação em diferentes partes do componente, além da distribuição de fases, formas dos eutéticos de silício bem como a densidade dos poros.

Realizaram uma comparação entre as peças fundidas, tanto pela técnica de fundição centrífuga, quanto pela técnica de fundição por gravidade e concluíram que o processo centrífugo, em comparação com a fundição por gravidade, não influencia a composição química ao longo da fundição, porém, interfere na morfologia e distribuição das fases. Estes efeitos estão relacionados com o processo de solidificação, na etapa de nucleação. Além disso, variáveis como dinâmica dos fluidos e vibrações, podem explicar a diferença nas características metalúrgicas do material fundido.

Na mesma linha de pesquisa, Chirita *et al.* (2010) citam novamente que, a principal variável que afeta as propriedades mecânicas e metalúrgicas, é a dinâmica dos fluidos do processo.

Com relação aos fatores que influenciam o processo de preenchimento de moldes permanentes com sistema de abertura de fendas nos moldes, Qingming *et al.* (2009) desenvolveram um sistema de monitoramento por imagem com raio X em tempo real para avaliar o fluxo do fundido. Algumas variáveis foram identificadas como dimensões, espessura da ranhura, rugosidade da camada de revestimento do molde e a temperatura do molde na parte superior da cavidade no fluxo do material fundido. O controle do gradiente de temperatura é fundamental no processo de vazamento e no processo de solidificação, bem como na formação dos grãos do metal formado.

A fundição para fabricação de paredes finas e complexas de alumínio pode ser realizada com moldes de cerâmica e fundições contra a gravidade. O molde foi feito com materiais cerâmicos e as peças foram vazadas contra a gravidade. O ajuste da pressão foi necessário para favorecer um fluxo não turbulento, resultando em contornos claros ao final da solidificação do fundido e para facilitar a compensação do encolhimento durante a solidificação (Zeng *et al.*, 2014).

Em uma pesquisa anterior, Xu *et al.* (2007) já haviam investigado a fundição sob pressão para verificar as alterações do teor de hidrogênio no alumínio fundido durante a fundição sob pressão ajustada (CAP). A proposta foi realizar uma nova fundição de baixa pressão com função de desgaseificação, utilizando o ajuste da pressão. Analisaram as influências da umidade do ar comprimido no teor de hidrogênio durante os programas cíclicos de pressurização sob vácuo que atuou positivamente no refino do alumínio fundido. Sob a condição de ar comprimido seco, o conteúdo de hidrogênio pode ser mantido em um nível tão baixo que facilitou a obtenção de peças fundidas com alta estanqueidade ao ar.

Na mesma linha Wang *et al.* (2012) investigaram a produção de fundidos de alumínio com paredes finas utilizando moldes de gesso combinados com vazamento a vácuo e solidificação sob pressão. Realizaram o controle multiponto e otimizaram o tempo de vazamento, posição de vazamento, temperatura do molde e temperatura do vazamento. As paredes finas resultantes foram consideradas dentro dos requisitos da especificação.

Li *et al.* (2008) desenvolveram um sistema de fundição eletromagnética de alumínio de rolo duplo com um conversor autônomo AC / AC trifásico controlado de forma independente. Através da análise harmônica e medição em tempo real, verificaram que o sistema eletromagnético possui ondas harmônicas complexas, disponíveis para melhorar a qualidade das amostras. A análise do espectro mostrou que a frequência básica da corrente de cada fase é metade da frequência de controle central fornecida. A análise metalográfica do alumínio fundido 1070 pelo conversor AC / AC mostrou que a aplicação do sistema de fundição eletromagnética convertida em AC / AC em vez do modificador Al-Ti-B também pode obter os mesmos efeitos de refinamento de grãos, e os elementos de impureza foram distribuídos de maneira mais uniforme.

Na sequência, Li *et al.* (2011) pesquisaram o efeito do tratamento da solução nas propriedades mecânicas e na microestrutura do AA7085 em comparação com o AA7050. Os resultados indicaram que o maior teor de Zn, juntamente com o menor teor de Mg e Cu e Fe e Si estritamente confinados, fizeram com que a matriz do AA7085 obtivesse uma fase única maior e uma temperatura de fusão mais alta dos eutéticos multifásicos. Usando um pré-tratamento com temperatura mais baixa, a temperatura inicial de fusão das ligas pode ser aumentada e com isso, a dissolução completa dos constituintes remanescentes foi alcançada sem superaquecimento. O grau de supersaturação da matriz e a densidade da cavidade podem ser aumentados com a elevação da última temperatura da solução, o que resulta no aumento da tenacidade à fratura e na otimização da microestrutura após o envelhecimento.

A aplicação de um novo acoplamento que agita o processo de fundição DC para lingotes de alumínio grandes foi estudada por Wang *et al.* (2015). Lingotes de liga 7075 foram produzidos por um processo de fundição normal com resfriamento direto (NDC) e fundição com resfriamento direto com agitação por acoplamento (CDC), respectivamente. Foi analisado o efeito da tecnologia nas microestruturas, segregação da composição e propriedades mecânicas dos lingotes. Os resultados mostraram que a variação de temperatura no processo de fundição CDC foi mais uniforme do que no processo de fundição NDC. O grão dos lingotes CDC era

mais fino e mais esférico do que o grão dos lingotes do NDC. O tamanho do grão na borda, no raio de 1/2 e na posição central no lingote do CDC diminuiu 28 %, 22 % e 24 % em comparação com o tamanho do grão das posições correspondentes do lingote NDC, respectivamente. Os tarugos com maior desempenho e menor macrosegregação foram obtidos no caso do CDC. As tensões de fluxo e a diferença nas diferentes posições dos lingotes DC, medidos no simulador termo-mecânico, diminuíram quando a tecnologia de agitação de acoplamento foi usada no processo de fundição.

Zhou *et al.* (2005) avaliaram a mistura entre um fundido a alta temperatura com fundido de baixa temperatura para refinar o composto primário de Al_3Fe . Os resultados experimentais mostraram que o tratamento por fusão pode melhorar a morfologia e refinar o composto Al_3Fe ; a microestrutura da liga sem tratamento por fusão foi composta principalmente por Al_3Fe grosso e longo, semelhante a uma agulha, pouco distribuído e não uniforme. No entanto, o composto de Al_3Fe grosso em forma de agulha foi transformado em fino em forma de agulha e em grão após o tratamento por fusão. Além disso, a uniformidade e densidade da microestrutura foram bastante aprimoradas. Os resultados também sugeriram que existia uma melhor combinação de alta e baixa temperatura de fusão. A temperatura excessivamente alta levou a uma microestrutura grossa. Os resultados da Difração de Raios X mostraram que os compostos ricos em ferro na liga com ou sem tratamento não foram alterados, que ainda eram compostos $\alpha-Al$ e Al_3Fe . As principais razões para refinar a microestrutura foram aumentar a taxa de nucleação e inibir o crescimento ao longo da orientação preferida.

O efeito da microestrutura inicial das ligas A356 através do comportamento mecânico no estado semi-sólido foi avaliado por Ning *et al.* (2006). Uma ampla gama de microestruturas iniciais variou de uma estrutura dendrítica muito grossa a uma estrutura globular fina. Estas microestruturas foram produzidas na liga A356, usando o Método de Nucleação Controlada, monitorando a temperatura de vazamento durante a solidificação. Os materiais produzidos com um superaquecimento baixo exibem uma estrutura globular fina; apresentam uma tensão de compressão muito baixa no estado semi-sólido em comparação com os materiais vazados a altas temperaturas, que possuem estrutura grossa e dendrítica.

Formação de ligas de alumínio

A formação de ligas foi amplamente explorada por vários autores no período da pesquisa analisada. A formação de ligas a base de alumínio oferece diversas possibilidades e variações,

possibilitando aplicações em várias áreas. Uma das ligas mais pesquisadas é a liga Al-Si. Wang *et al.* (2007) analisaram uma fabricação de liga Al-Si por meio do processo de fundição carbotérmica de minério aluminoso. Ocorreu a formação de impurezas como óxidos metálicos e ferro, porém apresentaram resultados para sua remoção utilizando ferro purificado e manganês por meio do controle da temperatura de filtragem.

Para melhorar as propriedades da liga de alumínio com base em Al-Si, Mohamed *et al.* (2008) analisaram a influência da adição de estanho nas propriedades microestruturais e mecânicas em ligas Al-Si-Cu e Al-Si-Mg. O estanho causa variações na ductibilidade e tenacidade das ligas, porém não afeta a resistência ao escoamento e, isso se dá, principalmente ao estado tensão-deformação no material da matriz.

Canales *et al.* (2012) também testaram as propriedades mecânicas em ligas Al-Si-Cu fundidas e tratadas termicamente. O teor de silício variou entre 5 % e 11 %, ferro de 0,3 % e 0,8 %, cobre 3,1 % e 3,5 %, manganês de 0,4 % e 0,45 % e magnésio variou de 0,27 % e 0,32 %. As propriedades mecânicas são afetadas pelo refino microestrutural, com maior influência, e pela quantidade de silício adicionado. O tratamento térmico aumenta o rendimento e a resistência à tração, mas reduz a ductibilidade do material.

A técnica do analisador de limpeza de metais líquidos (*liquid metal cleaning analyzer - LiMCA*) foi empregada por Samuel *et al.* (2018). Com a proposta de produzir alumínios fundidos de alta qualidade, a limpeza por fusão implica em uma relação de desempenho e qualidade da peça fundida além de fatores como as inclusões realizadas no metal fundido. A técnica do analisador de limpeza de metais líquidos é empregada para investigar a capacidade de medir inclusões como Al_2O_3 , Al_4C_3 , MgO, CaO, TiB_2 e $TiAl_3$ normalmente encontradas em ligas de alumínio. A técnica LiCMA captura aglomerações de TiB_2 no tubo da sonda que se mostra capaz de medir estes aglomerados, sem ocorrer entupimentos dos filtros, diferente de outras técnicas, onde ocorre o entupimento e suas medições são interrompidas. Desta forma, o uso da técnica LiMCA foi recomendada, tendo em vista, o fato de que as ligas Al-Ti-B são empregadas regularmente para o refino de ligas de fundição a base de alumínio.

Xu *et al.* (2012) analisaram o uso de Ti e Co como camada umectante para preenchimento da folga de Al e avaliar os impactos da resistividade na liga. Foi utilizado um modelo de polimento químico mecânico no Al (CMP). O modelo forneceu orientações claras sobre os critérios de seleção para as camadas de umedecimento, otimização do processo de deposição e design de consumo.

Yang *et al.* (2014) analisaram a produção de pó fino de Al_2O_3 produzido por plasma de radiofrequência a partir da escória da fundição de alumínio. Um sistema de síntese de plasma por radiofrequência (RF) foi projetado como uma fonte de alta temperatura para produzir Al_2O_3 e obteve-se um nível de pureza do pó de Al_2O_3 sintetizado em 99,95 %. A técnica de plasma RF desenvolvida foi comprovadamente adequada para tratar a escória de alumínio e convertê-la em um produto comercializável.

Wang *et al.* (2018) pesquisaram o efeito da adição de Si na estabilidade da interface Al-10Ti-5Cu-xSi. As ligas de SiC e Al-10Ti-5Cu-xSi foram compactadas para obter uma interface estável com 10 % em peso de Si. A análise das condições de processamento e das microestruturas indicou que uma excelente fase de Ti_3SiC_2 havia sido formada e a fase Al_4C_3 prejudicial foi eliminada com sucesso pela adição de 10 % em peso de Si à liga Al-10Ti-5Cu. A formação de Ti_3SiC_2 aumentou inicialmente e depois diminuiu, enquanto a formação de Al_4C_3 foi gradualmente inibida com o aumento do teor de Si. O Ti_3SiC_2 possui boa estabilidade química e flexibilidade. No entanto, o Al_4C_3 se deteriora em poucos dias, em compósitos expostos às condições ambientais. A presença de Ti_3SiC_2 na interface e a eliminação do Al_4C_3 melhoram a ligação metálica da liga Al-10Ti-5Cu-xSi ao SiC, melhorando assim a estabilidade interfacial do Al-10Ti-5Cu-xSi / SiC.

Em uma estrutura semelhante, Zhang *et al.* (2019) avaliaram a microestrutura e propriedades de ligas Al-Ga com diferentes razões de Mg / Sn. As ligas Al-Ga têm aplicação potencial no desenvolvimento de campos de petróleo e gás, enquanto sua utilização é restrita por baixa resistência e custo elevado. A taxa de degradação controlada, a resistência à compressão adequada e o baixo custo são as tecnologias cruciais a serem superadas para a aplicação da liga Al-Ga aos componentes de desenvolvimento de campos de petróleo e gás. Ligas Al-Mg-Sn-Ga de múltiplos elementos com diferentes razões Mg / Sn foram preparadas em forno elétrico por fusão. Os resultados indicaram que as ligas Al-Mg-Sn-Ga consistiam principalmente na fase da matriz Al e na fase Mg_2Sn . Com o aumento da razão Mg / Sn, o conteúdo da fase Mg_2Sn aumentou gradualmente, acompanhado pela conversão morfológica da fase Mg_2Sn de bloco irregular para agulha cruzada (ou pétala). A fase Al_3Mg_2 apareceu quando a razão Mg / Sn era maior que 2/1. Além disso, quando a relação Mg / Sn na liga Al-Mg-Sn-Ga aumentou de 1/4 para 3/1, a dureza correspondente melhorou de HV 64,9 para HV 152, e a resistência à compressão também se elevou, passando de 382 MPa para 540 MPa.

Reciclagem de materiais

A inclusão de materiais reciclados e secundários foi explorada por vários grupos de pesquisa no período de estudo (Nakajima *et al.*, 2010; Gaustad *et al.*, 2012; Liu e Müller, 2012; Cullen e Allwood, 2013; Løvik *et al.*, 2014; Paraskevas *et al.*, 2015). Foi realizada a incorporação de aparas de alumínio por meio de reaproveitamento de cavacos de usinagem dentro de uma planta de fundição. Concluíram que a eficiência da reciclagem depende do condicionamento do material de fusão, da técnica de fusão e da metodologia de tratamento dos metais a serem fundidos. Além disso, com taxas mínimas de formação de escória e aproveitamento em torno de 90 % do material reciclado sem uso de sais e fluxos escorificantes (Puga *et al.*, 2009).

Wei *et al.* (2019) realizaram uma revisão sobre a reciclagem de resíduos de liga de alumínio. Devido à baixa densidade, alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e outras excelentes propriedades, as ligas de alumínio tornaram-se o segundo material metálico mais utilizado. Nos últimos anos, foi dada cada vez mais atenção à reciclagem de resíduos de ligas de alumínio, o que não apenas alivia efetivamente a escassez global de recursos de bauxita, mas também contribui para o desenvolvimento sustentável da economia, meio ambiente e energia. Devido ao ambiente de trabalho especial da indústria aeroespacial, possuir requisitos de desempenho mais elevados para a liga de alumínio, as ligas de alumínio aeroespaciais contêm muitos tipos de elementos de liga e criam maior valor à reciclagem. Com décadas de pesquisa e exploração, ainda existem problemas para limitar a reciclagem, como qualidade instável do produto, alta taxa de queima e oxidação severa. As tecnologias de separação pesado-médio, fusão em fornos de câmara dupla e tratamento metamórfico e equipamentos de leitura a laser foram sucessivamente desenvolvidos.

Recentemente, a produção de ligas à base de alumínio reciclado a partir de latas de bebidas e alumínio comercial, com incorporação de cinzas de casca de arroz, magnésio e cobre foi estudada com excelentes resultados e potencial de uso. Os resultados mostraram um aproveitamento de 52 % em massa de latas de alumínio fundido. Devido à incorporação da cinza de casca de arroz (CCA), houve uma redução na densidade do fundido, mas a dureza da liga formada aumentou (23 %). Além disso, esse aumento na adição de CCA diminuiu a fragilidade do material, de acordo com a análise da força de impacto de *Charpy*. Pela metodologia aplicada, a matriz metálica formada sugere diversas aplicações industriais,

bastando variar os parâmetros das adições dos metais incorporados, de acordo com o interesse proposto para a nova liga a ser formada (Holzschuh *et al.*, 2020).

Em resumo, os tipos de ligas de alumínio, os equipamentos e tecnologias empregadas nos processos de reciclagem, incluindo pré-tratamento, regeneração de refusão e refino, estão apresentados na Figura 8. Os principais autores associados ao pré-tratamento de resíduos de liga de alumínio também associados a fundição do alumínio (Zhou *et al.*, 2005; Ning *et al.*, 2006; Xu, Z. *et al.*, 2007; Chirita *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2008; Qingming *et al.*, 2009; Chirita *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Zeng *et al.*, 2014; Wang, H. J. *et al.*, 2015); alumínio reciclado (Puga *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2019; Holzschuh *et al.*, 2020); setor automotivo (Han *et al.*, 2008; González *et al.*, 2011; Carrera, González, *et al.*, 2012; González *et al.*, 2013; Wang, Q. *et al.*, 2017); e, com ligas de alumínio (Wang *et al.*, 2007; Mohamed *et al.*, 2008; Canales *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2014; Samuel *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019), foram investigados.

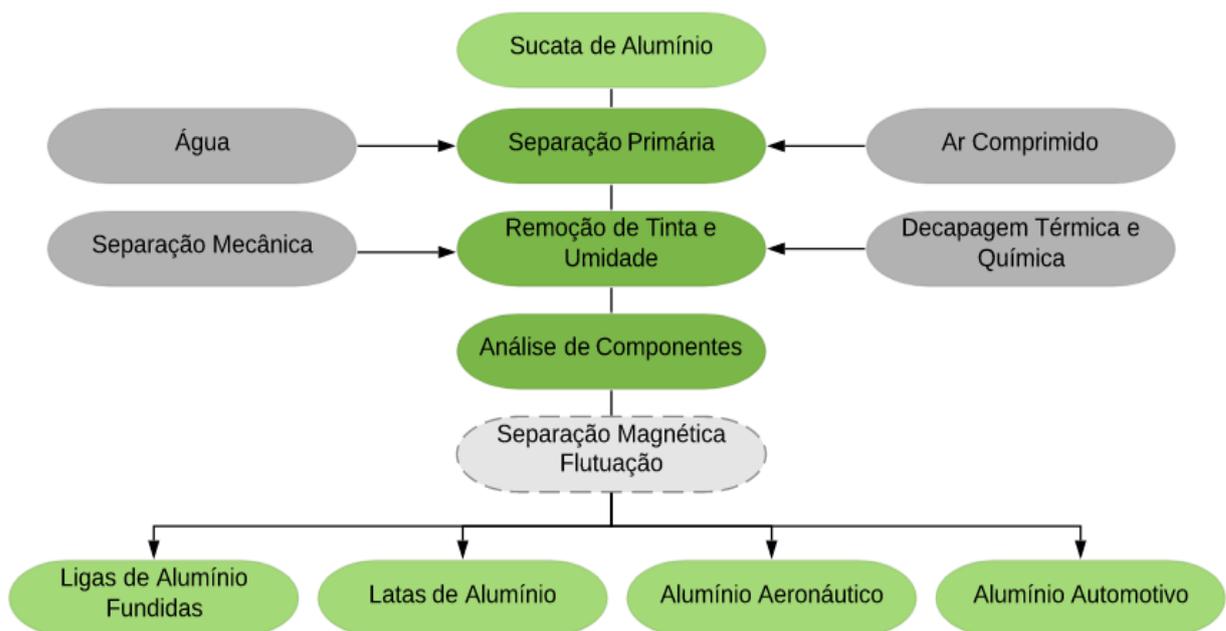


Figura 8: Fluxograma de reprocesso do alumínio.

De acordo com Wei *et al.* (2019) com o material previamente selecionado pela fase de pré-tratamento, o material prossegue para o processo de fundição. A fundição ocorre individualmente por tipo de material, gerando lingotes de alumínio secundários de acordo com as propriedades do material reciclado. A Figura 9 apresenta o diagrama do processo de fundição.

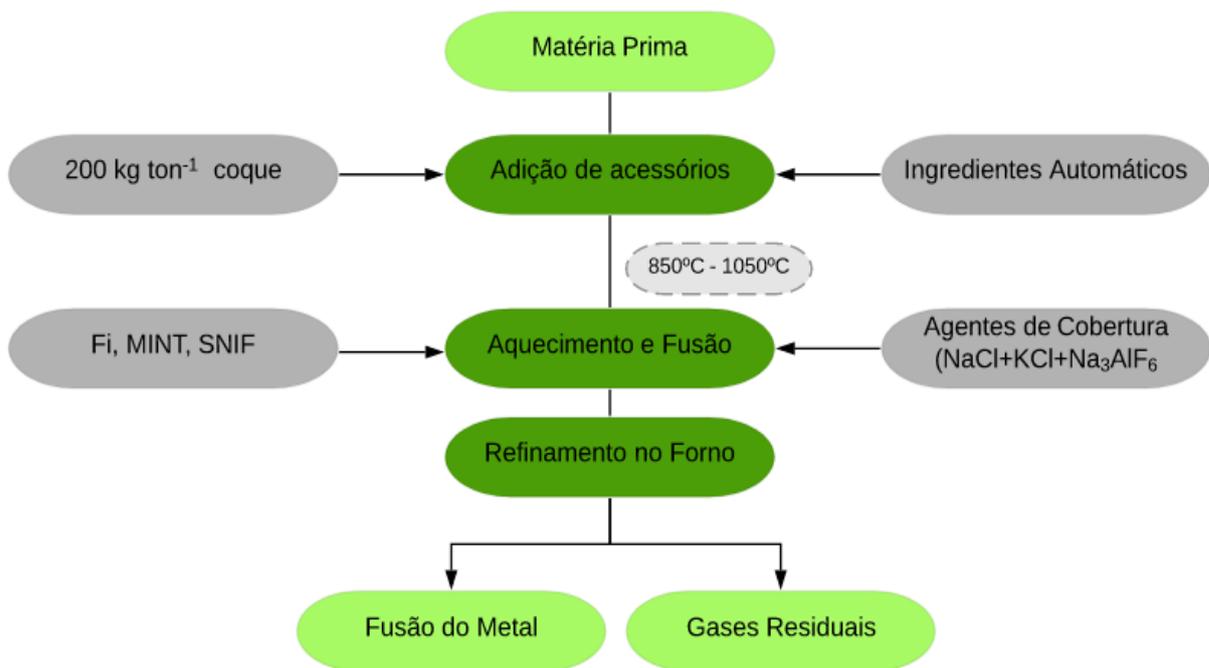


Figura 9: Diagrama do processo de refusão das ligas de alumínio.
Fonte: (Wei *et al.*, 2019).

Propostas de aplicações no setor automotivo

O setor automobilístico foi alvo de investigações por diversos autores e detectou-se pesquisas que apresentaram soluções envolvendo a produção de ligas de alumínio fundidas.

Han *et al.* (2008) desenvolveram uma tecnologia para a produção de pastilhas de liga de alumínio reforçadas com adição de aço, níquel, cobre e aço, níquel, prata. Realizaram experimento *push-out* que indicou resultados melhores em termos de resistência e impediu o contato direto entre o alumínio e o aço, porém no processo de fundição apresentaram a formação de fases indesejáveis. Gonzáles *et al.* (2011) avaliaram a resistência à fadiga de uma liga de alumínio retirada de blocos de motores. Os testes de tensão-compressão apontaram que as trincas por fadiga se originaram nos poros, onde iniciaram rachaduras abaixo de uma tensão nominal de 120 MPa.

Na mesma linha, Carrera *et al.* (2012) analisaram a influência da taxa de têmpera em tensões residuais em blocos de motor. O fundido de alumínio usa revestimento de ferro cinza para fornecer resistência ao desgaste nos orifícios do bloco. O processo de fundição ocorre com a adição do revestimento de ferro antes do alumínio líquido ser escoado na cavidade. As tensões residuais são produzidas pela diferença de expansão térmica do ferro e do alumínio pelo emprego de diferentes taxas de resfriamento determinadas por medidores de tensão.

Carrera *et al.* (2012) analisa as tensões residuais em fundidos complexos de alumínio e as condições de trabalho na câmara de combustão dos blocos do motor que forçam o uso de camisas capazes de resistir à pressão e ao desgaste causados pelos pistões. Neste processo, o revestimento de ferro cinza é inserido após o bloco do motor se solidificar, sendo moldado dentro do bloco. Dependendo da geometria e do tamanho da peça, as tensões podem ser superiores a 150 MPa.

A resistência à fadiga, foi constantemente investigada. Gonzáles *et al.* (2013) realizam uma análise para prever os ciclos de falha que o alumínio fundido é capaz de sustentar nas anteparas do motor. Apontaram também que as trincas ocorrem nos poros localizados perto da superfície das amostras e concluíram que a resistência à fadiga é afetada devido ao refino microestrutural. Wang *et al.* (2017) analisaram os últimos avanços de peças vasadas em alumínio em aplicações estruturais em automóveis. Revisaram tecnologias para design de ligas, processo de fusão e tratamento por fusão, processos de fundição e tratamento térmico. O desenvolvimento robusto de peças de alumínio de alta integração por meio da abordagem computacional (ICME).

Propostas de simulação e modelos computacionais

A área de simulação utilizando modelos computacionais mostra-se representativa na área de processos de fundição e formação de ligas a base de alumínio. A previsão de defeitos como trincas durante o processo de fundição foi pesquisada por Long *et al.* (2005), onde alcançaram resultados consistentes com índice de craqueamento estabelecido com base na razão estresse/força na fundição à quente do lingote. Da mesma forma, Allison *et al.* (2006) realizaram uma abordagem integrada entre materiais e engenharia de componentes (ICME) além de utilizar técnicas de fundição virtual (VAC) que foi implementada na *Ford Motors Company*, onde demonstraram a viabilidade e os benefícios no desenvolvimento de projetos e processos de fabricação de blocos de motores levando as ligas de alumínio ao limite de suas capacidades.

Yan e Lin (2006) investigaram a previsibilidade da tendência a ruptura a quente para ligas de alumínio multicomponentes. A interface de cálculo do equilíbrio de fase multicomponentes foi estendida para modelos de sistemas de ordem superior. Os resultados das simulações foram correlacionados com resultados experimentais e mostraram-se eficientes. O uso de sistemas de previsão por simulação usando uma abordagem de engenharia de materiais

computacionais integrada (ICME) foi utilizado por Gu *et al.* (2019) empregando modelos tridimensionais em 3D baseado em Autômato Celular (CA) o qual foi desenvolvido para prever o tamanho do grão dos componentes produzidos por fundição sob pressão de ligas de alumínio. Foi utilizado o *software* de simulação de processo de moldagem *ProCAST* baseado em elementos finitos. A ferramenta verificou a morfologia do grão, densidade e o tamanho por modelagem CA. Os resultados da simulação foram validados por resultados experimentais e o seu uso no desenvolvimento de peças fundidas de alumínio foi recomendado.

Xu *et al.* (2009) também aplicaram o método *Cellular Automaton* (CA) porém, aplicaram um modelo modificado para simular a evolução microestrutural da fundição da liga de Alumínio. A difusão de soluto nas fases líquida e sólida também foi considerada no desenvolvimento de um modelo de crescimento de grãos. Com os modelos desenvolvidos, não apenas a estrutura de grãos, mas também a microestrutura dendrítica puderam ser previstas durante o processo de solidificação.

Liu *et al.* (2011) estudaram a morfologia dendrítica do processo de solidificação de ligas de magnésio e alumínio usando métodos de autômatos celulares e de campo de fase, modelos matemáticos de segregação de lingotes de aço grandes e modelos microestruturais de fundição de pás de turbina solidificadas unidirecionalmente.

No uso das ferramentas computacionais de fundição virtual, foi considerado que o aumento do alumínio fundido, em aplicações industriais, exige melhor qualidade, desempenho mais confiável e quantificável. O esforço foi dedicado no desenvolvimento de modelos computacionais robustos e precisos, onde numerosas técnicas de modelagem e simulação poderiam ser aplicadas na prática de fundição de alumínio e subsequente processamento, permitindo que projetistas e engenheiros desenvolvessem os componentes obtidos pela fundição de alumínio com custos mínimos (Wang *et al.*, 2011). O método de análise bayesiana foi aplicado na otimização de projeto de molde de fundição permanente. Portanto, o uso de métodos estatísticos foi aplicado para medir os efeitos dos projetos de moldes e dos parâmetros operacionais do processo de fundição nas propriedades mecânicas (Wang e Schwam, 2012).

Também foi avaliada uma modelagem de defeitos de contração relacionada ao fluxo de alimentação de peças fundidas de alumínio (Reis *et al.*, 2012). Um modelo 3D foi desenvolvido que prevê a formação de defeitos de contração associados aos fenômenos contínuos em interação. O modelo resolve as equações de conservação macroscópica acopladas à massa, momento e energia com uma mudança de fase durante a solidificação. Este modelo de retração

avanzado foi validado experimentalmente com sucesso usando duas ligas Al-Si, uma liga eutética e uma liga hipo-eutética.

Antes disso, Liu *et al.* (2007) avaliaram a macro e micro-modelagem do processo de solidificação da fundição de alumínio. Utilizaram métodos numéricos para melhorar e entender em escala computacional o preenchimento do molde e a solidificação da liga de alumínio. Os resultados experimentais mostraram que os modelos estudados são razoáveis para descrever a formação e evolução da formação da microestrutura da liga formada.

Atualmente, existem análises dos mecanismos do grão, em profundidade de vibração ultrassônica, em lingotes de alumínio de grande diâmetro para fundição a quente. Os resultados dos testes da microestrutura solidificada do lingote de liga de alumínio e nos resultados da simulação do campo sonoro do software de elementos finitos, como o ANSYS, apresentou o mecanismo de refinamento da microestrutura do lingote de liga de alumínio sob diferentes profundidades de vibração. Os resultados confirmaram que, com o aumento da profundidade vibracional da haste de radiação supersônica, toda a seção transversal do lingote foi refinada ainda mais, e a forma do grão mudou de dendritos desenvolvidos para dendritos equiaxiais. Devido às faces finais da haste de radiação ultrassônica, há um pico vibracional na posição fixa, o que leva a diferentes cavidades ultrassônicas sob diferentes profundidades vibracionais ultrassônicas no fundido de alumínio. Isso leva a diferentes mecanismos de refinamento da estrutura solidificada (Wang, Y. *et al.*, 2019).

Com relação a simulação dos processos de fundição, Wang *et al.* (2017) avaliaram o critério de craqueamento estatístico da areia de sílica ligada à resina para simulação do processo de fundição. A rachadura de moldes (núcleos de areia) pode resultar em muitos defeitos de fundição. É necessário um critério robusto de craqueamento na simulação do processo de fundição para prever / controlar esses defeitos. Um mapa de probabilidade de rachaduras, relacionado ao estresse de fratura e volume efetivo, foi proposto para areia de sílica ligada a resina com base nas estatísticas de *Weibull*. Os resultados dos testes de flexão de três pontos das amostras de areia foram utilizados para gerar o mapa de fissuração e estabelecer uma linha de segurança para o critério de fissuração. Os resultados dos testes de tração confirmaram a precisão da linha de segurança para a previsão de trincas. O comportamento de tensão e deformação e o volume efetivo dos moldes para os corpos de prova foram calculados usando um código de análise de elementos finitos *ProCAST*®. Além disso, um exame fractográfico por

espectroscopia de energia dispersiva das amostras de areia confirmou a fissuração do ligante na areia de sílica ligada à resina.

Assim, existe uma grande possibilidade de explorar soluções utilizando-se ambientes de simulação com uso de softwares como *ANSYS* e aplicar modelos numéricos como elementos finitos, análise bayesiana, modelos tridimensionais em 3D, bem como na aplicação de modelos de engenharia de materiais computacionais integrada (ICME). Os modelos de simulação oferecem a possibilidade de realizar pesquisas sem a necessidade de envolver equipamentos de ensaio, assim como materiais para a realização dos experimentos.

Abordagem geral a partir das questões de investigação

De acordo com a abordagem adotada, em cada um dos temas destacados, foram apresentadas as soluções e inovações relacionadas às questões de pesquisa. Além disso, no estado da arte, foi encontrada a resolução das questões sobre ligas de alumínio, processos de fundição e reciclagem de alumínio. A Figura 10 apresenta os tipos de resíduos de alumínio e os tipos de processos de fundição existentes.

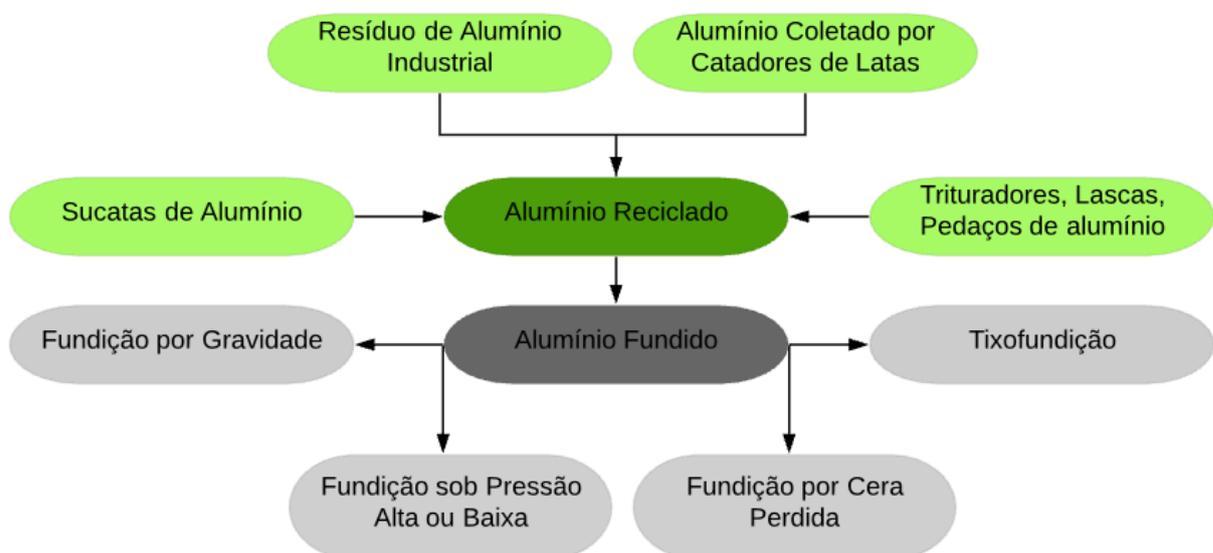


Figura 10: Tipos de resíduos de alumínio e tipos de processos de fundição.

A abordagem específica sobre a reciclagem e fundição de latas de bebidas de alumínio não obteve destaque na abordagem do estado da arte produzida. No entanto, foi apresentada uma visão geral que possibilita a realização de diversas inovações com o uso do alumínio reciclado, conforme esperado na questão abordada pelo ponto A descrito na metodologia. Neste

sentido, Puga *et al.* (2009) destacam o uso de aparas de cavacos de fundição de alumínio reaproveitadas de uma indústria metalúrgica. Ressaltam que, a eficiência da reciclagem, depende do condicionamento do material de fusão, da técnica de fusão, assim como da metodologia de tratamento dos metais a serem fundidos. Nesta indústria, os resultados de aproveitamento ficaram em torno de 90 % do material reciclado, sem o uso de sais escorificantes, resultando em taxas mínimas na formação de escória.

A reciclagem de alumínio alivia efetivamente a escassez global de recursos de bauxita e contribui para o desenvolvimento sustentável no uso de latas de alumínio. Devido às suas propriedades como baixa densidade, alta resistência, boa resistência à corrosão entre outras, as ligas de alumínio tornaram-se o segundo material metálico mais explorado. Com décadas de pesquisas e exploração, ainda existem problemas para limitar a reciclagem, como qualidade instável do produto, alta taxa de queima e oxidação severa. As tecnologias de separação precisam ser sucessivamente desenvolvidas (Wei *et al.*, 2019).

Em relação aos processos de fundição de alumínio, abordados pelo ponto B, observou-se métodos e técnicas muito importantes para viabilizar a exploração do alumínio secundário. Neste sentido, Chirita *et al.* (2008) apresentaram os efeitos centrífugos em peças fundidas com reforços funcionais a base de partículas de silício. Zeng *et al.* (2014) propuseram um processo de fabricação para fundição de alumínio com paredes finas e complexas. Nesta pesquisa, aplicaram técnicas de fundição contra a gravidade. Na mesma linha, Xu *et al.* (2007) estudaram as condições para verificar as alterações do teor de hidrogênio no alumínio fundido durante a fundição sob pressão ajustada (CAP). Em uma nova proposta, os mesmos autores realizaram uma nova fundição sob baixa pressão com função de degaseificação, utilizando o ajuste da pressão.

Na mesma proposta, Wang *et al.* (2012) investigaram a produção de fundidos de alumínio com paredes finas utilizando moldes de gesso combinados com vazamento a vácuo e solidificação sob pressão. Com o mesmo propósito, Li *et al.* (2008) desenvolveram um sistema de fundição eletromagnética de alumínio utilizando rolo duplo com um conversor AC / AC trifásico controlado de forma independente. Da mesma forma, Li *et al.* (2011) pesquisaram o efeito do tratamento da solução escalonada nas propriedades mecânicas e na microestrutura do AA7085 em comparação com o AA7050. Ainda, Wang *et al.* (2015) realizaram uma pesquisa sobre a aplicação de uma nova agitação de acoplamento no processo de fundição DC para lingotes de alumínio de grande porte. Wang *et al.* (2005) avaliaram o tratamento de fusão por

mistura de alta com baixa temperatura de fusão para refinar o composto primário de Al_3Fe . E Ning *et al.* (2006) avaliaram o efeito da microestrutura inicial das ligas A356 no comportamento mecânico no estado semi-sólido.

Assim, ao longo do período pesquisado, ocorreram várias tentativas na busca de novas tecnologias e processos de fundição, a fim de alcançar avanços na área de fundição. Técnicas foram propostas na área de fundição centrífuga, contra a gravidade, sob baixa pressão e ajustada, além de métodos de vazamento em paredes finas, vazamento à vácuo e solidificação sob pressão.

No que diz respeito à investigação do ponto C, que avaliou o estado atual do alumínio secundário na formação de ligas, bem como as suas aplicações após a formação destas ligas. A formação de ligas a partir do uso de alumínio secundário, como base, ainda apresenta muitas possibilidades de exploração. Existem inúmeras possibilidades na área de formação de ligas metálicas com o alumínio como base para a liga. O grande desafio é conseguir ampliar as possibilidades de aplicação do alumínio secundário e além das aplicações já existentes, conseguir aumentar o percentual do alumínio secundário na formação da liga. A pesquisa demonstrou diversas estruturas a base de alumínio primário, assim como, com uso do alumínio secundário.

Destaca-se a liga Al-Si produzida por meio do processo de fundição carbotérmica de minério aluminoso Wang *et al.* (2007) e a influência da adição de Sn nas propriedades microestruturais e mecânicas em ligas Al-Si-Cu e Al-Si-Mg Mohamed *et al.* (2008); ligas de fusão Al-Si-Cu tratadas termicamente Canales *et al.* (2012); e Al fundido de alta qualidade, purificado por fusão e com inclusões (Samuel *et al.*, 2018). A avaliação do impacto de resistividade na liga também foi analisada para uso de Ti e Co como uma camada umectante para preencher a lacuna na fundição de alumínio (Xu *et al.*, 2012).

Na fundição de alumínio por plasma de radiofrequência a partir da escória, produziu-se um pó fino de Al_2O_3 que foi estudado por (Yang *et al.*, 2014). O efeito da adição de Si na estabilidade da interface Al-10Ti-5Cu-xSi foi avaliado por Wang *et al.* (2018) e, da mesma forma, Zhang *et al.* (2019) apresentaram as propriedades e a microestrutura das ligas Al-Ga com diferentes razões de Mg / Sn.

Portanto, a formação de ligas foi amplamente explorada no período de pesquisa. O grande obstáculo é conseguir ampliar as possibilidades de reciclagem, e reprocesso do alumínio

secundário para formação de ligas. Técnicas de otimização foram apresentadas na formação de ligas, assim como a redução da formação de escória, grande inimigo do reprocesso de alumínio.

Observou-se também que as latas de alumínio de reciclagem são pouco exploradas nas pesquisas, embora sejam exploradas em geral, através do uso do alumínio secundário. De fato, essas latas são direcionadas diretamente aos grandes recicladores e misturadas com as demais sobras de alumínio, sendo fundidas no mesmo processo. A Tabela 2 apresenta um resumo das principais perspectivas e desafios da reciclagem de alumínio.

Tabela 2: Principais desafios e perspectivas na área de reciclagem, fundição e formação de ligas de alumínio.

Pontos da Pesquisa		Desafios e perspectivas
A	Reciclagem de Alumínio	Melhorar os processos de reciclagem por meio de novas tecnologias.
		Aumentar os pontos de descarte nos centros urbanos.
		Aumentar o uso de alumínio secundário nos processos de fundição de forma a minimizar a extração de minério de bauxita da crosta terrestre.
		Aprimorar os processos de logística reversa de forma a aumentar o retorno de materiais para reuso e reprocesso.
		Otimizar as técnicas de pré-tratamento, separação e refino de forma que ocorra a produção com mais qualidade.
B	Processos de Fundição do Alumínio	Realizar processos de fundição de forma a reduzir a formação de escória, e assim aumentar o aproveitamento do alumínio secundário.
		Otimizar o consumo de energia nos processos de fundição utilizando energias renováveis.
		Conciliar as propriedades do alumínio com os processos de fundição, de forma a melhorar o seu rendimento.
		Utilizar modelos computacionais e de simulação e fundição virtual de forma a verificar o desempenho mais confiável e quantificável do processo de fundição.
C	Formação de Ligas à Base de Alumínio	Aumentar os percentuais de adição de alumínio secundário na formação de ligas metálicas.
		Avaliar novas aplicações das ligas metálicas de forma a aumentar as possibilidades da adição de alumínio secundário na formação das ligas.
		Realizar pesquisas com o objetivo de promover a substituição do alumínio primário por secundário.
		Avaliar metais que adicionados ao alumínio, possam melhorar o seu rendimento e qualidade da liga formada.

3.1.5 Considerações finais

Com o uso do *software SciMAT*, foram realizadas análises em relação ao alcance longitudinal e a evolução dos temas motores, bem como uma análise do número de autores que se destacaram no período de pesquisa, assim como também, pode-se identificar as redes de conexões dos autores. Os autores e suas relações com os demais pesquisadores da comunidade científica, proporcionaram uma visão ampla em termos de escopo da área.

As questões de investigação foram abordadas inicialmente por meio das palavras chave. O período de análise foi estabelecido para os últimos 15 anos de pesquisa. No início do período analisado, ocorreu uma concentração de pesquisas sobre o tema de ligas de alumínio abordadas no ponto de pesquisa C (formação de ligas à base de alumínio e suas aplicações). Da mesma forma, houve uma concentração de pesquisa sobre a palavra “alumínio”, mostrando o interesse dos pesquisadores na exploração do metal, bem como, nas suas propriedades físicas e mecânicas, além de demonstrar interesse nas condições de fusão do metal.

No terceiro subperíodo, 2011 – 2013, o termo “reciclagem” abordado no ponto de pesquisa A (reciclagem de alumínio) começa a ser investigado no campo de pesquisa, ganhando importância nos períodos seguintes e, no período final, ficou em mesmo patamar de significância com a palavra chave “liga de alumínio”. Esta conexão demonstra o interesse na relação do alumínio reciclado na formação de ligas a base de alumínio, conectando os pontos de pesquisa A e C. Logicamente que, a palavra-chave “fundição” precisa estar entre a reciclagem de metais e formação de ligas. O mapa sobreposto demonstra a relevância da palavra “fundição” apresentando palavras compostas como temas motores conectados ao termo fundição. Assim, as palavras-chave “*Aluminum Casting*”, “*Aluminum Cast Alloys*”, estão ligando estes temas provando que A, B e C estão conectados no campo científico, o que é demonstrado através das redes de conexões do tema motor em cada subperíodo analisado.

A ferramenta de análise que melhor representa a relevância do campo de pesquisa é a rede de conexões do tema motor. A palavra motora, destacada ao centro da rede foi conectada por todas as palavras que tenham relações de pesquisa, onde estas sugerem propostas futuras de busca para novas pesquisas a serem exploradas. Desta forma, foi possível destacar as conexões entre “*Aluminum Alloys*” com “*Solidification*”, “*Microstructure*”, “*Metal Melting*”. Quando a palavra “*Aluminum*” foi indicada como tema motor, demonstrou forte relação com “*Metal Casting*”, “*Aluminum Casting*”, “*Smelting*”, “*Metal Melting*” formando assim, uma

combinação de palavras chaves que podem ser propostas para pesquisas que apresentem interesse na exploração do alumínio, formação de ligas e suas propriedades. As pesquisas interessadas nos processos de fundição do alumínio também foram contempladas nesta RSL.

O campo científico da palavra chave “*Aluminum Casting*” também demonstrou uma rede de conexões bem expressiva com as palavras “*Metal Casting*”, “*Microstructure*”, “*Chemical Properties*”, “*Solidification*”, “*Porosity*”, “*Casting Process*”. Assim, recomenda-se para pesquisas futuras conectadas a área de fundição, pesquisas focadas em explorar a microestrutura do metal, as propriedades químicas, os processos de solidificação bem como o processo de resfriamento, a formação de poros na liga metálica fundida, bem como, a exploração dos processos de fundição.

Através das investigações do estado da arte da área pesquisada, foi possível realizar uma análise em profundidade sobre o campo de pesquisa. Os temas motores indicaram as palavras-chave mais relevantes nas pesquisas em relação ao período analisado. O termo alumínio foi destacado como palavra central desta RSL. Com base na palavra central foi possível conectar diversas áreas de estudo. Desta forma, as pesquisas futuras podem direcionar as buscas para explorar o campo formado por alumínio e os processos de reciclagem, que podem ser de origem diversa, tais como: cavacos de usinagem, resíduos industriais, latas de alumínio e metais oriundos do reciclo urbano, assim como resíduos da própria indústria de fundição. Mas, não será possível realizar tal exploração, sem realizar uma conexão com os processos de fundição, já que a transformação do metal, passa por aqueles processos, assim como, com os processos de formação de ligas, incluindo outros metais ao alumínio; formando novas composições. Estas novas composições podem ser diversas, e suas aplicações da mesma forma. O uso industrial oferece inúmeras possibilidades de inserir ligas metálicas, formando novos produtos, mantendo-se ativo, o ciclo de vida dos materiais.

Esta RSL limitou-se a analisar apenas a base de dados *Scopus*. Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos analisando bancos de dados como *Web of Science*, *Science Direct*, entre outros. Outra limitação foi analisar por citações e co-citações. Pesquisas futuras poderão analisar métodos como acoplamento bibliométrico ou co-autoria entre outros. Assim como também, utilizar-se de outros métodos de análise de qualidade no *software SciMAT*, que oferece várias opções de seleção do tipo de matriz para construir a rede, que foi por co-ocorrência. Também, aplicar diferentes filtros para redução da rede, assim como verificar a semelhança entre as palavras, onde este estudo utilizou o índice de equivalência. Da mesma forma os

critérios para a formação dos cluster, como também, para realizar o mapeamento dos documentos. Como medida de qualidade, aplicou-se o indicador *h-index* e *sum citations*, desta forma a qualidade foi medida pelo índice h e pela soma das citações de cada documento. Para analisar as medidas longitudinais dos mapas, utilizou-se o índice *Jacard's* para avaliar o mapa de evolução, e para avaliar o mapa sobreposto, utilizou-se do índice de inclusão. Estas variáveis podem ser testadas com outras configurações, e assim, obter outras análises e oferecer novas temáticas de discussão, abordando o mesmo tema proposto.

4. METODOLOGIA

Quanto aos procedimentos adotados, partem de uma pesquisa bibliográfica por meio de uma revisão sistemática de literatura. Esta revisão teve como objetivo realizar um mapeamento científico sobre o estado atual dos processos de reciclagem de latas de alumínio, processos de fundição e formação de ligas de alumínio nos últimos 15 anos. Assim, a questão da pesquisa foi definida pela identificação da estrutura do campo científico da pesquisa e a relação da reciclagem de alumínio, processos de fundição e formação de ligas à base de alumínio, bem como suas aplicações. Esta pesquisa resultou na produção de um artigo, o qual fundamentou-se a pesquisa. Este artigo, encontra-se no Capítulo 3 – Fundamentação Teórica, intitulado: Reciclagem, fundição e formação de ligas de alumínio: Uma Revisão Sistemática da Literatura com uso do Software *SciMAT*.

Com relação aos estudos preliminares da pesquisa, produziu-se um artigo que buscou dentro de um arcabouço de sustentabilidade e do viés ambiental, materiais secundários para formar ligas metálicas como: latas de alumínio, cinzas de casca de arroz. Além disso, propôs possíveis aplicações industriais da liga metálica formada, utilizar processos energeticamente econômicos, como o processo de fundição e ainda, atuar como facilitador em canais de logística reversa de forma a manter o ciclo de vida dos materiais, evitando novas extrações de minério da crosta terrestre, bem como, contribuir com a renda familiar nos centros urbanos. Este artigo encontra-se no Capítulo 5 – Resultados, Subcapítulo 5.1, intitulado como: Produção de matriz metálica: Fundição de latas de alumínio recicladas e incorporação de cinzas de casca de arroz e magnésio.

Para realizar o estudo das ligas e sua composição química, produziu-se um artigo que teve como propósito encontrar possíveis aplicações industriais para o alumínio secundário, especificamente oriundo de latas de bebidas. As latas de alumínio foram coletadas na Cooperativa de Catadores e Recicladores de Santa Cruz do Sul – RS - Brasil, as quais foram fundidas e após misturadas ao alumínio primário, juntamente com magnésio 99,98 % de pureza e cobre em pó, adquiridos em empresas comerciais. O objetivo desta pesquisa foi realizar a fundição de latas de alumínio, adicionar alumínio comercial, formar uma liga de alumínio 50 % reciclado e 50 % comercial, e posteriormente, adicionar cobre e magnésio, visando desenvolver uma fita laminada condutora de corrente elétrica. Este artigo encontra-se no Capítulo 5 – Resultados, Subcapítulo 5.2, intitulado como: Caracterização das propriedades

químicas e físicas das ligas Al + Cu + Mg, produção de um condutor plano pelo processo de laminação à frio.

Para a obtenção dos resultados finais, produziu-se um artigo que visou obter uma fita condutora de corrente elétrica, a partir de alumínio secundário oriundo do reciclo de latas de alumínio, visando sua aplicação como barramento condutor de corrente elétrica para realizar condução de corrente elétrica dos conjuntos de células fotovoltaicas na montagem dos módulos fotovoltaicos. Esta pesquisa realizou aprofundamentos em processos como homogeneização, recozimento, ensaios de tração, microdureza, encruamento, anisotropia bem como microscopia óptica e de varredura para uma análise da microestrutura. Desta forma, os resultados foram amplamente discutidos em profundidade e comparados com resultados de autores reconhecidos no campo científico. Este artigo encontra-se no Capítulo 5 – Resultados, Subcapítulo 5.3, intitulado como: Desenvolvimento de uma liga a partir de alumínio reciclado para fabricação de uma fita condutora de corrente elétrica.

4.1 Metodologia experimental

O procedimento experimental está apresentado na Figura 1. Cabe ressaltar que cada artigo possui a metodologia descrita em sua estrutura interna. O fluxograma da Figura 1 representa a metodologia experimental de toda a pesquisa realizada na etapa experimental. A cor Cinza representa as ligas de Al. A cor laranja representa as ligas contendo Cu (Al – Cu). A cor verde escura representa as ligas contendo Mg (Al – Cu – Mg). A cor vermelha representa o processo de fundição. A cor rosa os processos de Homogeneização e Recozimento. A cor azul representa o processo de laminação. A cor verde clara representa os ensaios físico-químicos realizados.

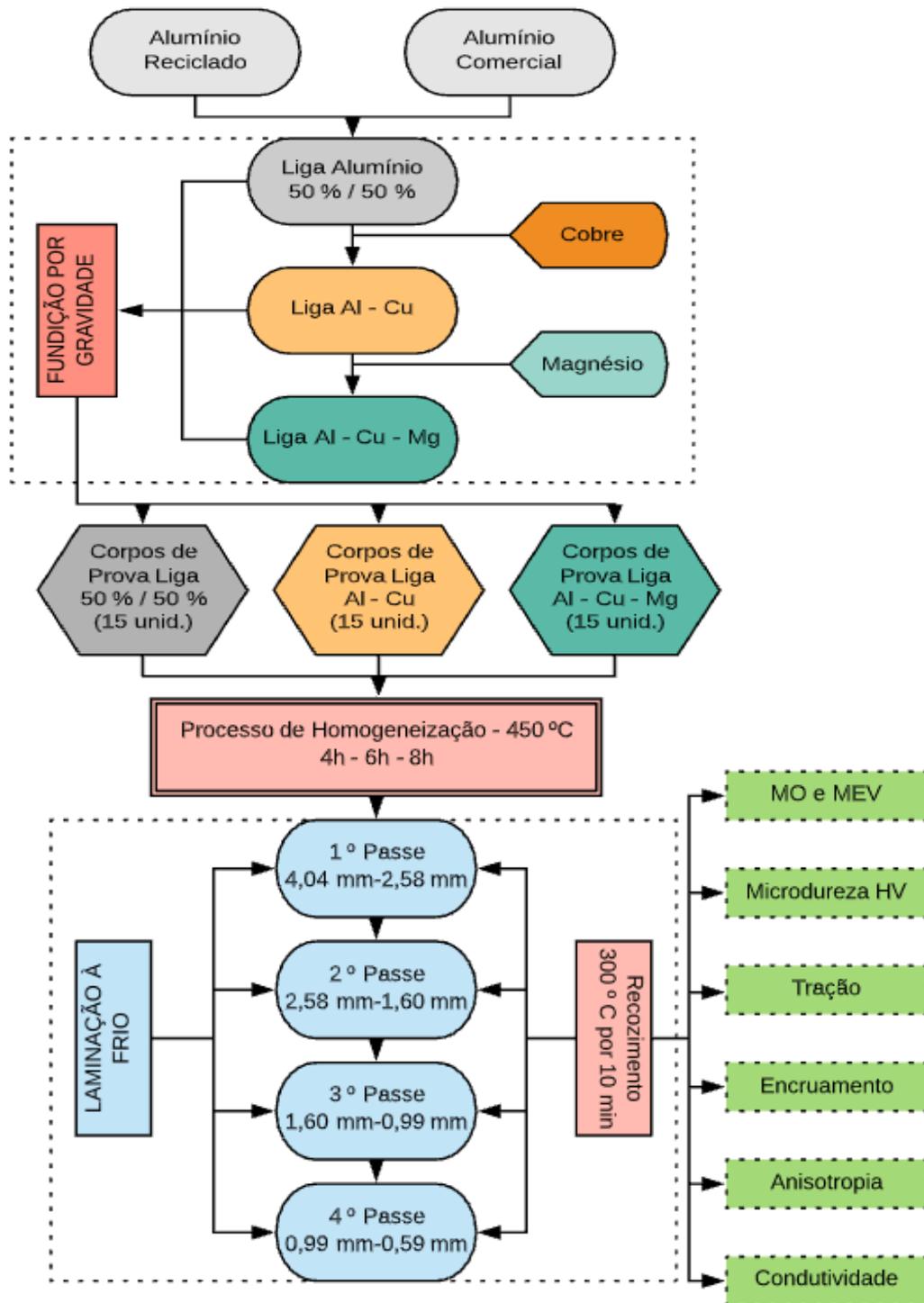


Figura 1: Fluxograma da metodologia da pesquisa realizada na etapa experimental.

5. RESULTADOS

Os resultados desta pesquisa, serão apresentados por meio de três artigos listados nesta seção. O primeiro artigo (5.1), apresentará os resultados preliminares, o segundo (5.2) demonstrará a aplicação da metodologia experimental e caracterização química, e por fim, o terceiro artigo (5.3), apresentará os resultados finais, concluindo a pesquisa.

5.1 ARTIGO 2 - Produção de matriz metálica: Fundição de latas de alumínio recicladas e incorporação de cinzas de casca de arroz e magnésio

Metal matrix production: Casting of recycled aluminum cans and incorporation of rice husk ash and magnesium

Gilson Gilmar Holzschuh¹ , Dóris Sippel Dörr¹,
Jorge André Ribas Moraes¹ and Sérgio Boscato Garcia²



Journal of Composite Materials
0(0) 1–13
© The Author(s) 2020
Article reuse guidelines:
sagepub.com/journals-permissions
DOI: 10.1177/0021998320911964
journals.sagepub.com/home/jcm



- 1- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil – gilsonh@unisc.br
- 2- Head Department of Engineering Architecture and Computing, Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - jorge@unisc.br
- 3- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil – doris.sdorr@gmail.com
- 4- Mechanical Engineering Course Coordinator - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul², RS, Brazil – sergio.garcia@pucrs.br

Artigo publicado em 24 de março de 2020: <https://doi.org/10.1177/0021998320911964>

¹ Independência Avenue, 2293 - University, Santa Cruz do Sul - RS, Brazil, ZIP Code 96815-900.

² Piranga Avenue, 6681, Porto Alegre - RS, Brazil, ZIP Code 90619-900.

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo indicar a exploração de diferentes composições de fundição a partir de resíduos sólidos provenientes do reciclo de latas de alumínio, buscando analisar o rendimento da fundição e a composição química do fundido resultante do processo e, aliado ao viés de sustentabilidade. O estudo utilizou latas de bebidas recicladas adquiridas na Cooperativa dos Catadores de Materiais Reciclados de Santa Cruz do Sul – RS – Brasil e alumínio comercial. Dois processos de fundição foram realizados. No primeiro processo foram utilizados 20 kg de latas de alumínio que foram escoados em um molde de aço, resultando em 10,2 kg de material que pode ser aproveitado, apresentando um rendimento de 51 %. Em um segundo processo de fundição utilizou-se 10 kg da liga de alumínio 6063 T6 e acrescentou-se os 10,2 kg do primeiro processo, resultando, a partir desta mistura, um lingote metálico 50 % reciclado e 50 % de liga de alumínio comercial, com uma massa total de 18,23 kg, com rendimento de 90 %. Um segundo lingote foi produzido de modo semelhante, porém com o acréscimo de 4 % em massa de cinzas de casca de arroz e 2 % em massa de magnésio. De cada lingote foram retirados corpos de prova para análise química. Estas análises químicas compreenderam os ensaios de incorporação das cinzas da casca de arroz ao alumínio fundido por meio da microscopia eletrônica de varredura, análise da densidade, dureza *Brinell* e força de impacto *Charpy*. As análises dos resultados do segundo lingote apresentaram características superiores em níveis de Si e Mg, devido a adição de cinzas de casca de arroz e magnésio. Essa adição das cinzas da casca de arroz e do magnésio ao segundo lingote, elevou a dureza e reduziu a densidade da liga formada, como também, reduziu sua fragilidade, a qual foi comprovada por meio de análise da força de impacto.

Palavras-chave: Alumínio Reciclado, Liga de Alumínio, Fundição do Alumínio, Cinzas de casca de arroz, Magnésio.

5.1.1 Introdução

No cenário atual, de acordo com Paras *et al.* (2018), a cadeia de valor unidirecional é geralmente reestruturada para formar uma cadeia bidirecional. Em uma cadeia de valor bidirecional, a direção direta é usada para converter matéria-prima em um produto, enquanto a direção reversa é usada para recuperar valor de produtos antigos ou descartados. Uma cadeia de valor reversa compreende atividades diferentes, como reutilização, reparo, reprojeto, renovação, remanufatura e reciclagem. Para obter vantagem competitiva, as empresas adotaram o conceito de logística circular ou reversa (RL) (Bernon *et al.*, 2011). Outros motivos que podem ser atribuídos a essa mudança, incluem a escassez de recursos naturais, a degradação do meio ambiente e o crescimento populacional (Autry *et al.*, 2013). A reciclagem é um tema localizado na logística reversa (RL). Segundo Sellitto (2018), a RL busca recuperar parte do valor original dos bens usados para produzir ganhos econômicos, ambientais e sociais, principalmente nas regiões industrializadas. Em regiões com geração significativa de resíduos, a RL ajuda a reduzir a pressão nos sistemas públicos de saneamento, dando um destino adequado a materiais obsoletos gerados por resíduos de base tecnológica ou por processos industriais. Devido à legislação rigorosa e à pressão do consumidor, a legislação obriga as empresas a estabelecer e buscar metas ambientais sustentáveis. Entre outras possibilidades, como design ecológico e técnicas de produção mais limpas, a RL pode ajudar a atingir esses objetivos ambientais.

A reciclagem é um processo economicamente e ambientalmente correto, pois visa o aproveitamento de resíduos que estariam sendo dispostos em aterros ou em locais impróprios contaminando o meio ambiente (Abdel-Shafy e Mansour, 2018). A cada tonelada de alumínio reciclado, diminui-se a extração de 4 toneladas de bauxita, além de economizar até 95 % de energia (Haraldsson e Johansson, 2018). Ao citar o termo reciclagem, primeiramente lembre-se do alumínio pois é um material que pode ser reciclado inúmeras vezes sem perder suas características (Bdeir e Alsaffar, 2008). Alguns dos benefícios da reciclagem do alumínio vão além da redução de energia e utilização de matéria prima primária, envolvendo questões humanas, visto que, a reciclagem é fonte de renda para muitas famílias de catadores de materiais reciclados, o que os mantém no mercado de trabalho (Kumar, A. *et al.*, 2018). Esta atividade produz recursos para aplicação nas economias locais, desenvolvendo melhor o mercado em âmbito local e nacional.

A educação ambiental, incentiva a reciclagem de diversos materiais, criando uma conscientização ambiental na população para redução do volume de resíduos sólidos destinados a aterros sanitários. O alumínio primário é bastante dúctil, apresenta boa resistência à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica (Abdel-Shafy e Mansour, 2018). Todas essas características o tornam indicado para a fabricação de laminados muito finos, embalagens, latinhas de bebidas, recipientes para a indústria química, cabos e condutores elétricos. Um condutor elétrico de alumínio primário, com área devidamente proporcional, pode conduzir tanta corrente elétrica quanto um condutor a base de cobre, que é duas vezes mais pesado e, conseqüentemente, apresenta um valor de mercado mais elevado. Por isso, o alumínio é muito utilizado pelo setor de fios e cabos (Cui *et al.*, 2017), porém, apresenta baixa resistência a esforços mecânicos e baixos níveis de dureza. Por isso, para peças que estão sujeitas a esforços elevados, a resistência do alumínio primário não é suficiente (Vasudevan e Doherty, 2012).

A reciclagem do alumínio no Brasil vem crescendo nos últimos anos. Em 2002, o índice foi de 87 %, alcançando 96 % em 2005. Segundo Associação Brasileira de Alumínio (Abal, 2018), quase todas as latas de alumínio, oriundas de bebidas vendidas em 2017, retornaram para o ciclo produtivo, alcançando um índice de 97,3 % de reaproveitamento do material primário. Das 303,9 mil toneladas de latas colocadas no mercado no ano de 2017, 295,8 mil toneladas retornaram para reprocesso. Um diferencial do alumínio, é a reciclabilidade sem perda de propriedades físico/químicas, que torna o metal uma excelente escolha, principalmente para as embalagens de bebidas carbonatadas (refrigerantes, cervejas, etc.). O processo de reciclagem, além de colaborar com a preservação ambiental, tem na economia de energia uma das suas maiores vantagens – utiliza apenas 5 % da energia necessária para a produção do metal primário a partir do minério (Haraldsson e Johansson, 2018).

Esta pesquisa utilizou latas de alumínio recicladas, que foram adquiridas na Cooperativa de Catadores de Materiais Recicladores de Santa Cruz do Sul e, alumínio primário. O objetivo da pesquisa foi delimitado em analisar a exploração de diferentes composições do fundido (alumínio reciclado com o alumínio primário), e a esse lingote formado, incorporar novos materiais formando uma liga a ser avaliada por meio de análises químicas. Estas análises químicas compreenderam os ensaios de incorporação das cinzas da casca de arroz ao alumínio fundido por meio da microscopia eletrônica de varredura, análise da densidade, dureza *Brinell* e força de impacto *Charpy*.

Dentro de um arcabouço de sustentabilidade e do viés ambiental, esta pesquisa busca materiais secundários para formar ligas metálicas como: latas de alumínio, cinzas de casca de arroz. Além disso, propõe possíveis aplicações industriais da liga metálica formada, utilizar processos energeticamente econômicos, como o processo de fundição e ainda, atuar como facilitador em canais de logística reversa de forma a manter o ciclo de vida dos materiais, evitando novas extrações de minério da crosta terrestre, bem como, contribuir com a renda das famílias de catadores que estão inseridas nos centros urbanos.

5.1.2 Fundamentação Teórica

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante do planeta. É o metal em maior quantidade na crosta terrestre na forma de óxido (Al_2O_3), aproximadamente 8 % em peso, ficando para trás somente do oxigênio e do silício. Apresenta baixa densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$), sendo resistente e excelente condutor elétrico e térmico; é também, resistente à corrosão devido à formação de um filme óxido. Seu ponto de fusão é de 660°C , podendo ser mais baixo, quando em forma de liga. A sua resistência mecânica pode ser aumentada com a adição de outros elementos como silício, cobre e manganês, formando ligas (David e Kopac, 2012).

Devido às suas características físico-químicas, é muito utilizado em linhas de alta tensão devido à sua leveza e alta condutividade. Quando adicionado ao cobre, a propriedade de condução de corrente elétrica é ampliada, porém, o seu peso na forma de liga com o cobre aumenta significativamente. Além disso, suas propriedades também podem ser alteradas por meio de tratamentos térmicos, como também por tratamentos químicos (Schlesinger, 2013).

É um metal não-ferroso, não pirofórico e não tóxico, podendo ser aplicado na indústria eletroeletrônica, farmacêutica e de alimentos. O principal minério do qual extrai-se alumínio é a bauxita, que é constituída por óxidos hidratados de alumínio cujo teor está entre 35 % a 45 % (Schlesinger, 2013). A extração do alumínio ocorre por meio do processo *Bayer*, que foi desenvolvido por *Karl Josef Bayer* em 1888, o qual basicamente extrai alumina da bauxita (Yang *et al.*, 2017). Por meio do processo de *Hall-Heróult*, a alumina é processada e então o alumínio metálico é extraído. Aproximadamente são necessários 5 kg de bauxita para produzir 2 kg de alumina e 1 kg de alumínio primário (Schlesinger, 2013).

O alumínio pode ser classificado em primário, secundário e terciário dependendo de sua fonte. Primário é quando o metal é oriundo da bauxita, já o secundário, quando é proveniente do processo de reciclagem. Cerca de 30 % do alumínio produzido mundialmente é obtido a

partir de fontes secundárias. Já o alumínio terciário é oriundo da reciclagem do resíduo produzido durante o processo de reciclagem do alumínio (Schlesinger, 2013).

O alumínio utiliza, muita energia no seu processo de produção e produz escória como resíduo durante o processo de fusão e refino. Esta escória é altamente contaminante, sendo a sua redução e a sua disposição, um dos principais desafios para a indústria do alumínio (Abdulkadir *et al.*, 2015). Além disto, é composta por metais e substâncias não metálicas, como óxidos e sais de alumínio (Al_2O_3 , NaCl, KCl, CaO, NaAlCl_4 , KAlCl_4 , SiO_2 , MgO, entre outras substâncias) (David e Kopac, 2012).

Em comparação com o processo de produção do alumínio primário, o processo de produção do alumínio secundário apresenta uma redução do consumo de energia elétrica na ordem de 95 % (Škûrková e Ingaldi, 2014). As atividades de reciclagem possuem um papel de conservar os recursos naturais e reduzir a poluição. Se os resíduos forem pré-tratados e classificados adequadamente, o alumínio reciclado poderá ser utilizado para quase todas as aplicações (Jerina *et al.*, 2018). A reciclagem de ligas de alumínio tem crescido em interesse e aplicações nos últimos anos e se tornou uma maneira econômica, ecológica e confiável de se produzir peças de alumínio (Mandatsy Mounqomo *et al.*, 2016). Além disso, para Mansurov *et al.* (2018), o valor de mercado relativamente baixo da tecnologia de fundição fornece uma parcela maior da demanda por ligas de alumínio.

De acordo com Jerina *et al.* (2018) a qualidade do material reciclado depende de vários fatores, incluindo a pureza do material, tipos de revestimentos e tamanho. O controle de impurezas exerce uma grande influência nas propriedades mecânicas das ligas recicladas. Da mesma forma, Mansurov *et al.* (2018) menciona que a reciclagem causa adição individual e combinada de elementos de impureza, como Si, Fe, Cu, Zn, Pb, Sn, Ni e Mn, nas propriedades de fundição da liga. Outro fator relevante, principalmente no momento do processo de fundição, é que, as sucatas oriundas do reciclo urbano, geralmente estão oxidadas. Segundo Jerina *et al.* (2018), o conteúdo de óxidos em grandes pedaços de alumínio pode chegar a 2 % em massa. Durante o processo de fusão, o Al_2O_3 flutua para a superfície e forma uma segunda fase conhecida como escória. No processo de fusão da sucata de alumínio, cerca de 10 % do material é perdido porque o alumínio se mistura com a escória e outros 10 % do metal são oxidados (Gronostajski *et al.*, 2000).

O ferro é o elemento de impureza mais encontrado no reciclo do alumínio porque é muito difícil de remover e se acumula gradualmente durante a reciclagem repetida (Zhang *et*

al., 2012). Juntamente com o alumínio e outros elementos de liga, como Mn, Cu, Mg e Si, o ferro produz fases intermediárias, que são prejudiciais às propriedades mecânicas do produto final durante a solidificação. Para Závodská *et al.* (2018) o ferro é uma das impurezas mais problemáticas nos materiais fundidos de alumínio. Para Mbuya *et al.* (2003) a adição de um neutralizador adequado como Mn, Cr, Be, Co, Mo, Ni, V, W, Cu, Sr ou outros elementos de terras raras como Y, Nd, La e Ce podem controlar o efeito deletério de Fe nas ligas de alumínio.

O processo de refusão de latas descartadas tem um destaque na cadeia produtiva do ciclo do alumínio no Brasil. A lata é composta por corpo, selo e tampa, sendo que, possuem composições de liga diferentes. O corpo da lata é produzido a partir da liga de alumínio 3004, a tampa pela liga 5182 e o selo é produzido a partir da liga de alumínio 5082 (Bdeir e Alsaffar, 2008). No estudo, foi utilizado como referência o Tabela 1 de acordo com a norma ASTM (*American Society for Testing Materials*) utilizada como referência para a fabricação de latas.

Tabela 1: Composições químicas das ligas utilizadas na fabricação das latas de alumínio.

Componentes	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)	Outros (cada) (%)	Outros (total) (%)
Corpo (ASTM 3004)	0,3	0,70	0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	0,25	-	-	0,05	0,15
Tampa (ASTM 5182)	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4,0-5,0	0,25	0,10	0,10	0,05	0,15
Selo (ASTM 5082)	0,2	0,35	0,15	0,25-0,4	3,3-4,0	0,25	0,15	0,10	0,05	0,15

Fonte: Davis *et al.* (2001).

Composição das latas de alumínio

De acordo com Zhu e Cooper (2019) série 3xxx têm como principal característica a resistência à corrosão, boa conformabilidade e resistência mecânica moderada. Apresenta manganês em suas ligas, o qual é adicionado para que se aumente a resistência à corrosão e ductilidade no alumínio comercial. Por sua vez, as ligas da série 5xxx possuem alta resistência mecânica, assim como boa resistência à corrosão. Possuem magnésio que, proporciona maior dureza, resistência mecânica e resistência à corrosão, além de melhorar a usinabilidade.

As ligas de alumínio da série 3xxx e 5xxx devem possuir as composições químicas descritas na Tabela 2, segundo (Davis, 2001).

Tabela 2: Composição química da liga de alumínio 3xxx e 5xxx.

Elemento Químico	Porcentagem na Matriz Total	
	Liga 3XXX	Liga 5XXX
Alumínio	95,00 - 98,90 %	> 86 %
Manganês	00,05 - 01,98 %	0,1 – 6,0 %
Zinco	00,30 - 02,50 %	< 1,8 %
Silício	00,03 - 01,60 %	< 1,4 %
Magnésio	00,20 - 01,47 %	< 0,8 %
Outros	< 01,80 %	< 2,1 %

Fonte: Davis (2001).

As propriedades mecânicas das ligas usadas nas latas de alumínio são apresentadas na Tabela 3, de acordo com (Bdeir e Alsaffar, 2008).

Tabela 3: Propriedades mecânicas das latas de alumínio séries 3004 e 5182.

Propriedades	Ligas	
	3004	5182
Massa específica – densidade (1000 kg/m ³)	2,6 – 2,8	2,6 – 2,8
Módulo de elasticidade (GPa)	70 – 80	70 – 80
Resistência à tração (MPa)	215	420
Limite de escoamento (MPa)	170	395
Alongamento (%)	10	25
Resistência ao Cisalhamento (MPa)	115	150
Resistência à Fadiga (MPa)	105	140
Dureza (HB 500)	52	25

Fonte: Bdeir e Alsaffar (2008).

Processos de Fundição do alumínio

Verran e Kurzawa (2008) descrevem o processo de reciclagem de latas de alumínio em pequena escala e usa um forno elétrico à indução para fundir o material e analisar a qualidade do material recolhido e fundido no processo. O material coletado, no início do processo, é liberado sobre uma correia transportadora, é levado para um moinho de facas, onde é fragmentado. Os fragmentos seguem para um separador eletromagnético que, remove materiais ferrosos que não podem ser misturados ao alumínio. Passa por um moinho de martelos, onde é picotado em cavacos, outra separação magnética retira ainda os resíduos de impurezas. Segue para uma peneira vibratória que retira terra, areia e outros resíduos e, um separador pneumático

completa o processo com jatos de ar para retirada de papéis, plásticos e demais contaminantes. Assim, os cavacos passam para a remoção das tintas e polímeros que recobrem o material no interior de um forno rotativo, conhecido como forno Kiln. A seguir, ocorre a fusão do cavaco a 700 °C, onde o material líquido é vazado em cadinhos e transformado na forma de lingotes (Schlesinger, 2013).

Materiais de reforço para a liga metálica de base alumínio

A cinza da casca de arroz (CCA) foi obtida pela queima da casca de arroz. Entre as características, as mais notórias foram o alto ponto de fusão, elevada porosidade e superfície específica, elevada reatividade durante mudanças na estrutura e reações químicas da sílica e baixa porcentagem de ferro (Cordeiro *et al.*, 2014). A sílica representa um valor médio de 95 % na constituição dos elementos da CCA (Fernandes *et al.*, 2014). De acordo com Singh e Chauhan (2016) resíduos obtidos de fontes agrícolas, como cinzas de casca de arroz, estão se transformando em foco de pesquisas, devido a sua utilização como componentes de reforço em matrizes metálicas. Além de diminuir os custos de produção, podem tornar-se materiais alternativos para substituir reforços sintéticos. Para Bodunrin *et al.* (2015), a baixa densidade que a CCA apresenta, contribui proporcionalmente aos percentuais que este material é adicionado a liga metálica no processo de fundição, pois diminui os espaços entre os cristais da liga, resultando em uma diminuição da densidade.

Na área de fabricação de materiais cerâmicos, que usam o cimento em sua composição, as cinzas de casca de arroz vêm sendo aplicada com sucesso em diversas pesquisas, sendo de grande interesse de aplicações na indústria de cimento. Fraga *et al.* (2020) estudaram a substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares alternativos para a produção de materiais de alto desempenho. Da mesma forma, Sua-Iam *et al.* (2019) avaliaram a resistência à compressão de concreto autocompactante incorporando cinzas de casca de arroz e resíduos de areia de fundição como uma substituição agregada fina sobre as propriedades do concreto autoconsolidável como substituição ao cimento. Na mesma linha de pesquisa, Tuttur *et al.* (2019) utilizaram as cinzas de casca de arroz e cinzas de lodo de esgoto como material de substituição sustentável do concreto convencional, verificaram que houve incremento na resistência à compressão do concreto com 10 % em massa de mistura proposta, além de aumento da resistência à compressão adicional de cura, que foi de 7 dias, 14 dias e 28 dias.

Interface reforço - matriz

Um fator destacado por Bodunrin *et al.* (2015) foi a molhabilidade (*wetting*) entre a matriz e o reforço. Agentes molhantes como o magnésio proporcionam a redução da tensão superficial entre a liga matriz e o reforço, melhorando a fluidez do metal no fundido, distribuindo uniformemente as partículas de reforço na matriz (Das *et al.*, 2014). Porém, a eficiência da ação de molhabilidade, depende de um sistema de agitação do fundido. Para Hashim *et al.* (2001) a agitação é uma etapa essencial para a incorporação das partículas, de forma que os reforços adicionados ao fundido não fiquem flutuando na superfície do banho e acabem se aglomerando ao óxido formado e retirado com a escória. Em suas pesquisas Das *et al.* (2014) adicionaram 3 % em massa de magnésio, enquanto que Prasad *et al.* (2014) adicionaram 2 % de magnésio, para verificar a sua influência sobre o fundido. A ordenação do reforço na matriz é um dos maiores desafios encontrados durante o processo de fabricação da matriz metálica, segundo Das *et al.* (2014) esta atividade interfere diretamente nas propriedades e na qualidade do material produzido.

5.1.3 Metodologia

Nesta pesquisa, as amostras de alumínio reciclado (latas de bebidas) foram obtidas por meio da Cooperativa dos Catadores de Materiais Reciclados de Santa Cruz do Sul. O material foi compactado e prensado, possibilitando desta forma, um melhor acondicionamento de maneira a proporcionar uma melhor fundição, uma vez que numa carga mais compacta, existe uma menor relação superfície/volume, e conseqüentemente, uma menor tendência à ocorrência de perdas por oxidação (formação de escória).

Para a retirada da umidade, os materiais foram inseridos em forno tipo mufla, com a temperatura variando entre 150 e 200 °C. Os materiais foram fundidos, sem a separação das partes da lata, em forno do tipo industrial, alimentado com Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A temperatura de fundição do alumínio foi realizada em um patamar de 750 °C.

Primeira fundição

No primeiro processo de fundição, as latas foram inseridas no forno manualmente. Durante o processo de fundição, ocorreu a formação de escória na superfície do fundido, sendo

retirada a cada 5 kg de latas introduzidas no forno. Para o ensaio, foram utilizados 20 kg de latas de alumínio reciclado.

Com a mistura definitivamente homogeneizada, o fundido foi escoado para o molde de aço. Em seguida, foi realizada a fundição de 10 kg de alumínio comercial, quando atingiu o patamar de 750 °C, foram adicionados os lingotes iniciais, resultantes da fusão das latas de alumínio. Quando homogeneizadas, a liga foi escoada no molde de aço. Estas amostras foram denominadas “Amostras 1” cuja composição deu-se por 50 % alumínio reciclado e 50 % alumínio primário.

Segunda fundição

Para a segunda etapa, inicialmente foi preparado o material de reforço. A casca de arroz foi lavada e, em seguida, inserida em estufa para secar o material à 100 °C durante 12 horas com objetivo de retirada de impurezas que pudessem prejudicar a qualidade da sílica a ser obtida. O processo de queima da casca de arroz foi realizado em forno tipo mufla com atmosfera inerte a uma temperatura de queima de 700 °C, com taxa de elevação da temperatura de 8 °C/min e um patamar de 2 horas após atingida a temperatura de queima. O resfriamento foi realizado dentro do próprio forno. A caracterização química foi realizada utilizando a técnica de espectroscopia de fluorescência de raio X. A cinza de casca de arroz (CCA) selecionada como base para o experimento foi peneirada utilizando uma peneira de malha de 60 *Mesh* (abertura 0,250 mm). As partículas passantes por esta malha foram empregadas para a fabricação de uma nova liga metálica.

Utilizou-se 64,56 kg de latas coletadas durante 4 meses no campus da Universidade de Santa Cruz do Sul. A fusão deste material foi realizada e escoada em molde de aço. Em seguida, fundiu-se 35 kg de alumínio oriundo de resíduos de uma indústria metalúrgica, sendo ao final escoado em forma de lingote em molde de aço.

O processo de fundição da mistura, Figura 1, foi iniciado com o alumínio primário sendo fundido a uma temperatura de 660 °C. Após atingir a temperatura de 750 °C, foi adicionado o lingote de alumínio reciclado resultante da primeira fundição. Foi realizado um escoamento para a primeira amostra caracterizada como “amostra matriz”, contendo 50 % alumínio reciclado e 50 % alumínio primário. Ao banho que permaneceu no cadinho, foi adicionado 2 % em massa de magnésio com 99 % de pureza.

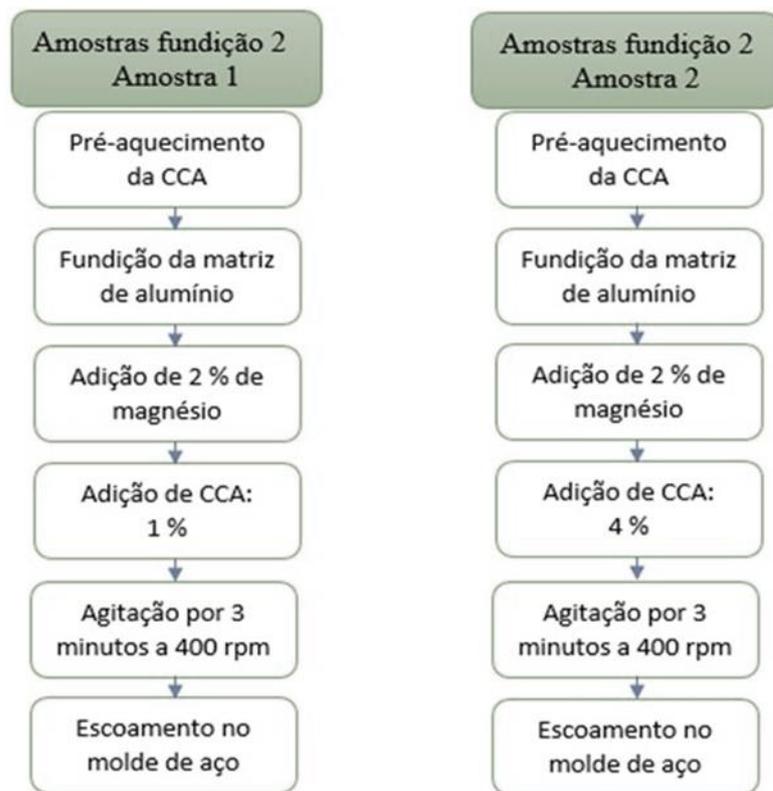


Figura 1: Procedimento aplicado para a segunda fundição.

A CCA foi pré-aquecida à 500 °C, e enrolada em pequenas “trouxas” em folhas de alumínio e adicionada a mistura, incorporou-se 1 % em massa e escoou-se outra amostra, denominada “amostra 1”. O processo foi repetido novamente, onde adicionou-se 4 % de CCA em massa e, 2 % em massa de magnésio com 99 % de pureza, escoou-se o fundido com a denominação de “amostra 2”.

Nas duas etapas de escoamento, foi aplicado um sistema de agitação mecânica atuando por 3 minutos em uma rotação de 300 a 400 rpm para homogeneizar os materiais adicionados ao fundido.

Realização de testes e ensaios

Após escoamento da liga no molde de aço foram retirados corpos de prova das 3 amostras (amostra matriz e as amostras com 1 % e 4 % de CCA incorporadas a amostra de fundição 2) para realização de análises de caracterização e confirmar a incorporação da CCA, por meio da microscopia eletrônica de varredura, além dos testes de densidade, ensaio de dureza e força de impacto.

Microscopia eletrônica de varredura

Para a caracterização microestrutural foram realizadas análises em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A preparação metalográfica das amostras consistiu em um processo de lixamento e polimento. O primeiro empregou lixas obedecendo a seguinte ordem de granulometria: 120-220-320-600-1200-1500-2000 *mesh*. O segundo processo utilizou um pano de polimento com pasta abrasiva de alumina. A aproximação utilizada no microscópio foi de 100 e 200 vezes.

Teste de densidade

A medição da densidade dos lingotes produzidos foi realizada através do princípio de Arquimedes. Este princípio é importante pois através dele pode-se determinar a densidade de um objeto de forma irregular através da medição da sua massa no ar e sua massa efetiva quando submersa em um líquido de densidade conhecida (normalmente água). O recipiente utilizado para a medição foi uma proveta previamente calibrada. O teste foi realizado em triplicata visando a diminuição de erros durante a análise. As amostras submetidas a este teste foram a amostra matriz e as amostras com 1 % e 4 % de CCA incorporadas a amostra da fundição 2.

Ensaio de Dureza *Brinell*

Para os ensaios de dureza foram utilizadas as amostras da liga metálica produzidas (amostra 1 e 2) e a matriz para fins de comparação. O ensaio foi executado seguindo as diretrizes da NBR 6506 (NBR, 2010). O ensaio de dureza *Brinell* foi realizado com carga de 62,5 kgf e um penetrador com 2,5 mm de diâmetro. O aparelho utilizado foi o Durômetro Pantec RB da Panambra.

Ensaio de Força de Impacto *Charpy*

Os ensaios de impacto foram executados em um equipamento instrumentado com capacidade para 30 mkg e velocidade de impacto de 5,6 m/s. Os corpos de prova, de dimensões 10 x 10 x 55 mm com um entalhe em “V”, foram usinados de acordo com a norma NBR ISO 148-1 (NBR, 2009). Foram confeccionados três corpos de prova de cada amostra. Os testes de força de impacto foram utilizados para avaliar a tendência do metal de se comportar de maneira frágil.

5.1.4 Resultados e Discussões

Os resultados das duas etapas de fundição foram analisados em termos de aproveitamento resultante em massa do lingote obtido na fundição das latas de alumínio. Estes dois resultados foram comparados com os dados obtidos por Verran *et al.* (2004) e validados de acordo com Davis *et al.* (2001), conforme apresentado na Tabela 1, página 57. Além disso, também foi apresentado uma comparação entre as fundições do alumínio comercial com o alumínio de resíduo industrial. Da mesma forma, foram comparados os lingotes obtidos após a mistura do alumínio reciclado com o alumínio primário. E por fim, a análise dos resultados do teste de densidade e ensaios de dureza *Brinell* e força de impacto *Charpy*, e a confirmação da incorporação das CCA na matriz por micrografia eletrônica de varredura.

Análise dos resultados da fundição das latas de alumínio reciclado

A primeira fundição, utilizou 20 kg de latas e resultou em 10,2 kg em massa, apresentando um aproveitamento de 51 %. A segunda fundição utilizou 64,56 kg de latas e obteve 33,58 kg em massa, resultando em um aproveitamento de 52 %. Comparando os dados obtidos por Verran *et al.* (2004), que obtiveram em média 72,45 %, nota-se uma diferença significativa. Esta, justifica-se devido ao fato de que, em sua pesquisa, Verran *et al.* (2004) utilizaram fluxo escorificante, além de utilizar um forno elétrico à indução. Esta variação, na pesquisa de Verran *et al.* (2005), ocorreu devido ao tipo de forno que foi utilizado. Esses mesmos autores comprovaram em suas pesquisas que o rendimento máximo obtido usando fornos a combustão do tipo ar/carvão era da ordem de 55 % e em fornos ar/óleo ou gás, eram da ordem de 60 %.

Análise dos resultados da fundição do alumínio comercial e do alumínio de resíduo industrial.

Os resultados da fundição do alumínio comercial da primeira fundição, que utilizou 10 kg em massa, obteve 8,98 kg em massa, resultando em 89,8 % de aproveitamento. Já a fundição do alumínio do resíduo industrial, o qual foi fundido 35 kg, resultou em 31,6 kg de material fundido, demonstrando um aproveitamento de 90,3 %. Esta diferença ocorreu devido ao tipo de liga que compõe estes materiais.

Análise química dos corpos de prova

Para facilitar a análise, vale esclarecer que, na fundição 1, são considerados os três casos de material base (latas de alumínio (1), alumínio comercial (2) e a mistura dos dois primeiros na proporção de 50 % de Al. de latas e 50 % de alumínio comercial (3)), com a adição de 2 % de Mg com teor de pureza de 99 % e 1 % de cinza de casca de arroz. E na fundição 2, nas três situações, a adição de 2 % de Mg com teor de pureza de 99 % e 4 % de cinza de casca de arroz, de acordo com a metodologia descrita na Figura 1, página 62.

Foi realizada a análise química das amostras através da técnica de espectroscopia de emissão óptica em espectrômetro modelo Solaris CCD Plus – 5S, fabricante GNR, e os resultados das análises estão representados na Tabela 4. A Tabela 5 apresenta os dados da análise química da fundição 2.

Tabela 4: Composição química da liga resultante da fundição 1.

Amostras		Al (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Si (%)
Latas de Alumínio	(1)	96,75	1,380	0,738	0,567	0,192	0,190
Alumínio Liga 6063 T6	(2)	98,25	0,550	0,100	0,350	0,100	0,400
Liga 50 % / 50 %	(3)	98,20	0,787	0,305	0,283	0,101	0,242

Tabela 5: Composição química da liga resultante da fundição 2.

Amostras		Al (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Si (%)
Latas de Alumínio	(1)	96,67	1,490	0,740	0,560	0,180	0,180
Alumínio de Resíduo Industrial	(2)	98,54	0,430	0,090	0,230	0,050	0,580
Liga 50 % / 50 %	(3)	96,71	0,910	0,520	0,520	0,140	0,510

Como referência de estudos anteriores, a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos por Verran e Kurzawa (2008). Os dados das análises químicas estão calculados sobre a média de várias amostras, além de apresentar os valores máximos e mínimos obtidos. Esta variação, se deve ao fato de terem utilizado fluxo escorificante em dosagens crescentes e, conseqüentemente, causando variações nas respectivas análises entre os corpos de prova.

Tabela 6: Análise da composição química da fundição.

	Al (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cu (%)	Si (%)	Fe (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)	Ni (%)	Pb (%)
Mínimo*	97,65	0,73	0,48	0,10	0,09	0,29	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Máximo*	98,09	0,78	0,88	0,14	0,16	0,40	0,05	0,06	0,02	0,04	0,02
Média *	97,99	0,74	0,63	0,11	0,10	0,34	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01

Fonte: Verran e Kurzawa (2008).

A fundição das latas de alumínio, representadas pelo número 1, nas Tabelas 4 e 5 apresentou composições químicas de 96,75 % e 96,67 % de alumínio, respectivamente. Esse valor foi inferior ao percentual mínimo de alumínio, que foi de 97,65 %, conforme obtido por Verran e Kurzawa (2008), apresentado na Tabela 6. No entanto, estava dentro dos limites estabelecidos pelas normas da associação internacional de alumínio, apresentadas na Tabela 1, página 57 (Davis, 2001).

Para avaliar a distribuição empírica dos dados, a Figura 2 apresenta um gráfico com amostras dos resultados da porcentagem de alumínio obtida na análise química da fundição 1 e da fundição 2, descrita nas Tabelas 4 e 5, respectivamente, situadas na página 65. As amostras foram comparadas entre si em cada uma das etapas do processo de mistura listadas na metodologia. Dessa forma, foi possível analisar a variabilidade das amostras entre os quartis e a posição da mediana, bem como a amplitude dos limites superiores e inferiores.

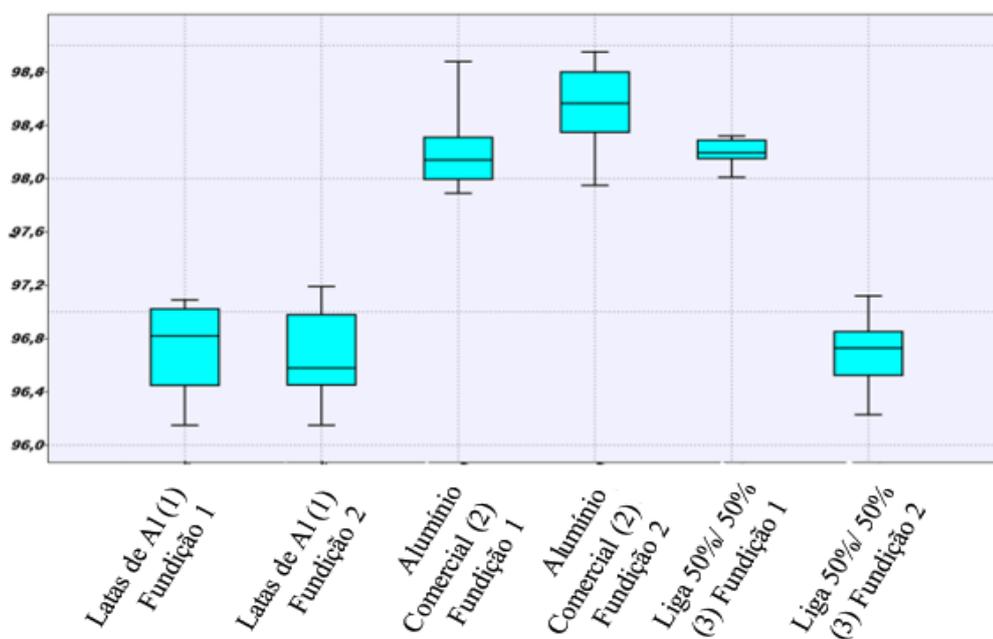


Figura 2: Análise estatística da variabilidade das amostras.

Ao analisar as amostras obtidas pela fundição das latas de alumínio, observa-se que as análises químicas se mostraram semelhantes, 50 % das amostras das fundições 1 e 2 ficaram entre 96,5 % e 97 % em percentual de alumínio, indicando uma dispersão de 0,5 %. A fundição 1 mostrou uma assimetria negativa em relação a mediana e a fundição 2 apresentou assimetria positiva e por fim, a fundição 2 apresentou uma amplitude maior em relação a primeira fundição, demonstrando uma variabilidade maior em suas amostras. Portanto, nesta mistura a base de latas de alumínio, a adição de 4 % de cinzas de casca de arroz não representou variações representativas em relação a adição de 1 %, misturado a fundição 1.

Para as amostras fundidas com a liga de alumínio comercial, o percentual de alumínio, em relação às amostras fundidas com latas de alumínio, obteve acréscimos superiores a 1 %. As duas amostras apresentam um comportamento simétrico em relação a mediana, porém as amostras da fundição 1 apresentaram uma dispersão menor e uma indicação de *outliers* no limite superior. Por outro lado, as amostras da fundição 2, apresentam *outliers* no limite inferior, mas a sua mediana apresenta o maior percentual de alumínio entre as amostras.

Já as amostras da terceira mistura, apresentam diferenças significativas em termos percentuais de alumínio. A mostra da fundição 1, que contém 1 % de cinzas de casca de arroz, apresenta um percentual superior a 98 % de alumínio, porém a amostra da fundição 2, contém valores inferiores a 97 % de alumínio. Esta diferença, pode estar relacionada a quantidade de cinzas de casca de arroz adicionada de 4 %, o que em termos percentuais, poderia afetar na redução do percentual de alumínio na mistura. Em relação a dispersão a variabilidade, a mistura da fundição 1, de 50 % de alumínio de latas e 50 % de alumínio comercial, 2 % de Mg e 1% de cinzas de casca de arroz, foi a melhor composição entre as amostras analisadas. Quanto ao melhor percentual de alumínio, a amostra da liga comercial da fundição 2 foi a mistura recomendada.

Com relação aos materiais que compunham a liga do alumínio como o Mg e Mn, pode-se observar que, os teores de Mg ficaram em 1,38 % e 1,49 % representados nas Tabelas 4 e 5 na página 65; e o teor de Mn apontou valores de 0,738 % e 0,74 % registrado nas Tabelas 4 e 5 na página 65 para as latas de alumínio (1), estando dentro dos limites estabelecidos na Tabela 1 na página 57 por Davis (2001); sendo que Verran e Kurzawa (2008) obtiveram valores máximos de 0,88 % de Mg e 0,78 % de Mn apresentados na Tabela 6 na página 66.

Resultados da microscopia eletrônica de varredura

Nas Figuras 3 a. e 3 b., estão apresentadas as micrografias das matrizes das amostras 1, que contém a mistura alumínio 50 % / 50 %, sem adição de reforço.

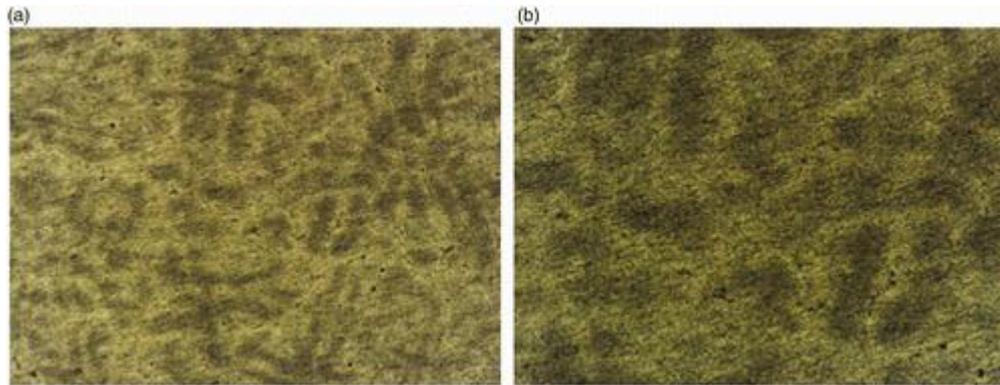


Figura 3: Micrografia da matriz de amostra 1 – 50 % de alumínio reciclado 50 % + alumínio comercial: (a) ampliação 100 ×; (b) ampliação 200 ×.

A sílica amorfa se dispersa na liga Al-Mg (2 %). Segundo Deshmukh (2011) o SiO_2 reage com Al-Mg (2 %) para formar MgAl_2O_4 , Mg_2Si e MgO e libera Si na matriz. Na Figura 4 a. e 4 b., as regiões que apresentam pontos brancos indicam estruturas intermetálicas resultantes das uniões entre os elementos que compõe a liga e apresentam possíveis evidências da inclusão de CCA na amostra 1, considerando que esta possui 1 % em massa de CCA adicionada a liga e 2 % de magnésio com 99 % de pureza. Esta afirmação poderia ser confirmada com a ampliação da imagem para 500 x ou até para 1000 x, o que não foi possível nesta pesquisa.

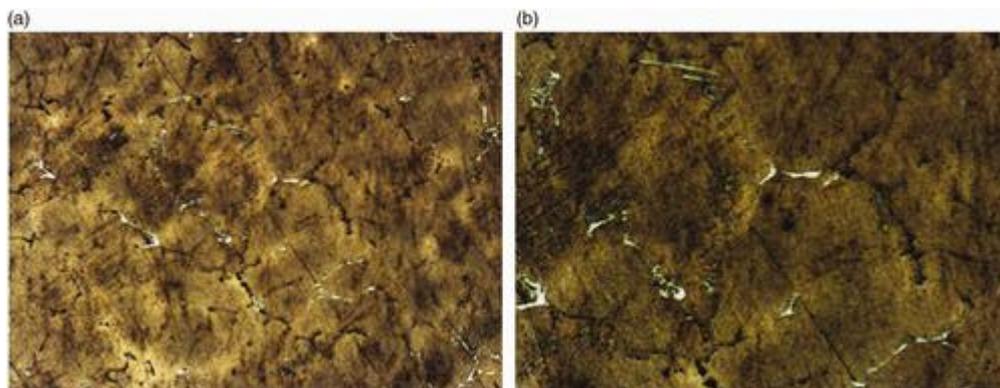
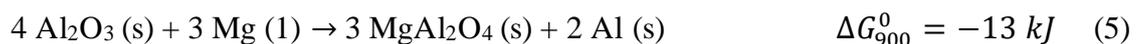
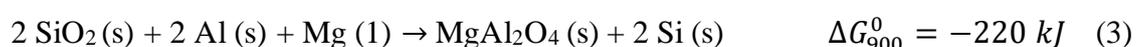
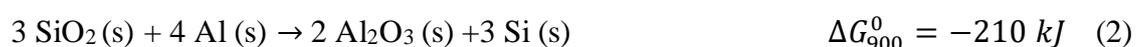


Figura 4: Uma micrografia da amostra de 1 - 50 % de alumínio reciclado + 50 % de alumínio comercial + 1 % de casca de arroz cinza + 2 % de magnésio com 99 % de pureza: (a) uma ampliação de 100 x; (b) ampliação 200 ×.

Os efeitos da adição de Mg melhoram a molhabilidade da seguinte maneira: (i) Redução da energia interfacial contribuída pela energia livre negativa da reação química entre o elemento reativo, como SiO₂, e o substrato, ou seja, Al – Mg fundido e (ii) formação de um produto de reação na interface líquido-substrato. Segundo Deshmukh (2011) as possíveis reações interfaciais entre as partículas de SiO₂ e a matriz Al-Mg é a seguinte:



A análise aprofundada destas composições, deixamos como propostas para pesquisas futuras, já que não é objetivo desta pesquisa realizar estas análises de forma mais aprofundada. A Figura 5 apresenta a micrografia da matriz das amostras 2.

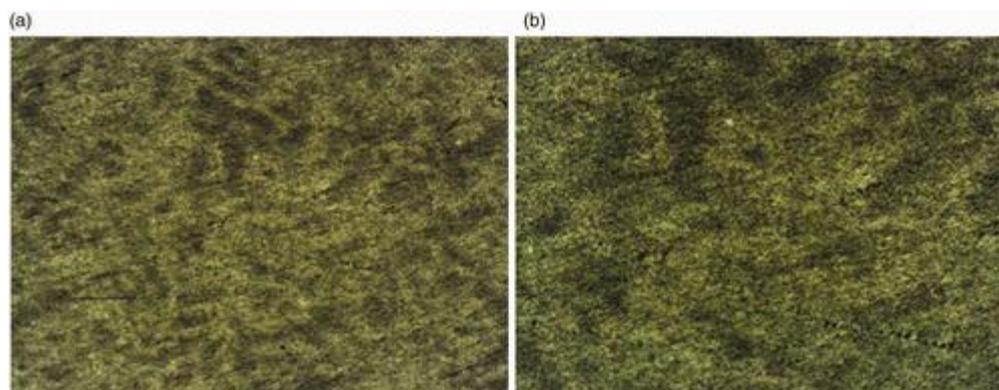


Figura 5: Micrografia da matriz de amostra 2 – 50 % de alumínio reciclado + 50 % de alumínio comercial: (a) ampliação de 100 ×; (b) ampliação 200 ×.

Na Figura 6 a. e 6 b., as regiões que apresentam pontos brancos indicam a presença de estruturas intermetálicas resultantes das uniões entre os elementos que compõe a liga e são possíveis evidências da inclusão da CCA na amostra 2, considerando que esta possui 4 % em massa de CCA adicionada a liga e 2 % de magnésio com 99 % de pureza.

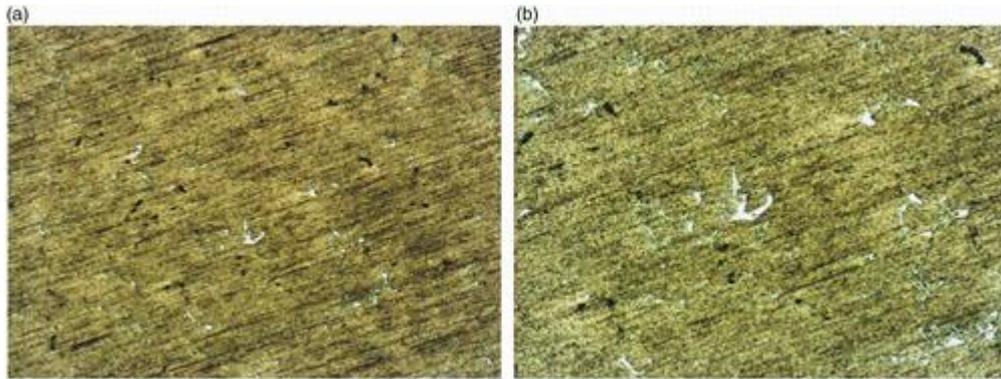


Figura 6. Micrografia da amostra 2 – 50 % de alumínio reciclado + 50 % de alumínio comercial + 4 % de cinza de casca de arroz + 2 % de magnésio com 99 % de pureza: (a) ampliação 100 ×; (b) ampliação 200 ×.

Resultados do teste de densidade

A Figura 7, apresenta os resultados dos ensaios de variação da densidade nas amostras 1 e 2 e da matriz.

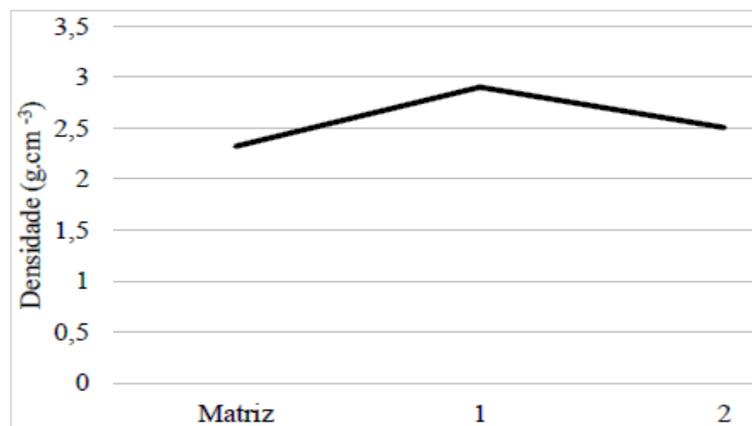


Figura 7: Variação da densidade das amostras.

Ao analisar o gráfico da densidade das amostras, percebe-se uma diminuição da densidade da amostra 2 em relação a amostra 1. Este fato é associado a menor densidade da CCA, pois com o aumento da adição de CCA de 1 % para 4 % ocorre o preenchimento dos

espaços por meio da homogeneização do material e causando a redução da densidade do material fundido. Para analisar estatisticamente os resultados da densidade, a Tabela 7 apresenta uma análise estatística univariada das amostras do ensaio de densidade.

Tabela 7: Estatística univariada dos dados da densidade das amostras.

	Matriz	Amostra 1	Amostra 2
n	10	10	10
Mínimo	2,37	2,82	2,49
Máximo	2,46	2,99	2,61
Média	2,42	2,91	2,55
Erro padrão	0,0095	0,0156	0,0109
Variância	0,0009	0,0024	0,0012
Desvio Padrão	0,0302	0,0494	0,0343
Coef. variação	1,2473	1,6990	1,3458

Observa-se que a amostra 1 apresenta um desvio padrão superior em relação a amostra 2, assim como da matriz, além da variância e coeficiente de variação. A densidade máxima alcançada pela amostra 1, foi de 2,99 g/cm³. No entanto a amostra 2 alcançou apenas 2,61 g/cm³ e da mesma forma a matriz alcançou 2,46 g/cm³ apresentando a menor densidade. A partir destas investigações, percebeu-se que a densidade demonstrou três resultados com densidades distintas. Portanto, para aplicações industriais que tenham interesse em materiais processados com baixa densidade, recomenda-se a amostra 2 com 4 % de CCA. Caso a aplicação tenha necessidade de se obter materiais com densidade mais elevada, recomenda-se o uso de 1 % de CCA.

Resultados do ensaio de Dureza *Brinell*

Os resultados dos ensaios de dureza estão representados na Figura 8.

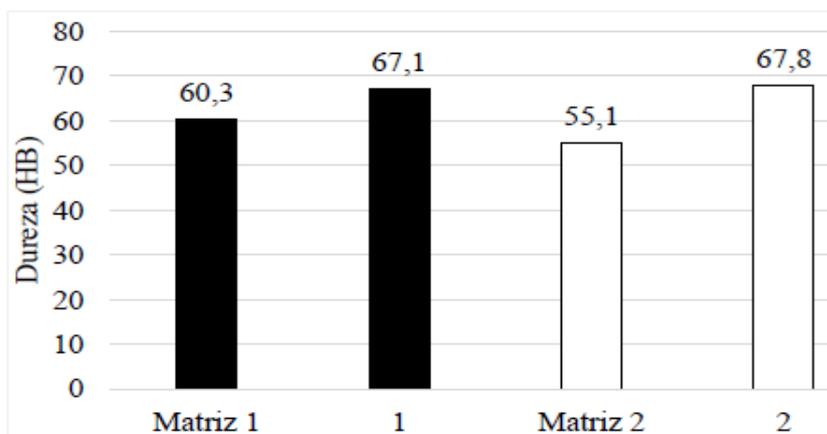


Figura 8: Ensaio de dureza das matrizes e amostras 1 e 2.

Verifica-se que o aumento no percentual de CCA resultou em um aumento na dureza em 11,3 % para a amostra com adição de 1 % de CCA e em 23 % para a amostra com incorporação de 4 % de CCA em relação a amostra da matriz. Houve um desvio padrão de $\pm 1,84$ HB em cada amostra.

Resultados dos ensaios de força de impacto

Os valores dos ensaios da força de impacto que representam a média dos três corpos de prova de cada amostra estão apresentados no Tabela 8.

Tabela 8: Resultados da força de impacto *Charpy*.

Descrição da amostra	Energia de impacto (J)	Desvio Padrão
Matriz	7,48	$\pm 0,15$
Amostra 1	6,57	$\pm 0,13$
Amostra 2	5,88	$\pm 0,12$

Com os resultados encontrados nas amostras 1 e 2, pode-se afirmar que a incorporação da CCA no alumínio diminuiu a fragilidade do material, pois as amostras 1 e 2 absorveram mais energia, 6,57 J e 5,88 J e desvio padrão de $\pm 0,13$ J e $\pm 0,12$ J respectivamente.

5.1.5 Conclusão

Com os resultados obtidos pelas análises químicas, apresentadas nos Tabelas 4 e 5, na página 65 verificou-se que as composições das amostras (1) da fundição das latas de alumínio recicladas, assim como as amostras (2) do alumínio comercial e alumínio de resíduo industrial, apresentaram valores percentuais semelhantes entre as fundições 1 e 2. Percebe-se que as composições das ligas (3), 50 % de alumínio reciclado + 50 % de alumínio primário, resultaram em valores médios nos percentuais das amostras (1) e (2) em todos os elementos de sua composição química. Desta forma, fica claro que, adicionar alumínio primário ou resíduo industrial ao fundido de latas de bebidas, depende do percentual que se pretende obter de cada um dos elementos químicos na composição em uma aplicação de interesse.

Em relação ao uso de alumínio primário no processo de fundição ou à adição de resíduos industriais de alumínio, as aplicações de interesse devem ser consideradas de acordo com o produto que se deseja produzir. Como mostrado, a adição de alumínio reciclado ao lingote aumenta a taxa de utilização para 90 %. No entanto, naturalmente, isso se refletirá na

composição dos custos do produto final, uma vez que o valor do alumínio comercial é muito maior em comparação ao alumínio reciclado.

Com relação a adição de reforços no processo de fundição do alumínio, observa-se que houve a incorporação das cinzas de casca de arroz, conforme Figuras 4 e 6 das páginas 69 e 70 obtidas pelos resultados das micrografias. A adição deste material resultou em uma diminuição da densidade do fundido, de acordo a Figura 7 na página 72, onde a densidade da amostra 2, a qual houve a adição de 4 % de CCA, apresentou densidade inferior ao resultado da amostra 1, com 1 % de adição de CCA. Este aumento em percentual de CCA, também resultou no aumento na dureza do material, onde, em relação ao lingote da matriz, elevou o percentual de dureza em 11,3 % e 23 % respectivamente nas amostras 1 e 2. Ainda, segundo dados do Tabela 8 na página 73, percebe-se que a incorporação da CCA, diminuiu a fragilidade do material.

Com a fundição das latas de alumínio, ficou evidente que o aproveitamento do alumínio reciclado ocorre entre 50 % e 52 %, utilizando forno a combustão e sem a utilização de fluxo escorificante. Considerando que Verran *et al.* (2004) obtiveram 72,45 % de aproveitamento das latas de alumínio fundidas quando usaram fluxo escorificante e forno a indução; poderia ser analisado, para futuros experimentos, a utilização de fluxo escorificante e refazer o processo de fundição em fornos a combustão, visando comparar os rendimentos entre os dois tipos de fornos, com a mesma metodologia.

Os processos de fundição do alumínio permitem diversas possibilidades de reaproveitamento de resíduos sólidos oriundos de latas de alumínio recicladas e resíduos industriais de alumínio. O viés da sustentabilidade traz outro ponto importante para a reciclagem de materiais, já que, sabe-se do esgotamento dos minerais da crosta terrestre. Estes fatos, tornam a pesquisa relevante, de modo que, o ciclo dos materiais se mantenha constante e, se reduza a extração da matéria prima do subsolo. Da mesma forma ocorre com a destinação da casca de arroz. Este subproduto se acumula nas fábricas de arroz, onde é queimado e causa impactos ambientais. Assim, o uso deste resíduo em aplicações industriais o transforma em matéria prima para a indústria metalúrgica. Além disso, seu reaproveitamento terá impactos econômicos na cadeia produtiva do alumínio, uma vez que os custos de produção com a inclusão do CCA seriam reduzidos proporcionalmente, de acordo com a quantidade de CCA adicionada na fundição de alumínio.

Ao considerar o uso de CCA no processo de fundição, como demonstrado nesta pesquisa, a decisão de uma indústria em utilizar em seu processo de produção, resíduos de

alumínio industrial e ou alumínio proveniente do reciclo de latas de alumínio, terá vantagens competitivas no mercado em termos de custos de produção e com isso, melhores preços de venda no mercado do seu produto final. Porém, alerta-se que, as quantidades de CCA, alumínio de resíduo industrial e alumínio de reciclo de latas, adicionadas em seus processos de produção, deverão ser devidamente testadas, já que as propriedades do produto final serão alteradas com tais inclusões.

Conclui-se que, todas possibilidades demonstradas, direcionam como principal fator a aplicação de interesse para a proposição final da fundição. Esta aplicação pode ser diversa, pois a pesquisa apontou oportunidades para materiais que necessitem aplicações relativas à variação de densidade, dureza, fragilidade ou ductibilidade. Além da possibilidade de se obter matéria prima reciclada de alumínio secundário em substituição ao alumínio primário.

5.2 ARTIGO 3 - Caracterização das propriedades químicas e físicas das ligas Al + Cu + Mg, produção de um condutor plano pelo processo de laminação à frio

Gilson Gilmar Holzschuh¹, Jorge André Ribas Moraes²; Doris Sippel Dörr³; Sérgio Boscato Garcia⁴; Izete Zanesco⁵ Liane Mahlmann Kipper⁶

- 1- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil – gilsonh@unisc.br
- 2- Head Department of Engineering Architecture and Computing, Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - jorge@unisc.br
- 3- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil – doris.sdorr@gmail.com
- 4- Mechanical Engineering Course Coordinator - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul², RS, Brazil – sergio.garcia@pucrs.br
- 5- Postgraduate Program in Materials Engineering and Technology - Coordinator of the Solar Energy Technology Nucleus - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul², RS, Brazil – izete@pucrs.br
- 6- Postgraduate Programs in Environmental Technology and Industrial Systems and Processes – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - liane@unisc.br

¹ Independência Avenue, 2293 - University, Santa Cruz do Sul - RS, Brazil, ZIP Code 96815-900.

² Ipiranga Avenue, 6681, Porto Alegre - RS, Brazil, ZIP Code 90619-900.

Resumo

Esta pesquisa apresenta uma metodologia para o processo de reciclagem por meio da fundição, em que as latas de alumínio e o alumínio primário (comercial) pudessem ser transformados em uma fita laminada, com possibilidade de aplicação industrial. Classificou-se esta pesquisa como bibliográfica, exploratória, experimental, em que se utilizou técnicas qualitativas para se avaliar materiais alternativos. Seu objetivo foi o de incorporar materiais de diferentes propriedades e que pudessem favorecer a confecção da fita a ser laminada. Na primeira fundição, somente com alumínio oriundo das latas de bebidas, formou-se um lingote de alumínio reciclado onde se obteve um rendimento de 51 % de aproveitamento do material. Numa segunda fundição, uniu-se ao lingote de alumínio reciclado, o alumínio comercial e após o processo de fundição com os dois materiais fundidos, obteve-se um rendimento de 90 %. Uma terceira fundição foi realizada, tendo em vista que se desejava incorporar outros materiais que pudessem proporcionar algumas características, como maleabilidade e condutividade, junto ao alumínio que já estava formado pelo lingote (50 % reciclado e 50 % comercial). A terceira fundição ocorreu, então a partir do segundo lingote formado, sendo que nesta terceira fundição, incorporou-se os materiais cobre e magnésio. Para o projeto da fita laminada confeccionou-se uma coquilha para receber o alumínio fundido, oriundo da terceira fundição. Nesta coquilha o alumínio foi vazado e formou-se três fitas com espessuras de 2 mm, 3 mm e 4 mm. Com as fitas formadas, procurou-se laminá-las com a finalidade de reduzir suas espessuras para valores próximos a 0,5 mm. O processo de fundição das latas de alumínio adicionado de alumínio comercial, mais a incorporação de cobre e magnésio, demonstrou facilidades para redução da espessura no processo de confecção de fitas laminadas.

Palavras Chave: Latas de Alumínio. Fundição do Alumínio. Ligas de Alumínio. Fitas laminadas.

5.2.1 Introdução

A reciclagem é um processo economicamente e ambientalmente correto, pois visa o aproveitamento de resíduos que estariam sendo dispostos em aterros ou em locais impróprios contaminando o meio ambiente (Abdel-Shafy e Mansour, 2018). Com a reciclagem, diminui-se o volume destes resíduos, além de diminuir o montante de matéria-prima utilizada em determinados processos (Shamsudin *et al.*, 2016).

A cada tonelada de alumínio reciclado, diminui-se a extração de 4 toneladas de bauxita, além de economizar até 95 % de energia que corresponde a aproximadamente 700 kg de petróleo bruto (Škŕrková e Ingaldi, 2014). Ao citar o termo reciclagem, primeiramente lembre-se do alumínio pois é um material que pode ser reciclado inúmeras vezes sem perder suas características (Bdeir e Alsaffar, 2008). Alguns dos benefícios da reciclagem do alumínio vão além da redução de energia e matéria prima utilizadas, envolvendo questões sociais, visto que a reciclagem é fonte de renda para muitas famílias de catadores de materiais reciclados, mantendo pessoas com baixa escolaridade inseridas no mercado de trabalho. Desta forma, gera-se recursos para aplicação nas economias locais, desenvolvendo o mercado em âmbito local e nacional (Kumar, Anil *et al.*, 2018). Segundo Ghisellini e Ulgiati (2020), na Itália, a reciclagem se tornou a prática preferida na maioria das organizações envolvidas em toda a cadeia de suprimentos, desde a coleta de resíduos pós-consumo até a recuperação, reciclagem e produção de matérias-primas secundárias.

A reciclagem do alumínio no Brasil vem crescendo nos últimos anos. Em 2002, o índice era de 87 %, alcançando 96 % em 2005. Segundo Associação Brasileira de Alumínio – ABAL (2018), quase todas as latas de alumínio oriundo de bebidas vendidas em 2017 retornaram para o ciclo produtivo, alcançando um índice de 97,3 % de reciclagem. Das 303,9 mil toneladas de latas distribuídas no mercado brasileiro no ano de 2017, 295,8 mil toneladas foram recicladas. Um diferencial do alumínio, a reciclabilidade sem perda de propriedades físico/químicas, torna o metal uma excelente escolha, principalmente para as embalagens de bebidas carbonatadas como refrigerantes e cervejas. O processo de reciclagem tem na economia de energia uma das suas maiores vantagens, pois utiliza apenas 5 % da energia necessária para a produção do metal primário a partir do minério (Ding *et al.*, 2012). Há também vantagens ambientais relevantes como: a redução da poluição do ar em 95 % e da água em 97 %, redução das emissões de gases

efeito estufa em 95 % em comparação com a produção de alumínio primário (Škúrková e Ingaldi, 2014).

Segundo Grimaud *et al.* (2018), o alumínio reciclado demonstra enormes benefícios ambientais quando comparado ao alumínio primário. A reciclagem proporciona um maior cuidado com o meio ambiente, o que se traduz em formas de educação ambiental, que deve ser incentivada desde a educação primária (Hutcheson *et al.*, 2018). Por meio da educação ambiental, incentiva-se a reciclagem de diversos materiais, criando uma conscientização ambiental na população para redução do volume de resíduos sólidos destinados aos aterros sanitários (Phan Hoang e Kato, 2016).

O alumínio possui boa resistência à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica, além de possuir boa ductibilidade (Huynh *et al.*, 2019). Todas essas características o tornam indicado para a fabricação de laminados muito finos, embalagens, latinhas de bebidas, recipientes para a indústria química, cabos e condutores elétricos. Um fio condutor elétrico de alumínio, na devida proporção de área do fio condutor, pode conduzir tanta corrente elétrica quanto um fio condutor de cobre, que é duas vezes mais pesado, assim como valor de mercado mais elevado. Com isso, o alumínio é muito utilizado pelo setor de fios e cabos (Huynh *et al.*, 2019). Porém, o alumínio primário apresenta baixa resistência a esforços mecânicos e baixos níveis de dureza. Por isso, para peças que estão sujeitas a esforços elevados, a resistência do alumínio não é adequada (Grimaud *et al.*, 2018). Existem várias formas de melhorar as propriedades de um metal. Pode-se acrescentar elementos químicos e obter novas ligas. Por meio de processos mecânicos, como laminação ou prensagem, pode-se torná-lo, por exemplo, mais resistente (Association, 1984). Também é possível obter melhorias nos resultados com a aplicação de processos de tratamento térmico (Kuchariková *et al.*, 2019).

Esta pesquisa teve como propósito encontrar possíveis aplicações industriais para o alumínio secundário, especificamente oriundo de latas de bebidas. As latas de alumínio foram coletadas na Cooperativa de Catadores e Recicladores de Santa Cruz do Sul – RS - Brasil, as quais foram fundidas e após misturadas ao alumínio primário, juntamente com magnésio com teor de pureza de 99,98 % e com o cobre em pó, adquiridos em empresas comerciais. O objetivo desta pesquisa foi realizar a fundição de latas de alumínio, adicionar alumínio comercial, formar uma liga de alumínio 50 % reciclado e 50 % comercial, e posteriormente, adicionar cobre e magnésio, visando desenvolver uma fita laminada condutora de corrente elétrica.

5.2.2 Fundamentação Teórica

Reciclagem de latas de alumínio

A reciclagem industrial do alumínio no Brasil, tem destaque na cidade de Pindamonhangaba - SP, eleita pela Associação Brasileira de Alumínio em 2003, a capital nacional da reciclagem do alumínio. Nesta cidade, encontram-se instaladas as duas maiores recicladoras de alumínio do País: Alcan (atual Novelis) instalada desde 1970 e a Latasa, que adquiriu a antiga Aleris Reciclagem instalada desde 1996. Juntas, processam aproximadamente 70 % de toda a sucata recuperada no Brasil (Abal, 2017).

Em comparação com o processo de produção do alumínio primário, a reciclagem de alumínio apresenta uma redução do consumo de energia elétrica na ordem de 95 % (Škúrková and Ingaldi, 2014). As atividades de reciclagem possuem um papel de conservar os recursos naturais e reduzir a poluição. Se os resíduos forem pré-tratados e classificados adequadamente, o alumínio reciclado poderá ser reutilizado para quase todas as aplicações industriais (Jerina *et al.*, 2018). A reciclagem de ligas de alumínio tem crescido em interesse e aplicações nos últimos anos e se tornou uma maneira econômica, ecológica e confiável de se produzir peças de alumínio (Mandatsy Mounngomo *et al.*, 2016). Além disto, para Mansurov *et al.* (2018), o valor relativamente baixo da tecnologia de fundição fornece uma parcela maior da demanda por ligas de alumínio, além de suas propriedades de resistência à corrosão e sua excelente capacidade de reciclagem.

Para Jerina *et al.* (2018), a qualidade do material reciclado depende de vários fatores, incluindo a pureza do material, tipos de revestimentos e tamanho. O controle de impurezas exerce uma grande influência nas propriedades mecânicas das ligas recicladas. Da mesma forma, Mansurov *et al.* (2018) menciona que a reciclagem causa adição individual e combinada de elementos de impureza, como Si, Fe, Cu, Zn, Pb, Sn, Ni e Mn, nas propriedades de fundição da liga (Dagwa and Adama, 2018). Outro fator relevante, principalmente no momento do processo de fundição, é que, as sucatas oriundas do reciclo urbano, geralmente estão oxidadas. Segundo Jerina *et al.* (2018), o conteúdo de óxidos em grandes pedaços de alumínio pode chegar a 2 % em massa. Durante o processo de fusão, o Al_2O_3 flutua para a superfície e forma uma segunda fase conhecida como escória. No processo de fusão da sucata de alumínio, cerca de 10 % do material é perdido porque o alumínio se mistura com a escória e outros 10 % do metal são oxidados (Gronostajski *et al.*, 2000).

O ferro é o elemento de impureza mais encontrado no reciclo do alumínio porque é muito difícil de remover e se acumula gradualmente durante a reciclagem repetida (Basak e Hari Babu, 2016). Juntamente com o alumínio e outros elementos de liga, como manganês, cobre, magnésio e silício, o ferro produz fases intermediárias, que são prejudiciais às propriedades mecânicas do produto final durante a solidificação. Para Ashtari *et al.* (2012), o ferro é uma das impurezas mais problemáticas nos materiais fundidos de alumínio. Conforme Zhang *et al.* (2012), a adição de um neutralizador adequado como Mn, Cr, Be, Co, Mo, Ni, V, W, Cu, Sr ou outros elementos de terras raras como Y, Nd, La e Ce poderia controlar o efeito deletério de Fe nas ligas de alumínio (Závodská *et al.*, 2018).

O processo de refusão de latas descartadas tem um destaque na cadeia produtiva do ciclo do alumínio no Brasil (Verran *et al.*, 2005). A lata é composta por corpo, selo e tampa, sendo que, possuem composições de liga diferentes. O corpo da lata é produzido a partir da liga de alumínio ASTM 3004, a tampa pela liga ASTM 5182 e o selo é produzido a partir do alumínio ASTM 5082 (Dagwa e Adama, 2018).

Ligas de alumínio

O alumínio da série 3xxx tem como principais características a resistência à corrosão, a boa conformabilidade e uma resistência mecânica moderada. Apresentam maior teor de manganês em suas ligas, o qual é adicionado para que se aumente a resistência à corrosão e ductilidade no alumínio (Schlesinger, M. E., 2013). Por sua vez, as ligas da série 5xxx possuem alto teor de magnésio, de até 5,6 %, que proporciona maior dureza, resistência mecânica e resistência à corrosão, além de melhorar a usinabilidade e propriedades de solda (Bdeir and Alsaffar, 2008). De acordo com Davis (2001) as ligas de alumínio de série 3xxx e 5xxx possuem a composição química descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química da liga de alumínio 3xxx e 5xxx.

Elemento Químico	Porcentagem (%)	
	Liga 3xxx	Liga 5xxx
Alumínio	95,00 - 98,90	> 86
Manganês	0,05 - 01,98	0,05 – 1,4
Zinco	0,30 - 02,50	< 1,8
Silício	0,03 - 01,60	< 1,4
Magnésio	0,20 - 01,47	0,2 – 5,6
Outros	< 01,80	< 2,1

Fonte: Davis (2001).

As propriedades mecânicas das ligas usadas nas latas de alumínio são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas das latas de alumínio séries 3004 e 5182.

Propriedades	Ligas	
	3004	5182
Massa específica – densidade (1000 kg/m ³)	2,6 – 2,8	2,6 – 2,8
Módulo de elasticidade (GPa)	70 – 80	70 – 80
Resistência à tração (MPa)	215	420
Limite de escoamento (MPa)	170	395
Alongamento (%)	10	25
Resistência ao Cisalhamento (MPa)	115	150
Resistência à Fadiga (MPa)	105	140
Dureza (HB 500)	52	25

Fonte: Bdeir e Alsaffar (2008).

A norma *American Society for Testing Materials* (ASTM), que é utilizada como referência para a fabricação de latas, define a lata de alumínio em três diferentes partes: corpo (liga 3004); tampa (liga 5182) e selo (liga 5082), conforme Tabela 3.

Tabela 3: Composições químicas das ligas utilizadas na fabricação das latas de alumínio.

Componentes (Liga)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)	Outros (%)	Outros total
Corpo	0,30	0,70	0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	0,25	-	-	0,05	0,15
Tampa	0,20	0,35	0,15	0,2-0,5	4,0-5,0	0,25	0,10	0,10	0,05	0,15
Selo	0,2	0,35	0,15	0,25-0,4	3,3-4,0	0,25	0,15	0,10	0,05	0,15

Fonte: Schlesinger (2013).

Em estudos sobre fundição de latas de alumínio, Verran e Kurzawa (2008) realizaram testes com adição de fluxo escorificante com objetivo de otimizar a fundição de latas de alumínio e reduzir a formação de escória no processo. A Figura 1 representa a eficiência da fundição com a adição de fluxo escorificante e evolução da temperatura. Observa-se que a eficiência estabilizou com a adição de 10 % em massa de fluxo escorificante e uma temperatura de 750 °C. A adição de percentuais superiores a 10 % em massa, não resultaram em aumentos de eficiência representativos. Outro fator observado, foi a influência da temperatura de fusão, resultando em uma economia de energia e na redução nas perdas por oxidação.

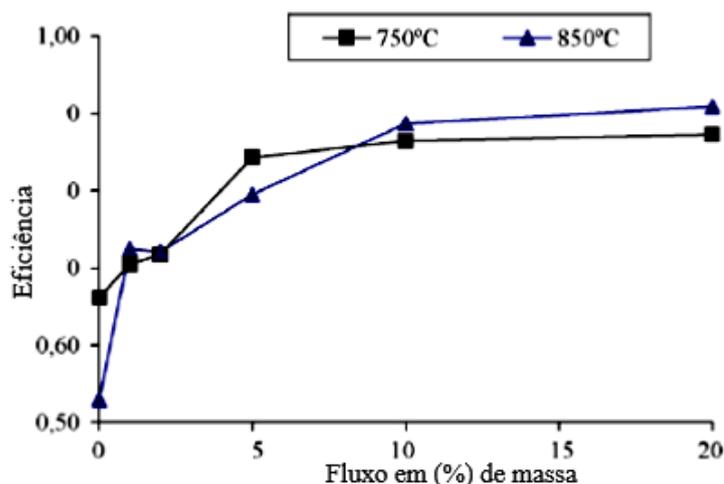


Figura 1: Eficiência da fundição com adição de fluxo escorificante e evolução da temperatura.
 Fonte: Verran e Kurzawa (2008).

Adições superiores a 10 % em massa, melhoraram a eficiência do fundido, porém, ocorreu a necessidade de aumento da temperatura para 850 °C. Além disso, Verran e Kurzawa (2008) destacam o uso de forno elétrico à indução para a realização da fundição, o qual apresenta melhor rendimento (média de 71,61 %) quando comparado com fornos à combustão (óleo/ar) e a gás natural, que obtiveram 55 % e 60 % de rendimento respectivamente. A análise da composição química do material fundido está representada na Tabela 4.

Tabela 4: Análise da composição química da fundição de latas de alumínio utilizado por Verran e Kurzawa (2008).

	Mn (%)	Mg (%)	Cu (%)	Si (%)	Fe (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)	Ni (%)	Pb (%)	Al (%)
Mínimo *	0,73	0,48	0,10	0,09	0,29	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	97,65
Máximo *	0,78	0,88	0,14	0,16	0,40	0,05	0,06	0,02	0,04	0,02	98,09
Média *	0,74	0,63	0,11	0,10	0,34	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	97,99

Fonte: Verran e Kurzawa (2008).

Observa-se uma variação de Mg de 54,5 %, entre valores máximos e mínimos. Segundo Kumar *et al.* (2018) o magnésio quando submetido a altas temperaturas sofre variações em processos de fundição quando em contato com o oxigênio, a menos que sejam tomados cuidados para proteger a superfície contra a oxidação. Esta proteção ocorre com o uso de injeção de gases inertes como, por exemplo, argônio sobre a superfície de fundição. Da mesma forma, o ferro apresenta uma variação de 72,5 % entre máximas e mínimas. Elementos contaminantes como Ti, Pb e Cr foram encontrados no alumínio reciclado em pequenas quantidades.

Processos de reciclagem de alumínio

Segundo Verran *et al.* (2004) o processo de reciclagem de latas de alumínio em pequena escala utiliza fornos elétricos à indução para fundir o material e analisa-se a qualidade do material recolhido e fundido no processo. O material coletado, no início do processo, é liberado sobre uma correia transportadora, e levado para um moinho de facas, onde o material é fragmentado. Os fragmentos seguem para um separador eletromagnético que remove materiais ferrosos que não podem ser misturados ao alumínio. Após, o material passa por um moinho de martelos, onde é picotado em cavacos, outra separação magnética retira ainda os resíduos de impurezas. Segue para uma peneira vibratória que retira terra, areia e outros resíduos e um separador pneumático completa o processo com jatos de ar que retiram papéis, plásticos e demais contaminantes. Os cavacos passam para a remoção das tintas e polímeros que recobrem o material no interior de um forno rotativo conhecido como forno Kiln. Na etapa seguinte ocorre a fusão do cavaco a 700 °C, onde o material líquido é vazado em cadinhos e transformado em lingotes.

Elementos de liga

A adição de elementos de liga busca acrescentar ao alumínio características para proporcionar ao fundido, propriedades de interesse. Como esta pesquisa visa produzir uma fita laminada condutora de energia, é relevante a adição de elementos de liga como o cobre, já que suas propriedades de condução, são superiores às do alumínio, além de melhores resistência à tração e corrosão, elevada dureza, ductibilidade e conformabilidade (Shackelford, 2008). O magnésio é outro elemento que apresenta propriedades que podem favorecer à composição da liga para formar a fita condutora de energia. Além de proporcionar um ganho mecânico, o magnésio permite manter um elevado nível de resistência à corrosão, porém, é altamente solúvel em seu ponto de fusão, devendo ser fundido em atmosfera controlada com argônio (Achyuth *et al.*, 2019). As ligas Al-Mg com teores variando entre 3 % e 5 % formam ligas como 5042, 5352, 5082 e 5182 utilizadas na fabricação de tampas de latas de bebidas (Dagwa e Adama, 2018).

5.2.3 Metodologia

Esta pesquisa utilizou de uma metodologia experimental e as amostras de alumínio reciclado (latas de bebidas) foram obtidas por meio da Cooperativa dos Catadores e Recicladores de Santa Cruz do Sul - RS - Brasil. Para a retirada da umidade, os materiais foram inseridos em forno tipo mufla, com a temperatura variando entre 150 e 200 °C. Os materiais foram fundidos, sem a separação dos componentes da lata, em forno do tipo industrial, modelo Grion, utilizando um cadinho de aço. A temperatura de fundição do alumínio foi de 750 °C com base em Verran e Kurzawa (2008). As etapas do processo de fundição e que embasaram a metodologia desta pesquisa estão descritas na Figura 2.

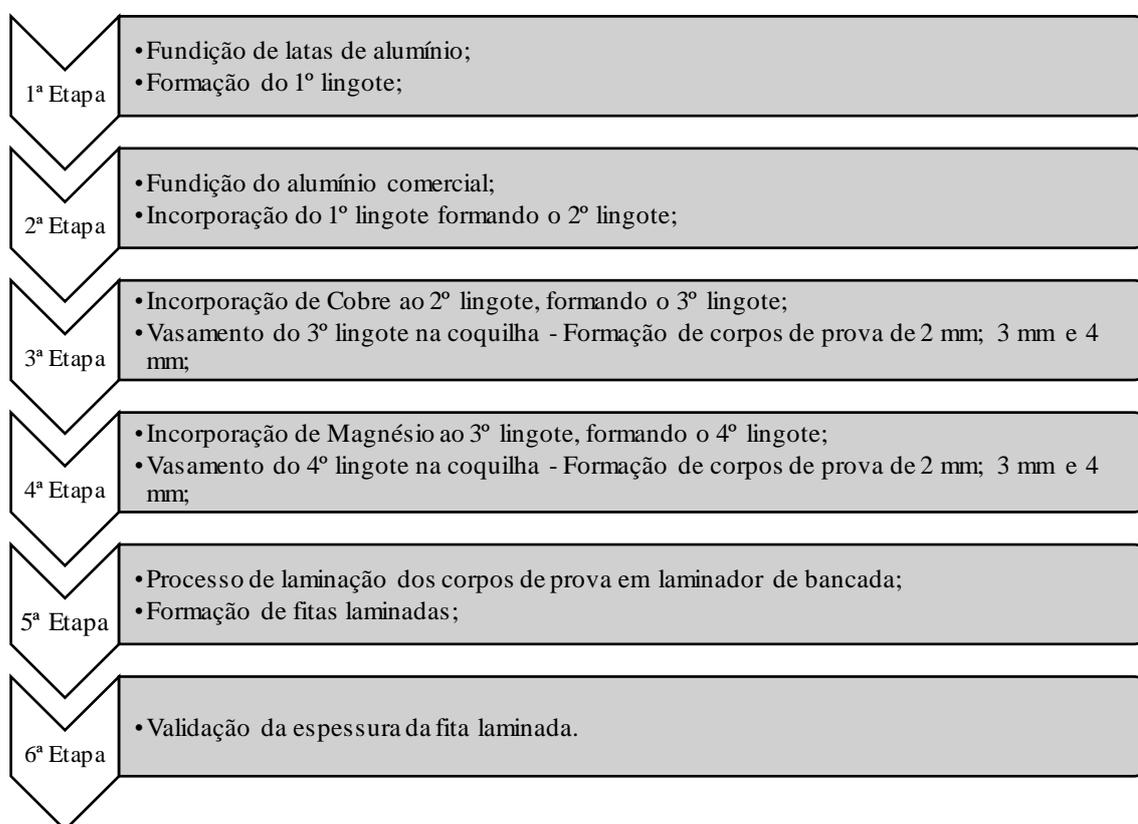


Figura 2: Sequência metodológica das etapas da pesquisa durante o processo de fundição.

Após a aquisição das latas e sua respectiva preparação para a realização da fundição, o material foi compactado e prensado, possibilitando desta forma, um melhor acondicionamento de maneira a proporcionar uma melhor fundição, uma vez que numa carga mais compacta, existe uma menor relação superfície/volume, e conseqüentemente, uma menor tendência à ocorrência de perdas por oxidação (formação de escória).

A 1ª etapa que consistiu na fundição de latas de alumínio e a formação do 1º lingote; ocorreram pela inserção das latas no forno de forma manual. Figura 3 a. Durante o processo de fundição, ocorreu a formação de escória na superfície do fundido, sendo retirada a cada 5 kg de latas introduzidas no forno, demonstrada na Figura 3 b. Nesta etapa da investigação foram utilizadas 20 kg de latas de alumínio reciclado.



Figura 3: Processo de fundição de latas de alumínio. a) Colocação manual das latas de alumínio. b) Escória retirada do fundido.

Com a mistura definitivamente homogeneizada, o fundido foi escoado para o molde, Figura 4. Foram obtidos 10,2 kg de material fundido do total de 20 kg de latas, resultando em um rendimento de 51 %.



Figura 4: Lingotes de alumínio - lingote 50 % / 50 %.

Para a 2ª etapa, o 1º lingote foi novamente fundido, e sobre este, adicionou-se 10 kg de alumínio comercial, que após homogeneizado, foi escoado no molde formando o 2º lingote. O alumínio comercial utilizado possuía a seguinte característica - liga 6063. Este 2º lingote, foi denominado “lingote 50 % / 50 %” (50 % de fundição de latas recicladas e 50 % da fundição

de liga comercial de alumínio). Nesta segunda fundição, o rendimento em massa foi de 90 %. A partir do lingote de alumínio formado (Figura 4) desejava-se obter uma fita laminada com espessura de 0,5 mm. Como o lingote formado possuía uma espessura de 16 mm, foi necessário produzir um molde, denominado coquilha.

A fim de vaziar o 2º lingote formado e iniciar a confecção dos corpos de prova, fez-se necessário inicialmente vaziar o fundido em uma coquilha, que já possuía os espaços adequados para receber o fundido. A fundição em coquilha tem excelente precisão dimensional e tem como resultante, ótimas propriedades mecânicas. Para a confecção da coquilha, foi utilizada uma barra chata de aço, SAE 1045, com 30 cm de comprimento e 10 cm de largura. Esta barra foi cortada ao meio para utilizar uma peça como tampa e a outra peça foi fresada com ferramenta 8 mm formando os canais por onde o alumínio fundido, ainda em estado líquido, seriam escoados, conforme, Figura 5.

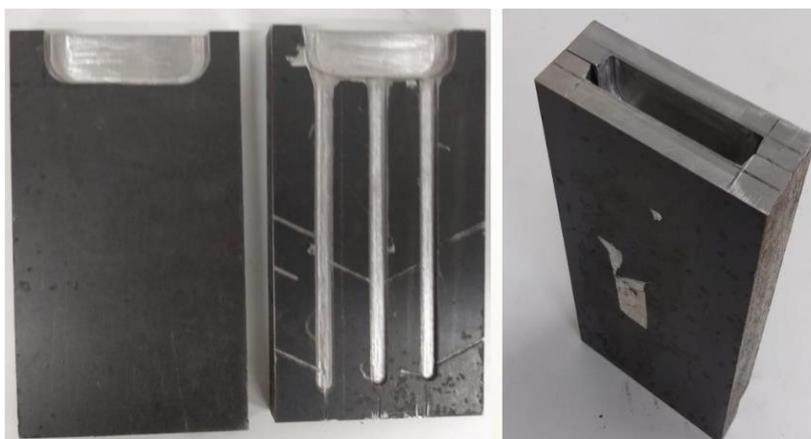


Figura 5: Coquilha confeccionada para escoamento do fundido.

Na parte superior das duas peças da coquilha, foi realizada uma cavidade para evitar o derramamento do alumínio quando do seu escoamento, de forma a direcionar o material para os canais principais. Nesta cavidade, formou-se um corpo de prova retangular, após o resfriamento do material. Este corpo de prova foi utilizado como amostra para a realização de análises químicas para comparar a composição química das ligas formadas com a literatura. Quanto ao método de escoamento, foi utilizado o método por gravidade. Os três canais foram dimensionados com 2 mm, 3 mm e 4 mm de profundidade. Assim, os corpos de prova tiveram suas medidas descritas conforme a Tabela 5. Para a saída e escape dos gases, foram realizados pequenos cortes oblíquos nas laterais da coquilha e interligados aos corpos de prova e, cortes verticais na base dos corpos de prova para saída direcional ao fundo dos três canais.

Tabela 5: Especificações das medidas dos corpos de prova dentro da coquilha.

	Corpo de Prova 01	Corpo de Prova 02	Corpo de Prova 03
Largura	08 mm	08 mm	08 mm
Comprimento	15 mm	15 mm	15 mm
Espessura	02 mm	03 mm	04 mm

Desta forma, o fundido da 2ª etapa foi escoado na coquilha, formando o primeiro lote de corpos de prova nas espessuras 2 mm, 3 mm e 4 mm, e sua composição, deu-se com 50 % de alumínio reciclado e 50 % de alumínio comercial (liga Alumínio 50 % / 50 %).

A 3ª Etapa consistiu na incorporação de Cu ao 2º lingote, formando o 3º lingote. Esta etapa foi subdividida em duas etapas: A primeira foi realizada com a adição de 30 g. de Cu, sendo escoada na coquilha, formando o 2º lote de amostras. Para a segunda subdivisão, adicionou-se mais 30 g. de Cu, sendo escoada na coquilha, formando o 3º lote de amostras.

Da mesma forma, a 4ª Etapa foi subdividida em duas etapas: Na 1ª etapa, adicionou-se 40 g. de Mg, ao lingote da etapa anterior e vazou-se o material em coquilha novamente a fim de formar os corpos de prova. Na 2ª etapa, adicionou-se mais 40 g. de Mg, ao lingote formado anteriormente, e escoou-se novamente o material em coquilha a fim de formar os lotes de amostras 4 e 5, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Sequência experimental da formação das ligas a partir do lingote 50 % / 50 %.

1º Lote de amostras
800 g. alumínio (lingote 50 % / 50 %) Realizou-se 3 corridas*, obtendo 9 CP*
2º Lote de amostras
800 g. alumínio (lingote 50 % / 50 %) + 30 g. cobre Realizou-se 3 corridas, obtendo 9 CP
3º Lote de amostras
800 g. alumínio (lingote 50 % / 50 %) + 60 g. cobre Realizou-se 3 corridas, obtendo 9 CP
4º Lote de amostras
800 g. alumínio (lingote 50 % / 50 %) + 60 g. cobre + 40 g. de magnésio Realizou-se 3 corridas, obtendo 9 CP
5º Lote de amostras
800 gr. alumínio (lingote 50 % / 50 %) + 60 g. cobre + 80 g. de magnésio Realizou-se 3 corridas, obtendo 9 CP

* Corridas significa escoamento do fundido na coquilha e CP significa corpo de prova.

A incorporação de Cu e Mg ao Al, ocorreu visando avaliar posteriormente a estrutura da fita que apresentaria a melhor composição química e mecânica. Ao final das 5 corridas de fundições realizadas, pode-se selecionar e identificar 45 corpos de prova.

Para ocorrer um escoamento homogêneo do fundido na coquilha de forma que não houvesse um resfriamento acelerado do fundido, a coquilha foi aquecida em forno resistivo tipo “mufla”, mantendo-a constante em temperatura de 450 °C. A Figura 6 a. apresenta o vazamento do alumínio formado pelo primeiro lingote na coquilha confeccionada. O alumínio de 800 g. em massa foi inserido no cadinho dentro do forno e, quando alcançou a temperatura de 750 °C, aguardou-se estabilizar o fundido por cerca de 20 minutos e, então, foi escoado na coquilha, previamente aquecida a 450 °C. A figura 6 b. representa os corpos de prova do 1º lote formados dentro da coquilha.



Figura 6: Processo de escoamento do alumínio fundido na coquilha. a. vazamento do alumínio formado pelo primeiro lingote na coquilha. b. Abertura da coquilha e retirada dos corpos de prova do 1º lote de amostras.

Após 5 minutos, a coquilha pôde ser aberta e os corpos de prova foram retirados cuidadosamente, de forma a evitar fraturas ao longo do corpo de prova, Figura 7 b. Após cada lote de amostras obtidas na sequência experimental, apresentada no Quadro 1, foi retirada uma amostra para realizar a análise química, visando identificar a composição resultante da mistura proposta no experimento. Esta análise foi realizada por meio da técnica de espectroscopia de emissão óptica, realizada por um Espectrômetro Óptico Solares, modelo CCD Plus – S5.

Avaliou-se que a coquilha confeccionada atingiu o objetivo de formar corpos de prova mais próximos da espessura final da fita laminada que se desejava obter (Figura 7). Para reduzir a espessura dos corpos de prova de 2 mm, 3 mm e 4 mm, para 0,5 mm tornou-se necessário executar o processo de laminação na ordem de 4x; 4 x e 6 x respectivamente sobre as espessuras resultante da fundição em coquilha.



Figura 7: Identificação e verificação da validade do corpo de prova.

A 5ª Etapa consistiu no processo de laminação dos corpos de prova, Figura 8 a, em laminador de bancada, Figura 8 b, e formação das fitas laminadas, Figura 8 c. Nesta etapa após a seleção dos corpos de prova formados por aqueles que apresentaram estrutura condizente para serem laminados, fez-se a laminação dos mesmos, onde procurou-se reduzir as espessuras dos corpos de prova formados e que foram extraídos da coquilha.

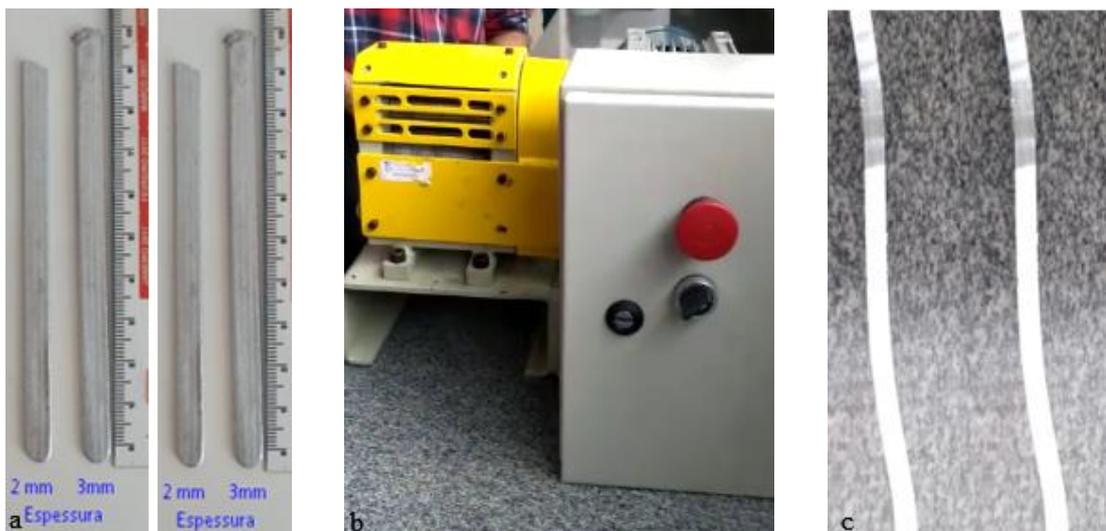


Figura 8: Processo de laminação dos corpos de prova. a. Corpos de prova como retirados da coquilha. b. Laminador de bancada – limite máximo de entrada 5 mm e limite mínimo de 0,5 mm. c. Fitas laminadas com espessuras finais entre 0,6 mm e 0,5 mm.

A 6ª etapa consistiu na validação da espessura das fitas laminadas. Neste momento fez-se análise das espessuras das fitas laminadas e selecionou-se apenas aquelas que apresentaram espessuras inferiores a 0,6 mm. Algumas fitas após laminadas, 5 ou 6 vezes, quebraram e não puderam ser aproveitadas como corpos de prova.

Validou-se como corpos de prova, apenas aquelas estruturas (fitas laminadas) que ficaram inteiriças, com mais de 50 % do seu tamanho original saído da coquilha. Somente as estruturas (fitas laminadas, Figura 8 c.) que permaneceram intactas, com mais de 50 % de seu tamanho original, foram validadas como espécimes.

5.2.4 Resultados

A massa inicial de 20 kg de alumínio, composta pelas latas recicladas que foram adquiridas na Cooperativa de Catadores de Materiais Reciclados de Santa Cruz do Sul- RS- Brasil, após a fundição e retirada da escória, resultou em 10,2 kg de alumínio fundido na forma de lingote. Em valores percentuais, o rendimento obtido no processo foi de 51 % em relação a massa inicial. Cabe ressaltar que, o processo de fundição foi realizado em forno industrial, em que seu processo de combustão utiliza gás liquefeito de petróleo (GLP). Este resultado obteve um percentual inferior aos resultados obtidos por Verran *et al.* (2005) que, obtiveram uma média de rendimento de 71,61 %. No entanto, utilizaram, naquela pesquisa, um forno indutivo e, além disso, fluxo escorificante no processo na proporção de 20 % em massa, o que melhorou o rendimento para valores acima de 80 %.

A composição final resultante da sequência experimental, após a adição do Cu e Mg pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6: Composição final da liga de alumínio, cobre e magnésio.

Composição da Mistura		
Material	Massa (g)	(%)
Lata de Alumínio	400	42,55 %
Alumínio Comercial	400	42,55 %
Cobre em pó	60	6,38 %
Magnésio com teor de pureza de 99,9 %	80	8,51 %
Total	940	

Os resultados obtidos pela metodologia experimental, descrita no Quadro 1 foi considerada eficiente quanto aos resultados percentuais das adições de Cu e Mg. Para a análise da composição do lingote de alumínio fundido, composto por 50 % de alumínio reciclado e 50

% de alumínio comercial, foi realizada a análise química nas amostras, por meio da técnica de espectroscopia de emissão óptica. Os resultados das análises químicas estão representados na Tabela 7.

Tabela 7: Análise da composição química do alumínio fundido (lingote 50 % / 50 %).

Amostra	Al (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Si (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)
Latas de alumínio + Alumínio comercial (50 % / 50 %)	98,2	0,787	0,305	0,283	0,101	0,242	0,028	0,020	0,000

Observa-se que os resultados obtidos estão de acordo com os parâmetros definidos pela norma ASTM, apresentados na Tabela 3. O nível de Si encontra-se dentro do intervalo estabelecido. No entanto, os demais elementos, apresentaram valores levemente inferiores aos resultados apresentados por Schlesinger (2013), assim como Davis (2001) na Tabela 1. Além disso, percebe-se uma relativa semelhança com os dados obtidos por Verran *et al.* (2004) descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Análise química dos corpos de prova referente à pesquisa de Verran *et al.* (2004).

Amostra	Al (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Si (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)
Latas de alumínio	97,9	0,626	0,732	0,358	0,113	0,145	0,03	0,02	0,02

Fonte: Adaptado de Verran *et al.* (2004).

Observa-se que o percentual de alumínio das Tabelas 7 e 8 apresentam-se muito próximos, sendo que Verran *et al.* (2004) utilizaram apenas latas de alumínio recicladas. Os percentuais de manganês apresentam valores levemente inferiores em relação aos de referência da Tabela 3. Quanto aos demais elementos que aparecem na forma de impurezas, pode-se afirmar que, os valores encontrados estão dentro dos limites estabelecidos em todas as normas que definem a especificação da composição química para ligas de alumínio trabalháveis.

O alumínio fundido a partir das latas de alumínio foi considerado elemento base da pesquisa para a fabricação da fita laminada. Adicionou-se a este alumínio, resultante da segunda etapa de fundição, elementos de liga como o Cu e Mg, e procurou-se avaliar se estes elementos acrescentam melhorias nas propriedades de condução de corrente elétrica na fita laminada que foi produzida. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos pela análise química da liga de

alumínio 50 % / 50 % composta com 60 g. Cu formando a liga Al - Cu resultando no 3º lote de amostras da sequência experimental, conforme Quadro 1.

Tabela 9: Análise química da liga de alumínio (lingote 50 % / 50 %) com adição de 60 g de Cu.

Amostra	Al (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Si (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)
Liga base alumínio	90,21	0,69	0,323	0,343	6,176	0,593	1,569	0,014	0,026

Observa-se um aumento proporcional de Cu ao fundido (lingote 50 % / 50 %), sendo que a incorporação do Cu foi bem-sucedida representando 6,176 % da liga. Neste experimento, ocorreu uma fratura no cadinho, sendo o fundido escoado em outro cadinho de forma que se prosseguisse o experimento. No entanto, esta troca causou uma pequena contaminação de impurezas contidas na parede do novo cadinho, o qual resultou em um aumento no valor de Zn para 1,569 % na liga.

Uma nova fundição foi realizada para adicionar 80 g de magnésio formando o 5º lote de amostras, de acordo com o Quadro 1. Devido a adição de magnésio, foi utilizado injeção de gás argônio para controlar o contato do oxigênio ao banho, já que o magnésio é altamente solúvel quando em contato com o oxigênio. Após a estabilização do banho e homogeneização da liga, o argônio foi desligado e o fundido, novamente, escoado na coquilha aquecida em 450 °C. Com a adição de cobre e magnésio, notou-se uma melhora na fluidez ao escoamento e, com isso, os canais foram preenchidos de forma integral, deixando os corpos de prova no tamanho determinado pela medida do canal da coquilha. Uma nova análise química foi realizada com as amostras resultantes apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Análise química da liga de alumínio (lingote 50 % / 50 %) com adição de 60 g de Cu e 80 g de Mg (liga Al-Cu-Mg).

Amostra	Al (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Si (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)
Liga base alumínio	82,79	6,775	0,368	0,379	7,00	0,564	1,96	0,012	0,025

Observa-se que os percentuais de Cu e Mg apresentaram 7 % e 6,775 % respectivamente. O Mg não alcançou o percentual previsto de 8 %, da Tabela 6, devido ao grau de solubilidade, sendo encontrado um aumento na formação de escória na superfície do fundido, causado pela oxidação do Mg. O comportamento do Cu permaneceu estável como nos escoamentos anteriores. Os demais elementos permaneceram, praticamente iguais em relação às adições prévias realizadas.

5.2.5 Conclusão

Devido a sua fácil coleta e valor relativamente alto, as latas de alumínio são atrativas para a atividade de coleta e venda de materiais recicláveis. Naturalmente, em se tratando de reciclagem, impurezas sempre irão existir no processo de fundição, o que irá contribuir para a formação de escória. Com isso, pesquisar métodos ou técnicas de fundição que melhorem o rendimento do processo, torna-se o primeiro desafio aos pesquisadores que se interessam pelo tema da reciclagem de metais.

O processo de fundição do alumínio reciclado demonstra ampla possibilidade de reaproveitamento de resíduos sólidos. Além de possibilitar renda para sustentar diversas famílias de catadores de materiais reciclados em centros urbanos, pode contribuir para diversas aplicações industriais.

O viés da sustentabilidade traz outro ponto importante para a reciclagem de materiais, já que, é sabido do esgotamento dos minerais da crosta terrestre. Este fato, torna as pesquisas relevantes, de modo que, o ciclo dos materiais se mantenha em processo de reaproveitamento, e se reduza a extração de minérios do subsolo.

Um dos objetivos desta pesquisa focou no reaproveitamento e reuso de materiais reciclados e, além disso, propôs uma destinação mais adequada aos resíduos industriais, oferecendo possibilidades para economia dos materiais. Contudo, verifica-se a importância do aprimoramento no processo de confecção de matrizes, para o escoamento do fundido, de forma que essa possa proporcionar a extração de corpos de prova de forma mais facilitada, de modo que não ocorram danos aos corpos de prova, quando de sua retirada da matriz.

Ao realizar esta pesquisa, fundindo o alumínio reciclado proveniente de latas de bebidas, após a separação da escória inicial, comprova-se, a grande eficiência do processo de reciclagem desse material, quando corretamente segregado e se utilizado de forma correta, além de demonstrar facilidades de manuseio do processo, oferecendo possibilidades de outras aplicações, bastando adequar as matrizes (coquilhas) ao produto que se deseja produzir. Há a possibilidade de se ampliar as metodologias e se obter novas aplicações da fusão do alumínio, para que se possa avançar no uso de tecnologias limpas, que contemplem uma maior sustentabilidade.

A adição de Cu e Mg ao alumínio fundido (lingote 50 % reciclado e 50 % alumínio comercial) demonstrou uma grande possibilidade de se fundir materiais diferentes com as

metodologias desenvolvidas, como as que foram demonstradas nesta pesquisa, proporcionando assim, uma nova liga fundida, onde se obteve 85 % em massa de Al, 6,38 % em massa de Cu e 8,51 % em massa de Mg, conforme Tabela 6.

Esta pesquisa terá prosseguimento, onde serão avaliadas as possíveis melhoras ocorridas pelas respectivas adições de Cu (liga Al - Cu) e Mg (liga Al – Cu - Mg) que serão comparadas com a liga à base de Al (alumínio 50 % reciclado e 50 % comercial). Além disso, deverão ser realizados testes de tração, microdureza, nível de encruamento, anisotropia e por fim, as análises de condutividade elétrica que, indicarão os respectivos resultados de condutividade de cada uma das amostras analisadas nesta pesquisa.

5.3 ARTIGO 4 – Desenvolvimento de uma liga a partir de alumínio reciclado para fabricação de uma fita condutora de corrente elétrica

Gilson Gilmar Holzschuh¹, Jorge André Ribas Moraes²; Sérgio Boscato Garcia³; Izete Zanesco⁴; Rosana de Cássia de Souza Schneider⁵; Liane Mahlmann Kipper⁶; Adriano Moehlecke⁷

- 1- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul, RS, Brazil¹ – gilsonh@unisc.br
- 2- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - jorge@unisc.br
- 3- Mechanical Engineering Course Coordinator - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul² – sergio.garcia@pucrs.br
- 4- Coordinator of the Solar Energy Technology Center - Postgraduate Program in Materials Engineering and Technology - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul² – izete@pucrs.br
- 5- Postgraduate Program in Environmental Technology – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - rosana@unisc.br
- 6- Postgraduate Programs in Environmental Technology and Industrial Systems and Processes – University of Santa Cruz do Sul¹, RS, Brazil - liane@unisc.br
- 7- Postgraduate Program in Materials Engineering and Technology - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul – moehleck@pucrs.br

¹ Independência Avenue, 2293 - University, Santa Cruz do Sul - RS, Brazil, ZIP Code 96815-900.

² Ipiranga Avenue, 6681, Porto Alegre - RS, Brazil, ZIP Code 90619-900.

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver uma fita condutora de corrente elétrica, a partir de alumínio secundário oriundo do reciclo de latas de alumínio, visando sua aplicação como fita condutora de corrente elétrica para realizar a conexão entre as células solares na montagem de módulos fotovoltaicos. Para sua produção, foi utilizado o processo de fundição por gravidade e escoado em uma matriz coquilha, projetada especificamente para o experimento. Adicionou-se elementos de liga como Cu e Mg para avaliar se haveriam melhoras nas propriedades das ligas, obtendo-se então, três ligas como amostras: (A) liga à base de alumínio secundário; (B) liga Al - Cu; (C) liga Al - Cu - Mg. Aplicou-se um processo de homogeneização para reduzir as segregações da estrutura heterogênea dos lingotes fundidos, e com o propósito de reduzir a espessura da fita para 0,5 mm, realizou-se o processo de laminação à frio. Ocorreram quatro passes de laminação, a partir da fita inicial que possuía 4,04 mm, resultando em uma redução de 85,4 % da espessura inicial, alcançando $(0,59 \pm 0,04)$ mm de espessura final. Após cada passe de laminação foi aplicado o processo de recozimento para restaurar as propriedades do material para os passes seguintes. Realizou-se os seguintes ensaios: análise química, micrografia ótica e Espectroscopia Dispersiva de Comprimento de Onda (WDS), microdureza Vickers, tração, nível de encruamento, anisotropia e condutividade elétrica. Em relação à microdureza, as amostras mostraram-se frágeis, com baixa ductibilidade, baixa região plástica com limite de resistência à tração próximo ao ponto de estrição. O nível de encruamento, anisotropia normal e planar indicaram uma tendência do material ser resistente à deformação, formação de orelhas e dobras na direção de 45 ° no sentido da laminação, o que justificou as fraturas nas laterais das fitas. A condutividade apresentou resultados entre 45,96 e 47,67 IACS. Conclui-se que o resultado obtido pela pesquisa foi satisfatório em relação ao objetivo de produzir uma fita com utilização de alumínio reciclado com espessura de 0,5 mm e avaliar suas propriedades de condutividade elétrica.

Palavras-chave: Alumínio reciclado. Fundição por gravidade. Homogeneização. Recozimento. Laminação à frio. Fita condutora. Células solares. Módulos fotovoltaicos.

5.3.1 Introdução

Historicamente o cobre foi o metal utilizado para a fabricação de condutores elétricos, devido à sua alta condutividade elétrica para a fabricação de condutores de corrente elétrica. No entanto, apenas 0,01 % da crosta terrestre possui cobre. Por outro lado, o alumínio é encontrado em 8,00 % da crosta terrestre, além de apresentar boa aceitação pela área da engenharia elétrica, e comercializado à valores bem inferiores ao do cobre (Karabay e Uzman, 2005).

Na atualidade, a potência mundial instalada em sistemas fotovoltaicos atingiu o valor de 627 GW, (Brunisholz, 2020). Do total da potência instalada no mundo, aproximadamente 90 % do mercado é relativo a módulos com células solares fabricadas em lâminas de silício cristalino (Itrpv, 2020) e na confecção destes módulos há potencialidade para inovações com relação aos metais utilizados. Para montar o módulo fotovoltaico, primeiramente as células solares são soldadas em tiras e, a continuação, as tiras são soldadas para conectar eletricamente todas as células solares. Para completar a fabricação do módulo fotovoltaico standard, as células solares são encapsuladas em um sanduíche de vidro (na face frontal), EVA (*ethyl vinyl acetate*) e um filme de material polímero (na face posterior) (*backsheet*). Então, o módulo é selado e colocada a estrutura de alumínio.

A fita de soldagem (*solder ribbon*) típica usada para interconectar as células solares é constituída de um material bom condutor, em geral cobre, e uma cobertura de liga de prata que permite soldar a fita no *busbar* da célula solar e realizar o contato elétrico, mecânico e térmico (Zarmai *et al.*, 2015). Tipicamente, o processo de soldagem ocorre em temperaturas maiores que 250 °C e induz tensões termo-mecânicas. Atualmente, materiais e métodos alternativos estão sendo estudados para soldar as células solares de silício cristalino (Guo *et al.*, 2018).

A produção do alumínio primário é subdividida em quatro processos: extração e mineração do minério da bauxita, produção da alumina, fundição do minério e processo de formação do lingote de alumínio. Segundo Farjana *et al.* (2019), o processo de fundição do alumínio primário apresenta altos impactos ambientais, devido ao consumo elevado de energia elétrica, além de óleo combustível, diesel e gás natural.

Peng *et al.* (2019) realizaram uma comparação entre China e EUA sobre o consumo de energia elétrica e as emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) da produção do alumínio primário e secundário. Os resultados apontaram que o consumo de energia fóssil e as emissões de GEE

de alumínio primário da China são o dobro da dos EUA. Com relação ao consumo de energia e as emissões GEE da produção do alumínio reciclado, comparados à produção do alumínio primário, são de apenas 6,37 % na China e 4,45 % nos EUA. Maung *et al.* (2017) avaliaram as reservas secundárias de alumínio em 19 países. Em 2010, 85 milhões de toneladas existentes, localizavam-se nos EUA, 65 milhões de toneladas na China e 29 milhões de toneladas no Japão e 413 milhões de toneladas nas demais regiões e países do mundo. Eles estimaram que nos EUA, suas reservas secundárias eram maiores que as suas reservas primárias e que quantidades consideráveis de materiais secundários de alumínio ainda são acumuladas em aterros sanitários.

Um ponto crítico no processo de reaproveitamento do alumínio secundário é a formação de escória. Para Mahinroosta e Allahverdi (2018) a escória formada no processo de fundição do alumínio é considerada perigosa como resíduo industrial motivando sérios desafios ambientais e de saúde pública. Para reaproveitar este material, podem ser realizados processos de reciclagem direta e indireta além de, estratégias de recuperação destes resíduos, bem como métodos de gerenciamento e reuso destes materiais.

Neste sentido, Tsakiridis *et al.* (2012) avaliaram as características químicas e mineralógicas da escória do sal de alumínio. Formada durante a fundição do resíduo de alumínio, contém entre 15 % a 30 % de óxido de alumínio, de 30 % a 55 % de cloreto de sódio, de 15 % a 30 % de cloreto de potássio, e de 5 % a 7 % de alumínio metálico, além de impurezas como carbetos, nitretos, sulfetos e fosfetos. Seu descarte em aterros é proibido na maioria dos países europeus, devendo ser gerenciada em conformidade com a legislação vigente. Dependendo da mistura bruta, a quantidade de escória pode variar de 200 kg a 500 kg por tonelada de alumínio secundário ao longo da atividade de reprocesso.

Para Capuzzi e Timelli (2018) as inovações e novas tendências estão relacionadas às tecnologias de reciclagem de alumínio, bem como, a evolução dos tratamentos preliminares da sucata, como triagem, trituração e desmembramento, trazendo também, uma revisão das tecnologias de fundição, além de, demonstrarem condições operacionais entre custos e eficiência dos processos de fundição e funcionamento do forno.

Outro fator a ser considerado, são os processos de fundição do alumínio que são determinísticos para o sucesso da reciclagem e reprocesso do alumínio secundário. As ligas secundárias de alumínio são produzidas a partir de sucata de alumínio industriais e resíduos de alumínio oriundos do reciclo. Segundo Hortalová *et al.* (2014) estes metais reciclados contêm diferentes elementos de liga, como Al, Cu, Fe, Si e Mg, que formam fases intermetálicas na

matriz de alumínio e influenciam na microestrutura, propriedades mecânicas básicas e interferem na microdureza da liga de alumínio secundária. No entanto, de acordo com Brommer *et al.* (2011), a incerteza da composição em materiais secundários e condições variáveis de processamento inibem a utilização mais expressiva de materiais secundários na produção de novas ligas de alumínio.

Um dos desafios para a reutilização do alumínio secundário é encontrar aplicações que admitam em sua composição, ligas à base de alumínio secundário, que possam resultar em produtos de uso comercial com as mesmas características dos produtos à base de alumínio primário. Para Ibragimov e Ismailov (2018) uma solução é encontrar elementos de liga (solutos) para adicionar às ligas à base de alumínio secundário, que proporcionem as propriedades necessárias do produto de interesse. As ligas à base de alumínio, possuem características únicas, entre as quais, a alta condutividade elétrica, sendo amplamente utilizadas em indústrias do ramo de energia na produção de fios de linhas de alta tensão.

Segundo Smyrak *et al.* (2011) afirmam que por um lado, utiliza-se condutores tradicionais de aço e alumínio, com suas inúmeras fraquezas, e por outro lado, soluções de *design* de última geração que empregam ligas de alumínio autoportantes, altamente condutoras, termicamente e reologicamente resistentes. Uma composição apropriada desses elementos, bem como a tecnologia de fabricação e produção de ligas (fundição, laminação e trefilação), criam oportunidades potenciais para a obtenção de fios e condutores com propriedades de aplicação exigidas pela engenharia de energia elétrica.

Neste sentido, esta pesquisa visa desenvolver e analisar ligas de alumínio secundário, proveniente do reciclo de latas de alumínio. Especificamente, produziu-se uma liga à base de alumínio secundário e, adicionou-se elementos de liga que possibilitem as melhores propriedades de condução de corrente elétrica à liga formada pelo processo de fundição por gravidade. E ao final, por meio do processo de laminação à frio, obteve-se uma fita condutora de corrente elétrica que possa ser aplicada como fita para interconexão elétrica de células solares na montagem de módulos fotovoltaicos.

5.3.2. Fundamentação teórica

Para atender aos objetivos desta pesquisa, é essencial realizar aprofundamentos teóricos que abordem os fundamentos dos processos de fundição, bem como, tratamento térmico, laminação à frio e propriedades de condução de corrente elétrica de ligas à base de alumínio.

Fundição por gravidade

Para Polmear *et al.* (2017) o processo de fundição envolve a fusão do metal, o vazamento em um molde e a solidificação do fundido em uma microestrutura adequada para atender os requisitos de desempenho dos componentes fundidos. Segundo Campbell (2004a) a turbulência é provavelmente a variável mais difícil de ser controlada em sistemas de vazamento por gravidade. Além da velocidade do vazamento, a geometria do molde tem significativa relevância, considerando a cavidade de entrada, canal de escoamento e escapamento dos gases, bem como a temperatura e rugosidade da superfície do molde. De acordo com Hsu *et al.* (2009), para se ter um alto desempenho no processo de fundição, depende-se de um projeto de canal preciso que deve direcionar o fluxo sem deixar espaços vazios ou lacunas na geometria do canal durante o processo de fundição.

Uma geometria de canal que segue precisamente o perfil da corrente de metal líquido, fornecendo alguma restrição positiva em todos os pontos, é a chave para o preenchimento eficiente da cavidade do molde. Uma consequência da turbulência, de acordo com Campbell (2015) é a porosidade nas peças vazadas, que podem ser causadas por bolhas de ar arrastadas durante o escoamento turbulento, assim como, inclusões de óxidos gerados pelo arrastamento da superfície. Para Campbell (2004b) o elevado grau de porosidade causa deformações no fundido, resultando em problemas de encolhimento, que podem ser localizados na superfície do fundido, como também, em locais internos da liga formada.

De acordo com Lin *et al.* (2019) a variável mais importante no processo de fundição é o coeficiente de transferência de calor interfacial (IHTC). Este determina as condições de resfriamento do fundido e o processo de solidificação, além de induzir a formação da microestrutura do grão, bem como, o estabelecimento das propriedades mecânicas das peças fundidas. O controle do coeficiente IHTC, também deve ser aplicado ao molde metálico. A temperatura nos diferentes pontos da interface do molde deve ser controlada, de forma que, a transferência de calor entre a superfície do molde e o fundido escoado deverão ser homogêneos. Para Humphreys *et al.* (2013) a dinâmica do fluido também tem contribuição significativa, considerando algumas variáveis como velocidade e direção de escoamento do fundido, que podem afetar o processo de solidificação, causando turbulência, acúmulo de gases e porosidade ao fundido, quando solidificado.

Durante o processo de resfriamento e solidificação do fundido, ocorrem variações no fluxo de calor no fundido ao entrar em contato com a superfície do molde. Segundo Broucuret *et al.* (2001) ocorre a influência de dois parâmetros neste processo, a temperatura inicial e a estrutura de revestimento na superfície do molde. Quanto mais condutivo o revestimento e menor a temperatura inicial do molde, maior a transferência de calor e maiores as tensões térmicas. Tais parâmetros implicam na formação de estruturas com propriedades distintas. Os grãos formados na estrutura do lingote apresentarão diferentes tamanhos, dependendo das taxas de extração de calor e gradientes térmicos no tempo de solidificação.

Spinelli *et al.* (2012) afirmam que, embora possam existir gradientes uniformes de temperatura no metal e no molde, a junção entre as duas superfícies cria uma queda de temperatura, que depende das propriedades termofísicas dos materiais em contato, da geometria da fundição e do molde, da rugosidade superficial de contato com o molde, da presença de meios intersticiais gasosos e não gasosos, pressão de contato e temperatura inicial do molde. Desta forma, a microestrutura da liga apresenta-se heterogênea, com a formação de segregações em estruturas dendríticas com grandes variações na sua composição química, teor de soluto aumentando progressivamente da superfície para o centro, assim como a presença de partículas de segunda fase, que se formam preferencialmente nos contornos das dendritas. Para estabilizar a microestrutura heterogênea, aplica-se métodos de homogeneização para reduzir a segregação e dissolver as partículas de segunda fase (Karabay, 2006).

Homogeneização

O processo de homogeneização tem como objetivo reduzir as segregações da estrutura heterogênea dos lingotes fundidos das ligas de alumínio. Para Zolotorevsky *et al.* (2007) o aquecimento do material próximo a temperatura do ponto de fusão da liga promove a redistribuição dos elementos dentro da estrutura da liga e minimiza a microsegregação, resultando em um tratamento de condicionamento da microestrutura, visando o aumento da trabalhabilidade da liga. Entretanto, têm surgido métodos que permitem determinar quantitativamente o grau de microsegregação e as taxas de dissolução e de homogeneização. Desta forma, quanto mais grosseira a estrutura dendrítica, maior a segregação e mais difícil a homogeneização, uma vez que as distâncias, que devem ser vencidas pela difusão dos átomos, tornam-se mais longas.

Segundo Kumar *et al.* (2020) durante o resfriamento lento, que se segue ao tratamento térmico de homogeneização, ocorre reprecipitação de partículas de segunda fase, mas esta ocorre de maneira mais dispersa, não localizada, e de modo muito significativo no interior das dendritas, e não nos contornos como anteriormente. Além disso, a vantagem intrínseca do tratamento de homogeneização é permitir a esferoidização das partículas quase insolúveis que contêm ferro, a qual é tanto maior quanto maior for a solubilidade e a taxa de difusão dos elementos contidos nas partículas. De acordo com Liu *et al.* (2009) ao aumentar a temperatura de homogeneização ou prolongar o tempo de espera, as fases residuais são dissolvidas na matriz gradualmente, os limites dos grãos se tornam escassos e todos os elementos se tornam mais homogeneizados. Para Callister e Rethwisch (2013) o processo de homogeneização é considerado um processo de preparação para posteriores processos de conformação mecânica como a laminação à frio.

Laminação à frio

Para Mišović *et al.* (2016) a laminação à frio é um dos processos de conformação mecânica plana que tem por objetivo modelar um metal com a geometria pretendida. Porém, é um processo que ataca as estruturas cristalinas dos grãos, resultando em defeitos cristalinos no material deformado. De acordo com Wang *et al.* (2019) o arranjo e a distribuição destes defeitos dependem de alguns fatores como: a energia de defeito de empilhamento (EDE), a presença de átomos de soluto, temperatura e velocidade de deformação. Uma parcela de energia utilizada para a deformação é armazenada no material na forma de defeitos puntiformes e discordâncias. A capacidade de um metal se deformar plasticamente, depende diretamente da mobilidade de suas discordâncias. Porém, durante a movimentação dessas discordâncias, presentes no retículo cristalino do metal, dois eventos podem ocorrer para atrapalhar esse movimento, à medida que a deformação plástica vai ocorrendo. O primeiro evento é a interseção dessas discordâncias com outros obstáculos, como: contornos de grão, precipitados e até mesmo outras discordâncias. E o segundo evento é o aumento na densidade do número de discordâncias durante o processo de deformação plástica (Callister e Rethwisch, 2013).

Recozimento

Após passarem pelo processo de fundição e conformação mecânica, as ligas de alumínio podem apresentar tensões desenvolvidas ao longo destes processos. Para Kumar *et al.* (2020) o

tratamento de recozimento reduz estas tensões, bem como a dureza e melhora a ductilidade do material fundido. Para Engler (2014) o recozimento serve para restaurar as propriedades do material submetido ao processo de deformação à frio e anular os efeitos de tratamentos térmicos anteriores. Segundo Wang *et al.* (2015), o recozimento é subdividido em dois processos: recuperação e recristalização. Ambos implicam em crescimento de grão. O grau da temperatura pode ser variável entre 200 °C e 280 °C, dependendo da redução aplicada pelo processo de laminação à frio.

De acordo com Tajally e Huda (2011), o processo de recuperação depende do tipo de material, temperatura de recozimento, grau e a velocidade da deformação submetida. Consiste na restauração parcial das propriedades do material deformado, devido à formação de estruturas de defeitos mais estáveis aos observados no material no estado encruado. Segundo Engler e Aegerter (2014) acontecem durante o processo de recozimento: recuperação estática – após a etapa de conformação mecânica; e recuperação dinâmica – durante a deformação plástica. Ao longo do processo de recuperação, a energia armazenada é diminuída pela movimentação das discordâncias. Ocorre por meio de dois processos principais: a aniquilação e rearranjo de discordâncias. Os estágios da recuperação estão ilustrados na Figura 1.

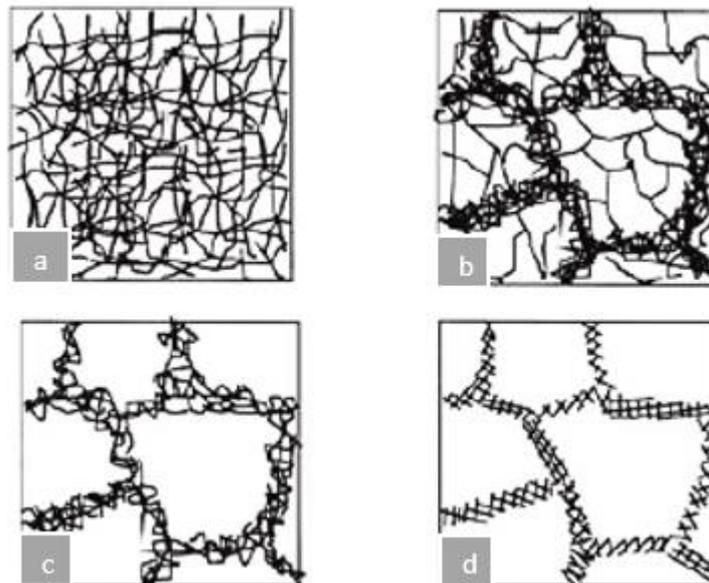


Figura 1: Representação das etapas da recuperação de um metal deformado. a. Emaranhado de discordâncias. b. Formação de células. c. Aniquilação de discordâncias. d. Formação de subgrãos. Fonte: Adaptado de Humphreys e Hatherly (2012).

Para Kumar *et al.* (2020) a recristalização é responsável pela restauração das propriedades mecânicas do material (ductilidade e tenacidade à fratura) por meio da formação de novos grãos menores, equiaxiais e de concentração de defeitos cristalinos inferiores aos do estado encruado. É subdividido em duas etapas: a nucleação dos primeiros grãos dentro do material encruado e o crescimento destes até a formação de uma microestrutura de grãos isentos de deformação (Wang, Z. *et al.*, 2015).

Encruamento

Para ter uma boa conformabilidade, o metal precisa ser capaz de resistir a deformação. Neste sentido, segundo Nurcheshmeh e Green (2011) utiliza-se dois coeficientes para medir a capacidade de resistência à deformação: o Coeficiente de encruamento n e o coeficiente de anisotropia R de *Lankford*. O valor de n determina a habilidade do material de ser estirado, assim como o aumento de tensão para cada incremento de deformação. Quanto menor o valor de n , mais duro será o material e maior a resistência a estiramento (Ciemiorek *et al.*, 2017).

A anisotropia controla a habilidade do material ser repuxado dentro do corpo com fundo plano. A propriedade anisotrópica ocorre por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após uma deformação mecânica ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregações ou alinhamento de uma segunda fase precipitada (Lucchetta *et al.*, 2019). Na maioria dos casos de conformação, existe uma tendência de os grãos terem certos planos cristalográficos ou direções, claramente alinhadas com a direção da primeira conformação (Ghosh *et al.*, 2015). Como consequência, alguns sistemas são orientados, o que permite uma facilidade na deformação em algumas direções em detrimento de outras. Para Engler (2015) esta condição, cria a anisotropia plástica, em que as propriedades na direção de laminação, são diferentes das transversais, de tal modo que a curva tensão-deformação e propriedades como: tensão de escoamento, força de tração e taxa de encruamento, sejam afetadas por esta orientação dos cristais (Frodal *et al.*, 2019).

Propriedades de condução de corrente elétrica

A condutividade elétrica indica a facilidade com que um material é capaz de conduzir corrente, depende da microestrutura do metal, sendo muito sensível à concentração de defeitos pontiformes como átomos de soluto em solução sólida. Quanto maior a quantidade de barreiras, menor será a condutividade elétrica do material, ou seja, o nível de pureza do alumínio é

inversamente proporcional ao percentual de átomos de soluto em solução sólida (Kaschnitz *et al.*, 2014).

Para Karabay (2006) a diminuição do grau de pureza do alumínio é ocasionada pela presença de impurezas como Ti, Cr, Zr, Fe, Zn e V, ou pela adição de elementos de liga. Estes possibilitam que um maior percentual de átomos de soluto se encontre em solução sólida, causando assim, a diminuição nos valores de condutividade elétrica. Karabay (2008) propõe a adição de 3 % de AlB_2 na fase de fundição, de forma a provocar a precipitação dos elementos de transição Cr, V, Fe, Zn, Ti e Zr e com isso, reduzir o tempo de forno para obter alta condutividade.

A técnica de inoculação de elementos de transição por adição de AlB_2 e AlB_{12} para diminuir o efeito prejudicial das impurezas sobre a condutividade do alumínio aplicada por Karabay e Uzman (2005), Karabay (2006) e Karabay (2008) foi aperfeiçoada pelos estudos realizados por Setzer e Boone (1992) e Fjellstedt *et al.* (1999) mostrando-se eficiente com resultados expressivos no aumento da pureza do alumínio, bem como no aumento da condutividade dos condutores fabricados. Segundo Karabay (2008) em ligas Al – Mg – Si (série 6xxx), quanto menor o teor de Mg e Si, melhores serão as propriedades de condutividade de corrente elétrica e menor a resistência. Além disso, com a adição de AlB_2 ocorrem a formação de compostos como TiB_2 , ZrB_2 , CrB_2 e VB_2 que são precipitados como finos diboretos no material condutor.

5.3.3 Materiais e métodos

Foram utilizados nesta pesquisa, alumínio secundário (latas de bebidas), alumínio comercial (liga 6063 T6), cobre secundário (cabos elétricos) e magnésio primário 99,98 %. Utilizou-se os elementos Cu e Mg com o propósito de verificar o grau de condutividade elétrica das ligas formadas, tendo Al como base. Para realizar a fusão dos materiais, foi utilizado o processo de fundição por gravidade. A liga fundida foi escoada em molde de aço (coquilha) produzida especificamente para o experimento para formar os corpos de prova. O lingote formado foi submetido ao processo de homogeneização com o propósito de reduzir as microsegregações da estrutura condicionando a microestrutura para ocorrer uma melhor trabalhabilidade da liga. Os corpos de prova homogeneizados foram submetidos ao processo de laminação à frio com o objetivo de alcançar a espessura de 0,5 mm proposta. Foram realizados recozimentos intermediários, entre os passes de laminação, para recuperação e recristalização

da liga de forma a aliviar o “*stress*” mecânico e tensões sofridas pelo material após cada passe de laminação acumulada. A Figura 2 ilustra a metodologia utilizada pela pesquisa.

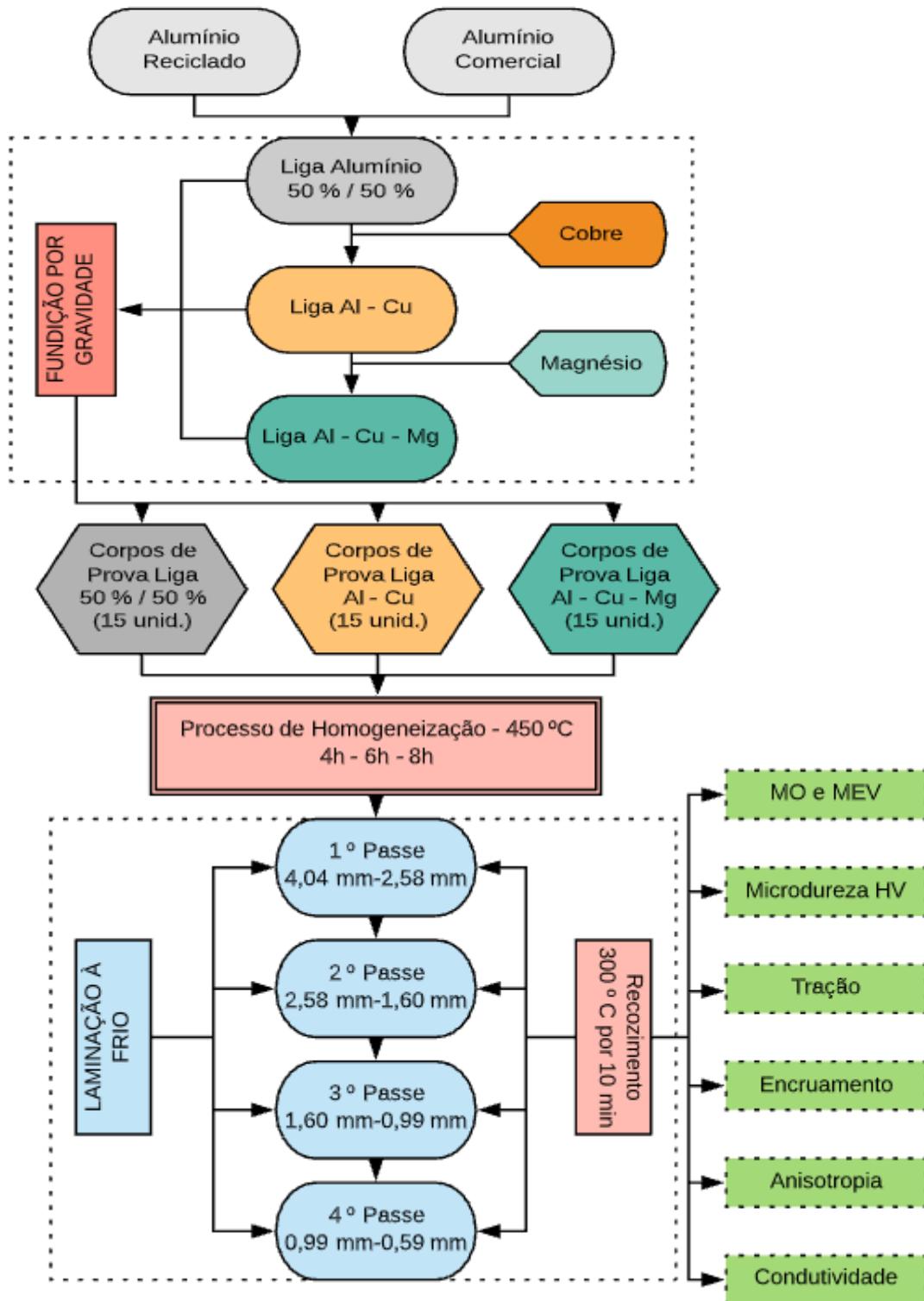


Figura 2: Fluxograma da metodologia da pesquisa realizada na etapa experimental.

Na Figura 2, encontram-se as etapas da metodologia com maior detalhamento, sendo que a cor Cinza representa as ligas de Al (Al reciclado e Al comercial). Já na cor laranja representa-se as ligas contendo Cu (Al – Cu), a cor verde escura representa as ligas contendo Mg (Al – Cu – Mg). A cor vermelha representa o processo de fundição e parâmetros utilizados neste estudo. Na estrutura de cor rosa os parâmetros utilizados nos processos de Homogeneização e Recozimento. A cor azul clara representa o processo de laminação e parâmetros adotados. A cor verde clara representa os ensaios físico-químicos realizados.

Processo de fundição por gravidade

Para o processo de fundição por gravidade foi utilizado um forno do tipo “Poço” indutivo. O pré-aquecimento do forno ocorreu até alcançar a temperatura de 650 °C, onde colocou-se os metais a serem fundidos. A mistura inicial, deu-se por meio de lingotes formados em um processo de fundição anterior, que utilizou em sua formação, 50 % de alumínio oriundo de latas de bebidas e 50 % de alumínio comercial (liga 6063 T6), de acordo com (Holzschuh *et al.*, 2020). A Tabela 1 apresenta a sequência de adições dos elementos de liga ao processo de fundição.

Tabela 1: Sequência de fundição e formação da liga Al - Cu - Mg.

1° Lote de amostras (A)
Lingote 50 % de latas de alumínio / 50 % alumínio comercial
2° Lote de amostras (B)
Lingote de alumínio - amostra (A) + 6 % Cu
3° Lote de amostras (C)
Lingote de alumínio - amostra (B) + 8 % Mg

Em cada lote de amostras foram formados corpos de prova em triplicata para a realização dos subseqüentes ensaios. O escoamento do fundido deu-se em uma coquilha confeccionada com uma chapa de aço SAE 1045, com 300 mm de comprimento e 100 mm de largura. Os três canais foram dimensionados com 2 mm; 3 mm e 4 mm de profundidade. Para a saída e escape dos gases, foram realizados pequenos cortes oblíquos nas laterais da coquilha e interligados aos corpos de prova e, cortes verticais na base dos corpos de prova para saída direcional dos gases ao fundo dos três canais, conforme ilustra a Figura 3.

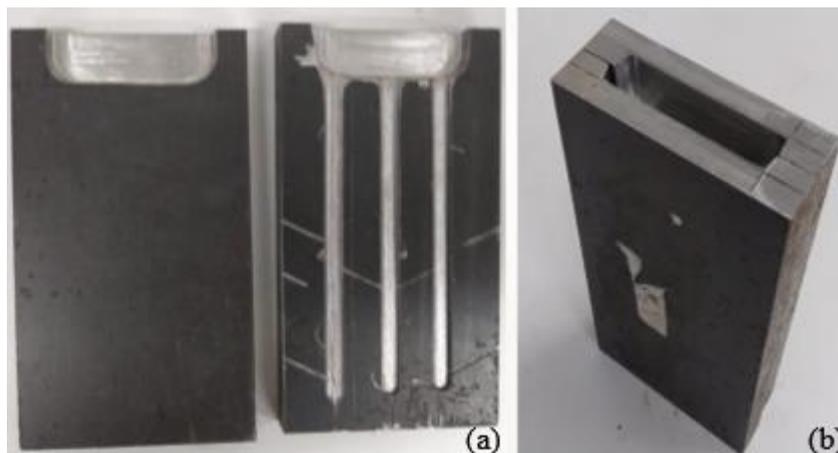


Figura 3: Vistas da coquilha. (a) Coquilha particionada com os canais de escoamento em detalhe. (b) Vista superior da coquilha montada para receber o fundido.

Na parte superior das duas peças da coquilha, foi realizada uma cavidade para evitar o derramamento do fundido, quando do seu escoamento, de forma a direcionar o material para os canais principais. Nesta cavidade, formou-se um corpo de prova retangular, após o resfriamento do material. Este corpo de prova, foi utilizado como amostra para a realização de análise química, micrografia, tração e dureza para validação da mistura e verificação das propriedades em cada etapa do experimento.

Para ocorrer um escoamento homogêneo do fundido na coquilha, de forma que não houvesse um resfriamento acelerado do fundido, a coquilha foi aquecida em forno resistivo tipo “mufla”, mantendo-a constante em temperatura de 450 °C, sendo retirada do forno para o escoamento dos corpos de prova e após, novamente inserida no forno para retornar a temperatura prevista para o escoamento seguinte. Devido a adição de magnésio, foi utilizado injeção de gás argônio sobre a superfície do banho para controlar o magnésio, que é altamente solúvel quando em contato com oxigênio (Achyuth *et al.*, 2019).

Preparação e tratamento térmico das amostras

Com base em Pedersen *et al.* (2015) as amostras foram submetidas ao processo de homogeneização visando a redistribuição dos elementos dentro da estrutura da liga e minimizar a microsegregação, resultando em um tratamento de condicionamento da microestrutura, de forma a obter um aumento da trabalhabilidade da liga. Em seguida, foi aplicado o processo de laminação com o objetivo de reduzir a espessura do material, para alcançar uma espessura de 0,5 mm. Com base em Engler (2014) após cada passe de laminação, foi realizado um processo

de recozimento com o objetivo de recuperar as propriedades do material deformado, eliminando as discordâncias e posterior recristalização por meio da formação de novos grãos menores, equiaxiais e de concentração de defeitos cristalinos inferiores aos do estado encruado.

Homogeneização

Para monitorar a evolução das fases intermetálicas, no crescimento anormal dos grãos, as amostras foram submetidas ao processo de homogeneização por 8 horas a uma temperatura de 450 °C. O resfriamento foi realizado dentro do próprio forno por 24 horas e retirados com equilíbrio térmico em temperatura ambiente. Após 4 horas, 6 horas e 8 horas de realização do processo, foram retiradas amostras para análise, e sobre estas, foram realizadas micrografias, conforme apresentadas na Figura 5.

Recozimento

Após a deformação à frio, os corpos de prova foram submetidos ao processo de recozimento que, além de recuperar a estrutura cristalina do metal, tem por objetivo diminuir a resistência mecânica do material e aumentar a sua ductilidade. Segundo Mankins (2004) durante o recozimento, ocorrem respectivamente o processo de recuperação, recristalização e crescimento de grão. Para Sauvage *et al.* (2015), há a ocorrência paralela de fenômenos como, a eliminação parcial de discordâncias que se deve à movimentação dos defeitos lineares pelos mecanismos de escorregamento e de salto, podendo possibilitar o encontro de discordâncias de sinais opostos que se anulam. Nesse processo a energia interna é reduzida em parte, ainda pequena, e as tensões internas são aliviadas de forma substancial facilitando os processos de laminação seguintes. Com base em Tajally *et al.* (2010) as amostras foram inseridas no forno mufla por 10 minutos a uma temperatura de 300 °C após a estabilização do forno. Após 10 minutos, as amostras foram retiradas do forno e resfriadas a temperatura ambiente. O processo foi repetido, após cada passe no processo de laminação à frio, até alcançar a espessura final de 0,5 mm.

Laminação à frio

Após a homogeneização, os corpos de prova foram submetidos ao processo de laminação à frio com o objetivo de reduzir a espessura final a 0,5 mm. A redução aplicada ao corpo de prova em cada passe foi de 38 %, onde as espessuras iniciais eram de 4 mm. Os corpos

de prova, após cada passagem no laminador, foram submetidos ao processo de recozimento para recristalizar e recuperar as propriedades mecânicas, aliviando o estresse e tensões sofridas no processo de laminação. Foi utilizado um laminador de bancada com capacidade de redução de 10 x. capaz de receber materiais com espessura de até 5 mm e a espessura de saída mínima de 0,5 mm. O laminador possui quatro rotas de passe, com aproximadamente 40 % de redução em cada passe.

Com base na medida inicial das amostras (4 mm) e na capacidade de redução de 40 % em cada passe de laminação e na espessura final (alvo 0,5mm), realizou-se 4 passes. As medidas da espessura após cada passe foram registradas e avaliadas estatisticamente.

Preparação metalográfica

As amostras foram cortadas no sentido da laminação. Para o lixamento foram utilizadas granas (SiC) *mesh* 220, 400 e 600. Para o polimento inicial das amostras, utilizou-se pasta diamante 4,0 µm e lubrificante etilenoglicol por 20 min. No polimento intermediário, utilizou-se como abrasivo 5,0 mg de MgO em pó diluídos em 30 mL de água destilada por 3 min. Para revelar a microestrutura utilizou-se ataque eletroquímico com uma solução de 5,4 % de ácido fluorídrico em 94,6 % de água destilada e corrente de 1,5 A e uma tensão de 20 V por 3 minutos em temperatura ambiente. O equipamento utilizado foi uma fonte quente de corrente contínua e um agitador magnético. A solução foi mantida em agitação e utilizou-se como cátodo um disco de alumínio padrão como referência.

Análise química

Após cada lote de amostras obtidas na sequência experimental, apresentada na Tabela 2, foram retiradas amostras segundo a norma ASTM E 716 – 98, para realizar a análise química e identificar a composição resultante da mistura proposta no experimento. Esta análise foi realizada por meio da técnica de espectroscopia de emissão óptica, realizada por um espectrômetro óptico, conforme norma ASTM E 1251 – 99.

Análises microestrutural

As amostras obtidas nas diversas espessuras foram caracterizadas via microscopia ótica com luz polarizada. A caracterização microestrutural das amostras, nas diversas espessuras, foi realizada utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura com detectores de elétrons

secundários (SEM/EDS). A espectroscopia dispersiva foi utilizada para determinar a presença de fases secundárias e medir a composição dos grãos em diferentes posições. A fração volumétrica das fases secundárias no limite dos grãos, foram avaliadas utilizando imagens SEM/EDX.

Ensaio de microdureza Vickers

Após a preparação metalográfica, foram realizadas medidas de microdureza com carga de 0,5 kg por 15 s, conforme Sauvage *et al.* (2015). Foram realizadas medições aleatórias ao longo da superfície da amostra em cada ensaio, de forma que, o valor final resultou na média obtida pelo número de testes aplicados.

Ensaio de Tração

Para os ensaios de tração, foram coletadas três amostras de secção retangular em cada uma das seguintes direções: 0 °, 45 ° e 90 °, nas diferentes espessuras do material, com o sentido de laminação como referencial. Para o acabamento da amostra, utilizou-se uma serra fita vertical, fresa e uma lima para o acabamento final. Para a verificação da espessura, utilizou-se um micrômetro Mitutoyo. Como medida de alongamento, utilizou-se um extensômetro de 25 mm. Na máquina de ensaio (modelo KM – Kratos), foi utilizada célula de carga de 200 kg. Os testes seguiram a norma ASTM B 557 – 02.

Determinação dos coeficientes de encruamento e de anisotropia

Utilizou-se o teste uniaxial de tensão para verificar as propriedades de encruamento, com base no gráfico tensão versus deformação. De acordo com Ghosh *et al.* (2015) para a determinação dos coeficientes de encruamento n e R de *Lankford*, foram retiradas amostras dos materiais nas direções 0 °, 45 ° e 90 ° no sentido de laminação. Foi utilizado um paquímetro digital e um micrômetro digital com ponta esférica para realizar as medições de espessura e largura dos corpos de prova antes e depois de cada passe de laminação. O cálculo do valor de n foi realizado conforme a norma ASTM E646-00 (*Standart Test Method for Tensile Strain-Hardening Expoents (n-Values) of Metallic Sheet Materials*). A obtenção dos coeficientes de anisotropia normal e planar foram realizados por meio de ensaios de tração, segundo a norma ASTM E517-00 (*Standart Test Methods for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal*).

Ensaio de condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi medida com auxílio de um condutivímetro digital de contato, modelo DC-9. A calibração do condutivímetro foi realizada com um padrão de alumínio (em 58,2 IACS a 20 °C). As medidas dadas são porcentagens da condutividade do cobre recozido de acordo com o padrão da *International Annealed Copper Standard (IACS)*. Assim, um material com 58,2 IACS corresponde a 58,2 % da condutividade do cobre padrão. Para cada liga formada, constante na Tabela 2, foram utilizados três corpos de prova e, em cada amostra foram realizadas cinco medições. Para o resultado da condutividade foi considerado a média das três amostras com cinco medições e para o grau de dispersão dos dados em relação à média, foi aplicado o desvio padrão.

5.3.4 Resultados

No processo experimental, as amostras foram definidas em 3 lotes de amostras de acordo com a Tabela 1. De acordo com a análise química apresentada na Tabela 2, observa-se que os percentuais de Al reduziram proporcionalmente em relação a adição de Cu e Mg. A amostra (A) foi considerada como base, e nesta adicionou-se 6 % de Cu para formar a amostra B. Como o Cu possui ponto de fusão mais elevado (1083 °C) em relação ao Al, elevou-se a temperatura de fundição de 650 °C para 780 °C, o que justifica a diferença da redução de Al (10,04 %), quando do acréscimo de 7,896 % de Cu, sendo então, 2,15 % de Al dissolvido. Observa-se que houve uma contaminação com Zn quando da formação do lote (B), o que ocorreu por consequência da troca do cadinho rompido com a possível contaminação de Zn.

Tabela 2: Análise química das ligas (A), (B) e (C) à base de Al.

Amostra	Al %	Mg %	Mn %	Fe %	Cu %	Si %	Zn %	Cr %	Ti %
(A)	98,20	0,787	0,305	0,283	0,101	0,242	0,028	0,020	0,000
(B)	88,16	0,631	0,338	0,383	7,896	0,631	1,848	0,013	0,025
(C)	82,79	6,775	0,368	0,379	7,000	0,564	1,960	0,012	0,025

Para a formação das amostras (C), apenas adicionou-se 8 % de Mg sobre o fundido da etapa anterior. Nesta etapa, voltou-se a temperatura inicial de 650 °C, já que o Mg tem facilidade de fusão pelo processo de difusão. Assim, o percentual de redução do Al (5,37 %) foi equivalente a proporção de Mg (6,775 %) adicionada.

O Cu ficou 1 % acima do percentual estabelecido. Por outro lado, o Mg ficou 1,225 % abaixo do percentual planejado para o experimento. O magnésio possui alta afinidade com o oxigênio no estado fundido e, diferentemente de outros metais, não forma uma película protetora estável na superfície dos fundidos, conforme Hort *et al.* (2016), mesmo com a utilização de atmosfera controlada em argônio, ocorreu a dissolução do Mg, explicando a sua redução percentual conforme apresentado na análise química da Tabela 2.

Microscopia óptica (MO)

Para caracterizar a microestrutura das ligas (A), (B) e (C), formadas pelo processo de fundição por gravidade, foi realizado uma análise de microscopia óptica, na Figura 4 (A), (B) e (C), onde observa-se uma estrutura eutética exibindo segregação dendrítica severa, consistindo em duas fases intermetálicas.

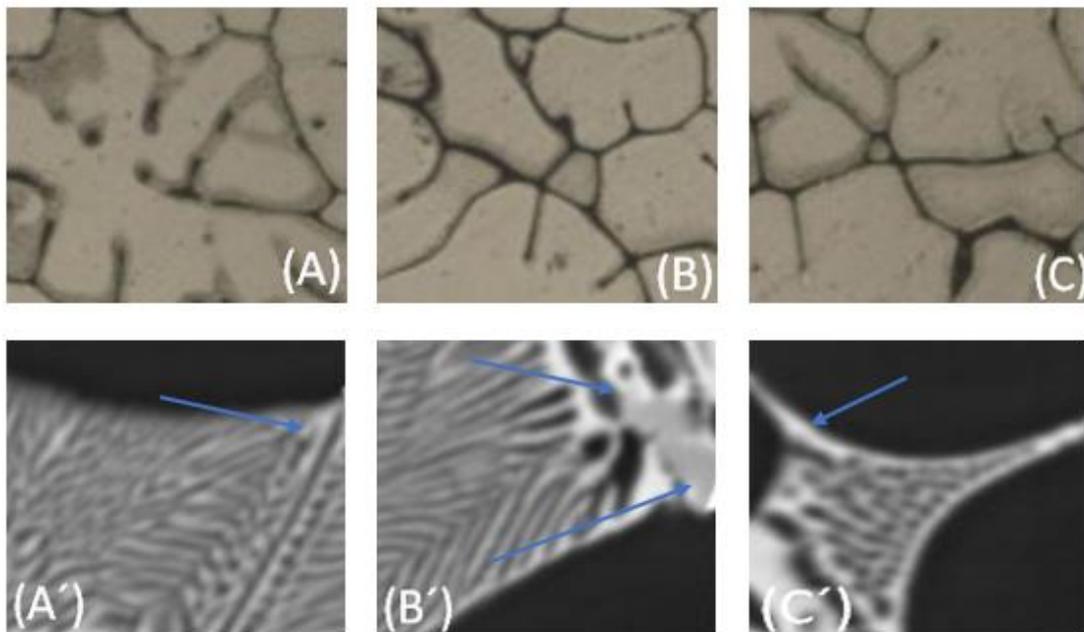


Figura 4: Microscopia óptica e WDS das amostras antes da laminação. Figura 4 (A), (B) e (C) apresenta análise de microscopia óptica a 100 μm . Figura 4 (A'), (B') e (C') apresenta as análises quantitativas da WDS.

As análises quantitativas da WDS, Figura 4 (A'), (B') e (C'), apresentam uma composição química da fase intermetálica branca entre 18,72 - 21,01 % atômico Cu, 24,20 - 27,71 % atômico Mg, 3,48 - 4,01 % atômico Zn e o saldo em Al estando próxima da fase S (Al_2CuMg) porém, com teor de Cu abaixo da fase S. Da mesma forma, a fase intermetálica cinza apresenta-se entre 24,11 - 26,72 % atômico Cu, 3,91 - 4,24 % atômico Mg, 0,60 - 0,66

% atômico Zn e o saldo em Al estando próxima à fase θ (Al_2Cu) porém, o teor de Cu é inferior ao da fase θ . Além disso, a fase intermetálica branca dissolve pequenas quantidades de Zn e a fase intermetálica cinza dissolve pequenas quantidades de Mg. Resultados semelhantes foram apresentados por (Deng *et al.*, 2012).

Homogeneização

A microestrutura após a homogeneização está representada pela Figura 5. Observa-se que a microestrutura das amostras apresentou evolução dos intermetálicos durante o processo de homogeneização. Grandes fases intermetálicas sem equilíbrio se distribuem ao longo dos limites dos grãos após o tratamento a 450 °C após as primeiras 4 h de homogeneização, representadas pelas Figuras 5 (A), (B) e (C) a 100 μm .

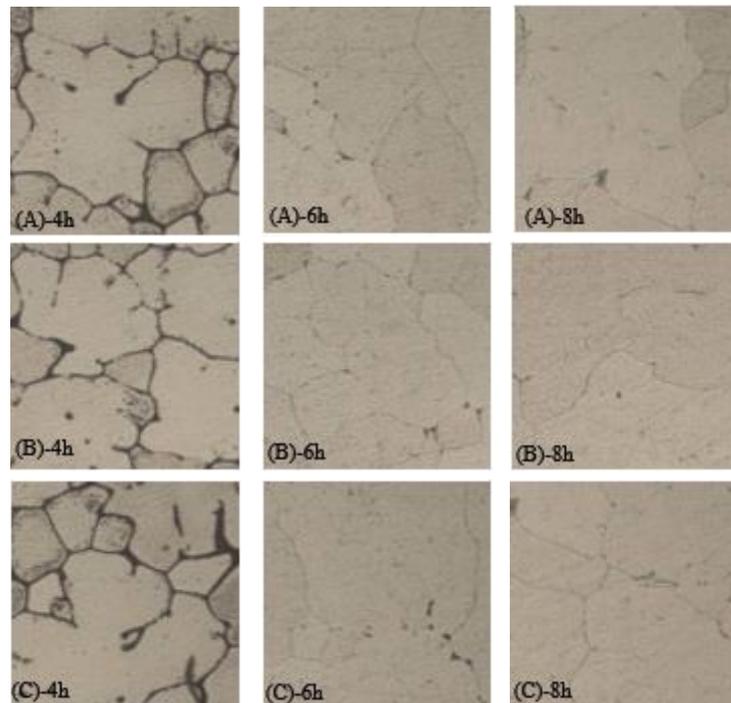


Figura 5: Microestrutura após o processo de homogeneização das amostras (A), (B) e (C) retiradas em 4 h, 6 h e 8 h a 100 μm .

A fração volumétrica das fases residuais e da estrutura da rede dendrítica é significativamente reduzida após a segunda e terceira etapas de homogeneização. Ao mesmo tempo, os limites dos grãos tornam-se mais finos. Pode-se observar que não há alteração distinta da microestrutura na análise óptica prolongando o tempo de homogeneização do terceiro passo, e o fenômeno de queima excessiva não foi observado.

Processo de Laminação

Com os corpos de prova homogeneizados, realizou-se o processo de laminação. Os dados obtidos pelos seus respectivos valores médios de entrada e de saída do processo, assim como seu desvio padrão e redução do percentual da espessura ao final de cada passe de laminação, estão registrados na Tabela 3.

Tabela 3: Registro da média das medidas após cada passe de laminação.

Ordem de laminação	Espessura de entrada	Espessura de saída	Desvio Padrão	Redução (%)
1º Passe	4,04 mm	2,58 mm	0,081 mm	36,10%
2º Passe	2,58 mm	1,60 mm	0,077 mm	38,00%
3º Passe	1,60 mm	0,99 mm	0,080 mm	38,10%
4º Passe	0,99 mm	0,59 mm	0,075 mm	40,40%

A redução da espessura ocorreu de forma regular dentro do mesmo grupo de amostras. Os corpos de prova do grupo (A) suportaram melhor a redução de cada passe apresentando deformações lineares na direção de laminação e poucas fraturas nos corpos de prova. Porém, os corpos de prova dos grupos (B) e (C), apresentaram curvaturas em direções transversais em algumas amostras, revelando fraturas, inclusive rupturas completas. Este comportamento está relacionado a agressividade percentual do passe (40 %), podendo estar relacionada ao nível de dureza da liga, quando da adição de Cu e Mg, assim como o aumento da resistência mecânica e redução da ductibilidade. Para reduzir estes efeitos, foi aplicado o processo de recozimento após cada passe de laminação.

Recozimento

Como o propósito da laminação foi o de reduzir as espessuras dos corpos de prova de 4 mm para 0,5 mm, aplicou-se o tratamento térmico de recozimento, onde ocorrem os processos de recuperação e recristalização. Estes, tem por objetivo restaurar as propriedades mecânicas, aliviar as tensões, reduzir a energia armazenada pela movimentação das discordâncias, além de reorganizar os cristais da estrutura do material. A Figura 6 apresenta a microscopia óptica de luz polarizada com aumento de 50 vezes.

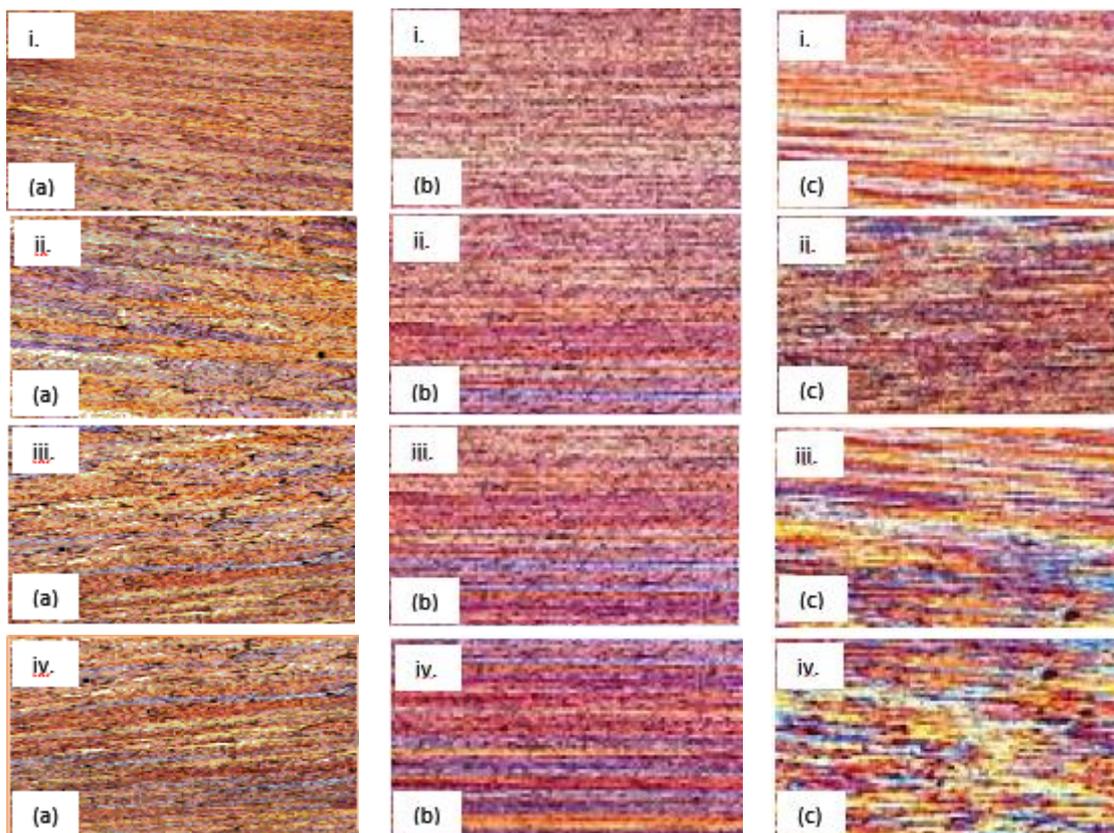


Figura 6: Microscopia óptica de luz polarizada na direção de laminação ao longo do processo de recozimento. As letras (a), (b) e (c) representam as amostras e i., ii., iii. e iv. representam a sequência de recozimentos após cada passe de laminação.

A micrografia óptica de luz polarizada indica uma estrutura de grãos de contornos alongados na direção de laminação. Os precipitados presentes no material explicam a não linearidade dos contornos, promovendo o seu encurtamento e, com isso, dificultando a migração destes durante a recristalização. Essa morfologia indica que a taxa de crescimento de grãos recristalizados é maior na direção de laminação do que na direção transversal, possivelmente devido ao alinhamento das partículas de segunda fase na direção de laminação.

As cores relacionadas à orientação espacial ou cristalográfica de cada grão, apresentam-se pouco definidas para alguns grãos, indicando possíveis regiões com subgrãos que ainda não migraram durante a recristalização, sendo responsáveis pelos defeitos das cores. Estes fenômenos ocorrem devido a recristalizações parciais, pois espera-se com uma recristalização concluída, uma estrutura de grãos equiaxiais e de contornos bem definidos. Estruturas similares de grãos foram encontrados por Goloborodko *et al.* (2004).

Desta forma, possivelmente ocorreram deformações nos corpos de prova nas amostras (B) e (C) durante o processo de laminação devido ao fato de ainda haverem defeitos cristalinos

não eliminados completamente pelo processo de recuperação e recristalização, indicando haver uma necessidade de tempos superiores a 10 minutos de recozimento, definidos pela metodologia.

Microdureza Vickers (HV)

Os ensaios de microdureza *Vickers* foram aplicados após a realização de cada passe de laminação e respectivo tratamento térmico de recozimento. Seu objetivo foi o de avaliar o nível de encruamento e respectivo efeito do processo de recozimento sobre as amostras laminadas. Na Tabela 4, o primeiro valor de microdureza encontrado para as amostras (A, B e C), representa a média de cada amostra antes da laminação, apenas fundido e homogeneizado. Os valores seguintes, representam a média da microdureza das amostras após cada etapa de laminação e posterior recozimento. E ao final do 4º passe de laminação e recozimento, foram representadas a média geral e desvio padrão dos materiais analisados na pesquisa.

Tabela 4: Evolução da microdureza em relação ao percentual de redução no processo de laminação.

Ordem de laminação	Espessura	Redução (%)	Microdureza - HV		
			Amostra A	Amostra B	Amostra C
Fundido	4,04 mm	0,00%	68	72	78
1º Passe	2,58 mm	36,14%	84	90	97
2º Passe	1,60 mm	60,40%	106	112	122
3º Passe	0,99 mm	75,50%	132	140	152
4º Passe	0,59 mm	85,40%	166	175	190

Observa-se que ao longo do processo de laminação à frio, e consequente aumento de encruamento das amostras, a microdureza aumentou de forma gradual e linear, à medida que a espessura foi reduzida. Ao analisar as médias gerais das três amostras, verificou-se que: a adição de Cu (B) sobre a base de alumínio (A), elevou a microdureza em 6,07 %, assim como a adição de Cu e Mg (C) em relação à base de alumínio (A), elevou a microdureza em 14,9 %. Quando comparado a adição de Mg sobre a liga Al + Cu (B), a microdureza foi elevada em 8,39 %. Ao final do 4º Passe de laminação, ocorreram os maiores resultados de microdureza das amostras. Nesta condição, as amostras (C) apresentaram a microdureza 190,34 HV, representando 8,28 % em relação à média das máximas de (B) e 14,65 % e média das máximas de (A).

Relacionou-se o comportamento das amostras ao longo do processo de deformação ao eficiente processo de recristalização realizado nas amostras antes de cada deformação aplicada. Esta característica, também é notada no gráfico apresentado na Figura 7 para ratificar as afirmações com relação a microdureza *Vickers*.

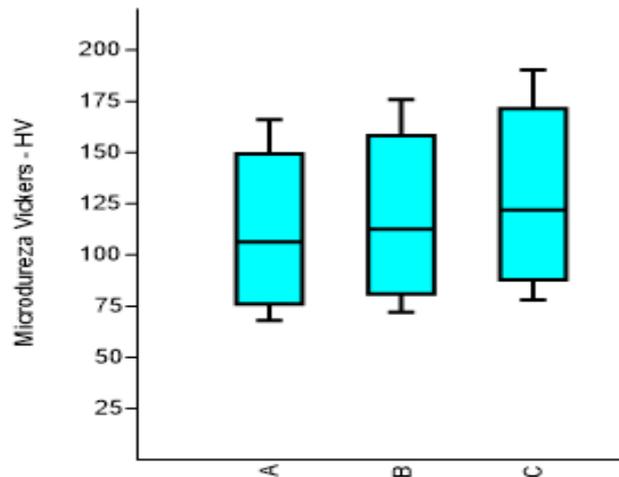


Figura 7: Gráfico apresentando a simetria e dispersão das amostras ao longo do processo de laminação à frio.

Nas três amostras, claramente se verifica que a microdureza aumenta na medida em que ocorre uma redução da espessura pelo processo de laminação. Para ratificar os dados da Tabela 4, analisou-se o coeficiente de correlação Spearman, que é um coeficiente não-paramétrico, devido a amostra ser pequena, seguindo as recomendações de (Callegari-Jacques, 2006). O resultado confirmou a linearidade das amostras com coeficiente de correlação Spearman, onde o valor encontrado (-1), indica uma perfeita relação linear negativa. Da mesma forma, o coeficiente de correlação Spearman = 1, indica uma perfeita relação linear positiva, com ($p < 0,05$) e todas as amostras significativas. Para corroborar com estes resultados, aplicou-se a prova não paramétrica de Kruskal-Wallis, onde novamente $p = 0,011 < 0,05$, indicando que não há diferenças significativas entre as medianas das amostras A, B e C.

Ensaio de Tração

A realização dos ensaios de tração visou obter informações sobre as propriedades mecânicas dos corpos de prova após a deformação sofrida. A Figura 8 apresenta os ensaios de tração no sentido da laminação com as variações de 0° , 45° e 90° .

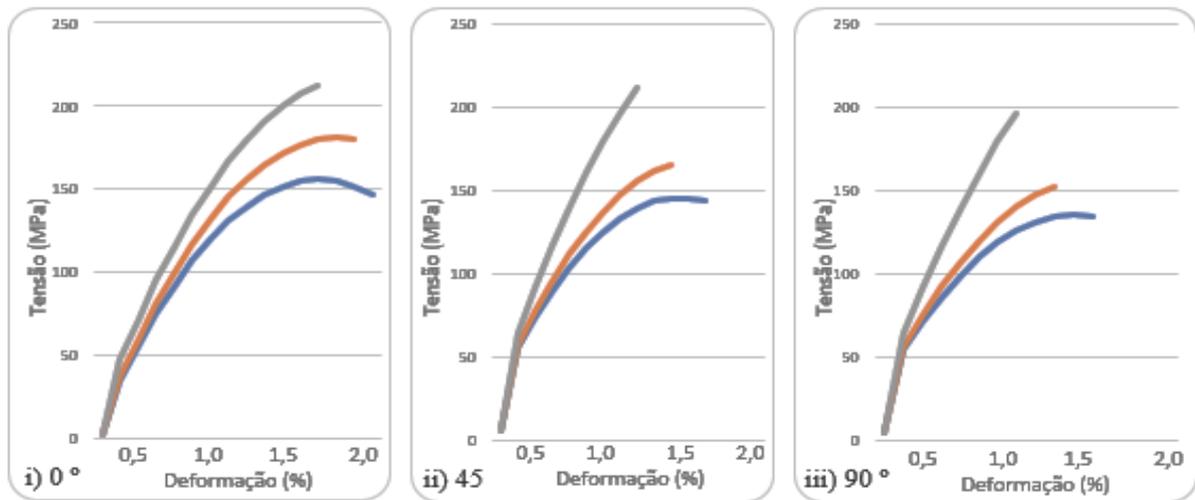


Figura 8: Curvas de tensão-deformação após cada passe de laminação. i) 0° no sentido da laminação, ii) 45° no sentido da laminação, iii) 90° no sentido da laminação. (A) – Cor Azul, (B) – Cor Laranja e (C) – Cor Cinza.

Observa-se que com o aumento da deformação à frio no material, os limites de escoamento e resistência diminuem, destacando-se como curvas típicas de materiais frágeis. O comportamento das amostras (C), em relação a 0°, 45° e 90°, demonstrou limites de resistência à tração superiores em relação as amostras (A) e (B). Por outro lado, estas romperam-se com 1,25 % de deformação a 0°, e 1 % em 45° e 90°, sendo que as amostras (A) romperam-se em 1,7 % a 0° e 1,65 % a 45° e 90°; e as amostras (B) romperam-se em 1,5 % a 0° e 1,25 % em 45° e 90°. Desta forma, atribui-se a ruptura precoce das amostras (C) e (B) ao acréscimo de Cu e Mg sobre a base de alumínio (A) e valores mais elevados em termos de dureza, conforme Tabela 4.

A Figura 8, demonstra uma região plástica muito pequena, rupturas precoces a baixas deformações, características de materiais significativamente frágeis. Neste aspecto, justifica-se as deformações apresentadas pelos corpos de prova ao longo do processo de laminação, onde percebeu-se fraturas nas bordas dos corpos de prova na forma de rachaduras e trincas em seu interior. Além disso, a deformação causada pelo processo de laminação, 85,4 % da espessura final em relação a inicial, resultou em um alongamento do grão no sentido da laminação, conforme microscopia óptica na Figura 6, que introduziu arranjos de discordâncias no material que acarretam tais rupturas, não permitindo a continuidade da deformação e aumentando a energia de defeito de empilhamento (EDE) conforme Wang *et al.* (2019). Para corroborar com estes argumentos, realizou-se uma análise do nível de encruamento e anisotropia do material.

Coeficientes de encruamento e de anisotropia

Os ensaios de tração, além de produzirem valores para os limites de escoamento, limites de resistência à tração, e alongamentos percentuais, foram fundamentais para a obtenção do nível de encruamento n e índices de anisotropia R , \bar{R} e ΔR representados pela Tabela 5.

Tabela 5: Valores do expoente de encruamento n e o índice de anisotropia R , \bar{R} e ΔR nas respectivas direções de laminação.

Material	Posição	Amostra A	Amostra B	Amostra C
R	R ₀	0,778	0,784	0,791
	R ₄₅	0,767	0,771	0,776
	R ₉₀	0,748	0,753	0,759
Desvio Padrão		0,015	0,016	0,016
\bar{R}	-	0,765	0,770	0,776
ΔR	-	-0,004	-0,003	-0,001
n	R ₀	0,216	0,204	0,199
	R ₄₅	0,193	0,172	0,158
	R ₉₀	0,123	0,112	0,109
Desvio Padrão		0,048	0,047	0,045
n média		0,177	0,163	0,155

Considerando o nível de encruamento médio (n média) de cada uma das amostras, a média resultante das três amostras, apresentou-se na faixa de 0,165, com desvio padrão em torno de 0,0465 indicando um alto nível de encruamento ao final da laminação. Isto reflete em uma baixa ductibilidade do material, também podendo ser percebida ao se observar a Figura 8, onde pode-se constatar que as amostras possuem uma região plástica com pequenos alongamentos, apresentando também, limite de escoamento e o limite de resistência à tração muito próximos, ocorrendo inclusive, este último, muito próximo ao valor de estricção do material. Esta característica fica mais exposta nas amostras (B) e (C), demonstrando uma fragilidade severa destas amostras.

Além disso, destaca-se também, a necessidade elevada na aplicação de força ao material para que ocorra o escoamento e respectiva deformação do material, refletindo em pequenas deformações na ordem de 1,0 % a 1,7 %, significando que o material apresenta uma região plástica muito restrita, ocorrendo escoamentos próximos a ruptura do material.

No entanto, o índice de anisotropia normal resultou em valores relativamente altos, em um patamar de 0,78, indicando uma tendência do material em não resistir a deformação aplicada pelo processo de laminação. Já os valores negativos da anisotropia planar (ΔR) indicam facilidade do material, apresentar a formação de orelhamento (dobras) no sentido de 45 ° da laminação, não ocorrendo nos sentidos 0 ° e 90 °.

Condutividade elétrica

A primeira análise de condutividade elétrica foi realizada com os corpos de prova homogeneizados, que teve como objetivo, a redução de precipitados, assim como a solução sólida de elementos contendo Fe e Mn, que propiciam a redução da condutividade elétrica. Esta etapa, preliminar ao processo de laminação, apresentou as medições mais elevadas de condutividade elétrica em relação às amostras, posteriormente laminadas. Com a aplicação de quatro passes de laminação, ocorreu uma redução de condutividade elétrica, como apresentado na Figura 9.

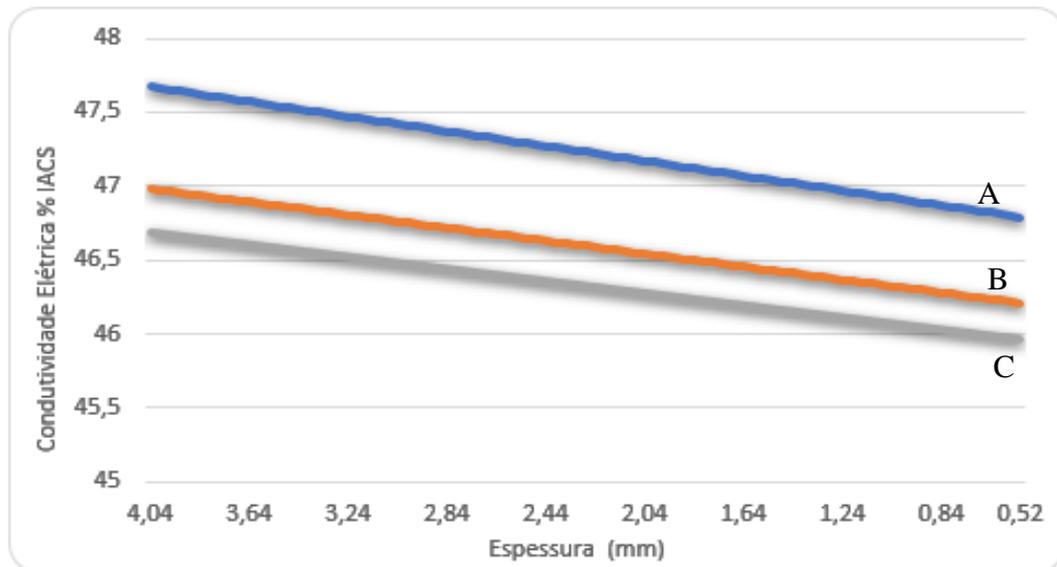


Figura 9: Condutividade elétrica das amostras em IACS.

No entanto, a redução da condutividade elétrica não seguiu a mesma proporção aplicada a espessura, onde a espessura foi reduzida em 85,4 % e a condutividade elétrica reduziu em 1,825 % (A), 1,620 % (B) e 1,525 % nas amostras (C). Esperava-se um percentual de redução da condutividade mais elevado, pois o processo de laminação à frio, tem como tendência, aumentar a quantidade de discordâncias, que por sua vez, implicam na diminuição da

ductibilidade do material, aumento da dureza e consequente redução da condutividade do material.

Para reduzir estes efeitos agressivos da laminação sobre os corpos de prova, o tratamento térmico de recozimento foi aplicado com o propósito de conter estes efeitos da laminação, propiciando uma restauração das propriedades do material, o que ratifica, a baixa redução percentual resultante da condutividade elétrica, sendo considerada eficiente e fundamental nos resultados da condutividade elétrica obtida. No entanto, os testes de soldabilidade das fitas nas células solares não foi eficiente, sendo necessário o uso de materiais específicos que agreguem propriedades de solda à liga formada.

5.3.5 Conclusão

O processo de fundição por gravidade, mostrou-se eficiente ao longo do experimento. O escoamento do fundido na coquilha ocorreu conforme o esperado, embora o canal com espessura 2 mm, não tenha permitido que o líquido alcançasse o extremo do canal devido à baixa espessura e rugosidades da superfície de escoamento da coquilha, ocorrendo a solidificação do fundido sem alcançar a extremidade do molde. Já os canais de 3 mm e 4 mm, permitiram o escoamento até o final do curso do canal. Relacionou-se o sucesso do escoamento à temperatura da coquilha que foi aquecida à 450 °C e retirada do forno quando do escoamento.

Os resultados da análise química demonstraram que ocorreu contaminação da mistura na segunda etapa do experimento, quando formada a mistura da amostra (B). O elemento Zn, foi detectado na análise química com um percentual em massa/volume de 1,848 %, sendo que não estava previsto no experimento, podendo ter ocorrido sua inserção na mistura, quando da troca do cadinho que rompeu por outro utilizado em experimentos anteriores. Além disso, esperava-se obter um percentual de 8 % de Mg. Atribui-se o percentual de 6,775 % detectado pela análise química ao processo de dissolução ocorrido quando do contato do Mg com o oxigênio, constante na atmosfera de fundição do forno, mesmo com o controle da atmosfera com argônio.

A microscopia óptica realizada nos corpos de prova, obtidos pelo processo de fundição, detectou duas fases intermetálicas, δ (Al_2CuMg) e θ (Al_2Cu) pela análise quantitativa de comprimento de onda WDS, além de apontar dissoluções de Zn e Mg. Estes resultados foram considerados para a aplicação do processo de homogeneização, onde verificou-se uma redução

da fase volumétrica, incluindo as fases intermetálicas, além de indicar a redução na rede dendrítica e formação de limites de grãos mais finos.

O processo de laminação demonstrou-se agressivo com relação aos parâmetros de redução, onde a redução de 38 % foi considerada excessiva para um único passe. Percebeu-se fraturas nos corpos de prova, bem como rupturas completas, causando a inutilização de alguns corpos de prova. No entanto, cumpriu com o objetivo da espessura alvo, que foi proposto em alcançar 0,5 mm. As amostras do grupo (A), suportaram com mais facilidade os sucessivos passes de laminação, em comparação com as amostras dos grupos (B) e (C), que romperam e apresentaram fraturas diversas. Desta forma, conclui-se que os elementos Cu e Mg, assim como a contaminação ocorrida com Zn, foram os elementos que favoreceram a ocorrências destes defeitos causados pelo processo de laminação. Embora tenha-se realizado o processo de recozimento ao final de cada passe de laminação, foram verificados defeitos cristalinos não eliminados completamente, demonstrando ser necessário, um aumento no tempo de recozimento para concluir o processo.

Os efeitos da deformação aplicada pelo processo de laminação, foram avaliados por meio de testes de microdureza *Vickers*, ensaios de tração e análises dos coeficientes de encruamento e anisotropia. Da análise de microdureza *Vickers*, constatou-se que as amostras produzidas se tornaram frágeis, com pouca ductibilidade, apresentando uma região plástica pequena, ocorrendo estrição logo após o ponto de limite de resistências à tração. A microdureza apresentou máximas para as amostras (C), 190,34 HV ao final do 4 ° passe de laminação. A adição de Cu sobre a liga à base de alumínio, implicou em um aumento de 6,07 %, e sobre liga Al - Cu, a adição de Mg (C) aumentou em 8,28 % comparado com a liga Al - Cu (B), assim como 14,65 % sobre a liga à base de Al (A). Estes resultados foram ratificados pela análise estatística.

Os ensaios de tração, também avaliaram o processo de laminação em três direções: 0 °, 45 ° e 90 °. Estes indicaram a direção de 0 ° na direção de laminação com regiões plásticas superiores aos ângulos de 45 ° e 90 °. No entanto, as amostras na direção de 90 ° apresentaram uma capacidade menor de sofrer deformações em relação aos resultados dos ângulos de 0 ° e 45 °. De uma forma geral, o nível médio 0,165 do encruamento, que está próximo de 0, e a anisotropia normal \bar{R} em 0,77, próximo de 1, indicam a tendência de o material apresentar pouca resistência em sofrer deformações, podendo sofrer estrição muito próximas do limite de

resistência à tração. A anisotropia planar ΔR negativa indica a tendência de formação de orelhas e dobras na direção 45 °.

A análise da condutividade elétrica foi considerada satisfatória, pois esperava-se um efeito de maior impacto na queda da condutividade, devido aos resultados obtidos pelo ensaio de tração e dureza e, conseqüente aumento de discordâncias nos contornos dos grãos. As amostras antes da laminação, apresentaram condutividade elétrica entre 46,75 e 47,75 IACS. No entanto, após a aplicação de 85,4 % de redução da espessura, a queda ocorreu em apenas 1,825 %, o que se considerou um resultado muito bom, pois esperava-se que este percentual seria maior que 5 %. Atribui-se este resultado ao processo de recozimento realizado após a aplicação de cada passe de laminação.

Conclui-se que o resultado obtido pela pesquisa foi satisfatório em relação ao objetivo que, foi o de obter uma fita condutora de corrente elétrica, com espessura de 0,59 mm, a ser aplicada como fita para interconexão elétrica de células solares na montagem de módulos fotovoltaicos, onde a espessura da fita comercial, segundo o fabricante Neocap PV, apresenta uma espessura entre 0,1 a 0,4 mm. No entanto, os testes de soldabilidade das fitas nas células solares não foi eficiente, sendo necessário o uso de materiais específicos que melhorem as condições de solda da liga formada.

Para pesquisas futuras, recomenda-se utilizar apenas alumínio reciclado e utilizar como referência, ligas da série 6xxx, como a liga 6101, utilizadas na fabricação de condutores elétricos e cabos aéreos em redes elétricas (Karabay and Taysi, 2004; Karabay and Uzman, 2005; Karabay *et al.*, 2005; Karabay, 2006; 2008; Karabay *et al.*, 2013; Karabay and Feyzullahoğlu, 2014). Além disso, utilizar refinadores como AlB_2 para eliminar intermetálicos que reduzem a condutividade elétrica, assim como realizar o processo de laminação com reduções menos agressivas em cada passe, de forma a evitar o encruamento excessivo, e demais efeitos citados nesta pesquisa.

Recomenda-se também, outras aplicações na montagem dos módulos fotovoltaicos como a moldura do módulo, assim como na estrutura de suporte e apoio no conjunto de painéis solares.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto à pesquisa, destaca-se a abrangência multidisciplinar em que abordou-se temas relacionados em áreas como: Engenharia Mecânica por meio da investigação de processos de fundição e conformação mecânica; Engenharia de Materiais realizando análise e formação de ligas de diversos metais; Engenharia Ambiental no que tange a aspectos de reciclagem e reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos e seu incentivo ao uso de materiais secundários e assim, propondo reduções de extração de minério da crosta terrestre e, Engenharia Química mediante a análise química, metalográfica, microscópica, ensaios de microdureza, anisotropia, encruamento, força de impacto e condutividade elétrica.

Quanto aos objetivos da pesquisa, pretendeu-se demonstrar as lacunas de investigação e pesquisas futuras, identificados tanto, em relação a fundamentação teórica, métodos e técnicas experimentais relacionadas à metodologia, bem como, no que tange aos resultados encontrados e suas diversas possibilidades relacionadas a novas aplicações.

Considerando que existem diversas possibilidades de aplicações para os resíduos de alumínio, em específico de latas de bebidas, precisa-se ampliar as pesquisas de forma a encontrar novas soluções de reciclagem e assim, aumentar o número de aplicações, além das existentes atualmente. Observou-se nesta pesquisa, que existem possibilidades de investigação no campo da reciclagem e seus respectivos processos. Novas técnicas, bem como automatização dos processos de reciclagem, podem oferecer diversos ganhos em eficiência, rendimento, assim como, em processos posteriores, como o da fundição.

Os métodos e técnicas de fundição também demonstram potencial de investigação, em relação a otimização e parametrização da temperatura e uso adequado do forno, bem como, no uso de fluxo escorificante para otimizar o rendimento do metal secundário fundido. Da mesma forma, a escória também deve ser investigada, pois além de ser considerada poluente, contaminante e tóxica ao meio ambiente, quando do descarte, podem haver espaços na exploração de reuso e reprocesso deste material na extração de novos subprodutos com aplicações também relevantes no campo científico.

Ressaltam-se também, os métodos de escoamento do fundido, bem como, os tipos de moldes a serem utilizados. Estes, interferem no processo de solidificação, formação da microestrutura do grão e propriedades mecânicas do metal fundido. Neste campo, o conhecimento e controle dos parâmetros como: velocidade e direção de escoamento, transferência de calor interfacial, difusão, turbulência, fluidez entre outras, tornam-se

fundamentais para a formação esperada do fundido e assim, evitar posteriores processos de restauração ou recuperação de propriedades, o que impactará em termo de tempo e na elevação dos custos do processo de fundição.

No campo das ligas de alumínio, dentre as diversas possibilidades de combinações de metais para a formação de ligas distintas, ressalta-se que, para a formação de ligas que possibilitem as melhores propriedades de condutividade elétrica, deve-se procurar direcionar o alumínio reciclado para a formação de ligas da série 6xxx. Para isto, recomenda-se a utilização de refinadores para reduzir as impurezas e eliminar as discordâncias e defeitos nos contornos dos grãos, de forma que o percentual de alumínio obtenha valores, os mais elevados possíveis e, por outro lado, os demais elementos, sejam os menores possíveis, em valores percentuais de massa. Para isso, deve-se realizar um profundo controle dos processos e acompanhamentos físico-químicos para verificar a evolução das propriedades e melhor conduzir os processos.

Os resultados de condutividade elétrica desta pesquisa registraram valores de 47 IACS. Recomenda-se que, para pesquisas futuras, utilize-se apenas alumínio reciclado e, sobre este, otimize os processos de fundição, por meio da utilização de fluxo escorificante, o que proporcionará, melhor rendimento em massa do alumínio obtido pela fundição de latas de bebidas. Em um segundo momento, fazer uso de refinadores como AIB₂ de forma a aumentar o grau de pureza do alumínio secundário fundido, de forma a alcançar 99 % em massa de alumínio na composição química. Além disso, para o processo de laminação, recomenda-se aplicar o processo de forma menos agressiva, com reduções máximas de 10 % em cada passe. Também, manter os processos de recozimento entre passes, aumentando o tempo de recozimento de 10 minutos para 20 minutos em temperaturas de 300 °C. E por fim, visar como meta, superar os 55 IACS de condutividade elétrica. Para melhorar as propriedades de soldagem da fita, analisar materiais específicos que possibilitem melhores condições de solda da liga formada.

Com relação aos efeitos agressivos do processo de encruamento por laminação, recomenda-se analisar processos de redução da espessura da fita como: injeção, extrusão e trefilação, bem como, impressão 3D em alumínio.

Para pesquisas futuras, recomenda-se utilizar apenas alumínio reciclado e utilizar como referência, ligas da série 6xxx, como a liga 6101, utilizadas na fabricação de condutores elétricos e cabos aéreos em redes elétricas (Karabay and Taysi, 2004; Karabay and Uzman, 2005; Karabay *et al.*, 2005; Karabay, 2006; 2008; Karabay *et al.*, 2013; Karabay and Feyzullahoğlu, 2014).

7. REFERÊNCIAS

- ABAL, 2018. Alumínio: Processos de Produção. **Reciclagem**. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/reciclagem> Acessado em: 04/09/2019.
- ABAL, A. B. D. A. 2017. **Reciclagem no Brasil**. Disponível em: <http://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/reciclagem-no-brasil/> Acessado em: 03/02/2018.
- ABDEL-SHAFY, H. I., MANSOUR, M. S. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian journal of petroleum**, 27, n. 4, p. 1275-1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- ABDULKADIR A, AJAYI A, HASSAN MI. (2015). Evaluating the chemical composition and the molar heat capacities of a white aluminum dross. **Energy Procedia**. v. 75: p. 2099-20105. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.326>
- ACHYUTH, K., PATEL, M., SANGRAL, S., JAYAPRAKASH, M. (2019). Fretting wear degradation behavior of Al-Si-Ni based cast Aluminum alloy under different environment. **Materials Today: Proceedings**, v. 15, p. 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.031>
- ALLISON, J, Li, M, WOLVERTON, C, SU, X. (2006). Virtual aluminum castings: An industrial application of ICME. **JOM**. v.58(11), p.28-35. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0224-4>
- ASHTARI, P. TETLEY-GERARD, K. SADAYAPPAN, K. (2012). Removal of iron from recycled aluminium alloys. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 51, n. 1, p. 75-80. <https://doi.org/10.1179/1879139511Y.0000000026>
- ASSOCIATION, A. (1984). **Aluminum: properties and physical metallurgy**. ASM international. ISBN: 1615031693.
- AUTRY, CHAD W., WHIPPLE, JUDITH M., BELL, JOHN E., MOLLENKOPF, DIANE A., STOLZE, HANNAH J (2013). Natural resource scarcity and the closed-loop supply chain: a resource-advantage view. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-03-2012-0092>
- BASAK, C. B., HARI BABU, N. (2016). Morphological changes and segregation of β -Al₉Fe₂Si₂ phase: A perspective from better recyclability of cast Al-Si alloys. **Materials & Design**, v. 108, p. 277-288. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.096>
- BDEIR, L. M. H., ALSAFFAR, K. A. (2008). Recycling of aluminum beverage cans. **Journal of Engineering and Sustainable Development**, v. 12, n. 3, p. 157-163. Disponível em: <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aid=10274> Acessado em: 24/05/2020.

BERNON, M., ROSSI, S., CULLEN, J. (2011). Retail reverse logistics: a call and grounding framework for research. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**.

<https://doi.org/10.1108/09600031111138835>

BODUNRIN, M. O., ALANEME, K. K., CHOWN, L. H. (2015). Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. **Journal of materials research and technology**, v. 4, n. 4, p. 434-445.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.05.003>

BROMMER, T., OLIVETTI, E., GIHLENGEN, B. E., RIDDERVOLD, H. O., ØYEN, G., KIRCHAIN, R. (2011). Increased recycled aluminum content during remelting by incorporating compositional uncertainty. **EPD Congress 2011 - TMS 2011 Annual Meeting and Exhibition**, San Diego, CA. p. 939-946.

<https://doi.org/10.1002/9781118495285.ch103>

BROUCARET, S., MICHRAFY, A., DOUR, G. (2001). Heat transfer and thermo-mechanical stresses in a gravity casting die: Influence of process parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 110, n. 2, p. 211-217.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00881-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00881-5)

BRUNISHOLZ, M. J. (2020). Instantâneo dos mercados fotovoltaicos globais. Disponível em: <http://www.iea-pvps.org>. Acessado em: 20/05/2020.

CALLEGARI-JACQUES, S.D. (2006). **Bioestatística. Princípios e Aplicações**. Porto Alegre - Brasil: Artimed.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. (2013). **Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Edition: Ninth Edition**. John Wiley and Sons, Incorporated. ISBN 9781118476543. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=TmxbAgAAQBAJ>

CALLON, M, COURTIAL, J.P, LAVILLE, F. (1991). Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. **Scientometrics**. v. 22(1), p. 155-205.

<http://dx.doi.org/10.1007/bf02019280>

CAMPBELL, J. (2004a). Rule 2 - Avoid turbulent entrainment (the critical velocity requirement). In: CAMPBELL, J. (Ed.). **Castings Practice**. Oxford: Butterworth-Heinemann, p. 9-101. ISBN 978-0-7506-4791-5.

<https://doi.org/10.1016/B978-075064791-5/50003-7>

CAMPBELL, J. (2004b). Rule 6 - Avoid shrinkage damage. In: CAMPBELL, J. (Ed.). **Castings Practice**. Oxford: Butterworth-Heinemann, p. 120-156. ISBN 978-0-7506-4791-5.

<https://doi.org/10.1016/B978-075064791-5/50007-4>

CAMPBELL, J. (2015). Chapter 7 - Porosity. In: CAMPBELL, J. (Ed.). **Complete Casting Handbook (Second Edition)**. Boston: Butterworth-Heinemann, p. 341-415. ISBN 978-0-444-63509-9.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63509-9.00007-8>

CANALES, A.A, CARRERA, E, SILVA, J.T, VALTIERRA, S, COLÁS, R. (2012). Mechanical properties in as-cast and heat treated Al-Si-Cu alloys. **Int. J. Microstruct. Mater. Prop.** v. 7(4), p. 281-300.

<https://doi.org/10.1504/IJMMP.2012.048518>

CAPUZZI, S., TIMELLI, G. (2018). Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. **Metals**, v. 8, n. 4, p. 24.

<https://doi.org/10.3390/met8040249>

CARRERA, E, GONZÁLEZ, A, VÁZQUEZ, JL, COLÁS, R, VALTIERRA, S. (2012a). Influence of quenching rate on residual stresses in aluminum casting engine blocks, **70th World Foundry Congress, WFC 2012**. Monterrey, p. 314-317.

<https://www.researchgate.net/publication/287076568>

CARRERA, E, RODRÍGUEZ, A, TALAMANTES-SILVA, J, GLORIA, D, VALTIERRA, S, COLÁS, R. (2012b). Study of residual stresses in complex aluminium castings. **Int. J. Cast Metals Res.** v. 25(5), p. 264-269.

<https://doi.org/10.1179/1743133612Y.0000000028>

CHIRITA, G, STEFANESCU, I, SOARES, D, CRUZ, D, SILVA, FS. (2008). Centrifugal casting features/metallurgical characterization of aluminum alloys, **9th International Conference on Multiscale and Functionally Graded Materials, FGMIX**. American Institute of Physics Inc., Oahu Island, HI, p. 598-603.

<https://doi.org/10.1063/1.2896847>

CHIRITA, G, STEFANESCU, I, SOARES, DF, SILVA, FS. (2010). On the ability of producing FGMs with an AlSi12 aluminium alloy by using centrifugal casting. **Int J Mater Prod Technol.** v. 39(1/2), p. 30-43.

<https://dx.doi.org/10.1504/IJMPT.2010.034258>

CIEMIOREK, M., CHROMINSKI, W., OLEJNIK, L., LEWANDOWSKA, M. (2017). Evaluation of mechanical properties and anisotropy of ultra-fine grained 1050 aluminum sheets produced by incremental ECAP. **Materials & Design**, v. 130, p. 392-402.

<https://doi.org/10.3390/met8040249>

COBO, M, LÓPEZ-HERRERA, A.G, HERRERA-VIEDMA, E, HERRERA, F. (2012). SciMAT: A new science mapping analysis software tool. **Journal of the American Society for Information Science and Technology.** v. 63, p. 1609–1630.

<https://doi.org/10.1002/asi.22688>

COBO, M.J, CHICLANA, F, COLLOP, A, de ONA, J, HERRERA-VIEDMA, E. (2013). A bibliometric analysis of the intelligent transportation systems research based on science mapping. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**. v. 15(2), p. 901-908.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2284756>

COBO, M.J, JÜRGENS, B, HERRERO-SOLANA, V, MARTÍNEZ, MA, HERRERA-VIEDMA, E. (2018). Industry 4.0: a perspective based on bibliometric analysis. **Procedia Computer Science**. V. 139, p. 364-371.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.278>

COBO, M.J, LÓPEZ-HERRERA, A.G, HERRERA-VIEDMA, E, HERRERA, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**. v. 62(7), p. 1382-1402.
<https://doi.org/10.1002/asi.21525>

CORDEIRO, L. D. N. P.; MASUERO, Â. B.; DAL MOLIN, D. C. C. (2014). Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA) através da técnica de Refinamento de Rietveld. **Revista Matéria**, v. 19 N. 02.
<http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762014000200009>

CUI, X. L., WU, Y. Y., ZHANG, G. J., LIU, Y. B., LIU, X. F. (2017). Study on the improvement of electrical conductivity and mechanical properties of loim alloying electrical aluminum alloys. **Composites Part B-Engineering**. v. 110: p. 381-7.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.042>

CULLEN, J.M, ALLWOOD, J.M. (2013). Mapping the global flow of aluminum: from liquid aluminum to end-use goods. **Environ Sci Technol**. v. 47(7), p. 3057-3064.
<https://doi.org/10.1021/es304256s>

DAGWA, I. M., ADAMA, K. K., (2018). Property evaluation of pumice particulate-reinforcement in recycled beverage cans for Al-MMCs manufacture. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 30, n. 1, p. 61-67.
<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.12.006>

DAS D.K, MISHRA P.C, SINGH S, PATTANAIAK S. (2014). Fabrication and heat treatment of ceramic-reinforced aluminium matrix composites-a review. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**. v. 9(1): p. 6.
<https://doi.org/10.1186/s40712-014-0006-7>

DAVID, E., KOPAC, J. (2012). Hydrolysis of aluminum dross material to achieve zero hazardous waste. **Journal of hazardous materials**, v. 209, p. 501-509.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.064>

DAVIS, J. R. (2001). Alloying: Understanding the Basics. **ASM International**. ISBN 978-0-87170-744-4. Disponível em:
<https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACFAAA3.pdf>

DENG, Y., YIN, Z., CONG, F. (2012). Intermetallic phase evolution of 7050 aluminum alloy during homogenization. **Intermetallics**, v. 26, p. 114-121.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.03.006>

DESHMUKH P, PESHWE D, BHATT J, PATHAK S. (2011). Synthesis and Characterization of Al-Mg-SiO₂ Particulate Composite Using Amorphous SiO₂ from Rice Husk Ash. **Transactions of the Indian Institute of Metals**. v. 64 (6): p. 575-581.
<https://doi.org/10.1007/s12666-011-0083-8>

DING, N., GAO, F., WANG, Z., GONG, X. (2012). Environment impact analysis of primary aluminum and recycled aluminum. **Procedia Engineering**, v. 27, p. 465-474.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.475>

DONATO, H, DONATO, M. (2019). Stages for Undertaking a Systematic Review. **Acta Med Port**. v. 32(3), p. 227-235.
<https://doi.org/10.20344/amp.11923>

DYBA, T, DINGSOYR, T, HANSSSEN, GK. (2007). Applying systematic reviews to diverse study types: An experience report, First International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM 2007). **IEEE**, p. 225-234.
<https://doi.org/10.1109/ESEM.2007.59>

ENGLER, O. (2014). Texture and anisotropy in the Al-Mg alloy AA 5005 - Part I: Texture evolution during rolling and recrystallization. **Materials Science and Engineering A**, v. 618, p. 654-662.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.037>

ENGLER, O. (2015). Texture and anisotropy in cold rolled and recovery annealed AA 5182 sheets. **Materials Science and Technology** (United Kingdom), v. 31, n. 9, p. 1058-1065.
<https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000671>

ENGLER, O.; AEGERTER, J. (2014). Texture and anisotropy in the Al-Mg alloy AA 5005 - Part II: Correlation of texture and anisotropic properties. **Materials Science and Engineering A**, v. 618, p. 663-671.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.040>

FARJANA, S. H.; HUDA, N.; MAHMUD, M. A. P. (2019). Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment. **Science of The Total Environment**, v. 663, p. 958-970.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.400>

FERNANDES, L.; SABINO, M.; ROSSETTO, H. (2014). Method of extration of silica from rice hull. **Cerâmica**, v. 60, n. 353, p. 160-163.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132014000100022>

FJELLSTEDT, J.; JARFORS, A. E.; SVENDSEN, L. (1999). Experimental analysis of the intermediary phases AlB_2 , AlB_{12} and TiB_2 in the Al–B and Al–Ti–B systems. **Journal of alloys and compounds**, v. 283, n. 1-2, p. 192-197.

[https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00892-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00892-5)

FRAGA, Y. S. B.; DA SILVA RÊGO, J. H.; CAPUZZO, V. M. S. (2020). Ultrasonication Effect of Silica Fume on Compressive Strength of Cement Pastes. **RILEM Bookseries: Springer Netherlands**. v. 22: p. 149-155.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_17

FRODAL, B. H., DAEHLI, L. E. B., BØRVIK, T., HOPPERSTAD, O. S. (2019). Modelling and simulation of ductile failure in textured aluminium alloys subjected to compression-tension loading. **International Journal of Plasticity**, v. 118, p. 36-69.

<https://doi.org/10.1016/j.iplas.2019.01.008>

GAUSTAD, G, OLIVETTI, E, KIRCHAIN, R. (2012). Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 58, p. 79-87.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>

GHISELLINI, P.; ULGIATI, S. (2020). Circular economy transition in Italy. Achievements, perspectives and constraints. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p. 118360.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118360>

GHOSH, M.; MIROUX, A.; KESTENS, L. A. I. (2015). Correlating r-value and through thickness texture in Al-Mg-Si alloy sheets. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 619, p. 585-591.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.09.038>

GOLOBORODKO, A., ITO, T., YUN, X., MOTOHASHI, Y., ITOH, G. (2004). Friction stir welding of a commercial 7075-T6 aluminum alloy: Grain refinement, thermal stability and tensile properties. **Materials Transactions**, v. 45, n. 8, p. 2503-2508.

<https://doi.org/10.2320/matertrans.45.2503>

GONZÁLEZ, R, GONZÁLEZ, A, TALAMANTES-SILVA, J, VALTIERRA, S, MERCADO-SOLÍS, RD, GARZA-MONTES-DE-OCA, NF, COLÁS, R. (2013). Fatigue of an aluminium cast alloy used in the manufacture of automotive engine blocks. **Int J Fatigue**. v. 54, p. 118-126.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.03.018>

GONZÁLEZ, R, MARTÍNEZ, DI, GONZÁLEZ, JA, TALAMANTES, J, VALTIERRA, S, COLÁS, R. (2011). Experimental investigation for fatigue strength of a cast aluminium alloy. **Int J Fatigue**. v. 33(2), p. 273-278.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.09.002>

GRIMAUD, G., PERRY, N., LARATTE, B. (2018). Aluminium cables recycling process: Environmental impacts identification and reduction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 150-162.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.010>

GRONOSTAJSKI, J., MARCINIAK, H., MATUSZAK, A. (2000). New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. **Journal of materials processing technology**, v. 106, n. 1-3, p. 34-39.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00634-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00634-8)

GU, C, LU, Y, CINKILIC, E, MIAO, J, KLARNER, A, YAN, X, LUO, AA. (2019). Predicting grain structure in high pressure die casting of aluminum alloys: A coupled cellular automaton and process model. **Comput Mater Sci**. v. 161, p. 64-75.

<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.01.029>

GUO, WEIBING, MA, XINRAN, GAO, MINGZE, YAN, JIUCHUN. (2018). Direct soldering of screen-printed Al-paste layer on back-side of silicon solar cell using SnAg solder. **Materials Letters**, v. 231, p. 146-149.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.127>

HAN, Q, VISWANATHAN, S, MORE, KL, MYERS, MR, WARWICK, MJ, CHEN, YC. (2008). Bonding of steel inserts during aluminum casting, **TMS 2008 Annual Meeting Supplemental: Materials Processing and Properties**. New Orleans, LA, p. 339-344.

<http://www.scopus.com/inward/record.url?partnerID=HzOxMe3b&scp=51649102524&origin=inward>

HARALDSSON J, JOHANSSON MT. (2018). Review of measures for improved energy efficiency in production-related processes in the aluminium industry – From electrolysis to recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 93: p. 525-48.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.043>

HASHIM J, LOONEY L, HASHMI MSJ. (2001). The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 119(1-3): p. 329-335.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00919-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00919-0)

HE, Q. (1999). Knowledge discovery through co-word analysis. **Library Trends - University of Illinois, USA**. v. 48, p. 133-159.

<http://hdl.handle.net/2142/8267>

HERMANSSON, F, JANSSEN, M, SVANSTROM, M. (2019). Prospective study of lignin-based and recycled carbon fibers in composites through meta-analysis of life cycle assessments. **J. Clean Prod**. v. 223, p. 946-956.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.022>

HOLZSCHUH, G. G, DÖRR, D.S, MORAES, J. A. R, GARCIA, S. B. (2020). Metal matrix production: Casting of recycled aluminum cans and incorporation of rice husk ash and magnesium. **Journal of Composite Materials**, p. 0021998320911964.

<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998320911964>

- HORT, NORBERT, WIESE, BJÖRN, DIERINGA, HAJO, KAINER, KARL (2016). Protecting molten magnesium and its alloys. **La Metallurgia Italiana**, v. 108, p. 105-108.
https://www.researchgate.net/publication/303836634_Protecting_molten_magnesium_and_its_alloys
- HSU, F.-Y., JOLLY, M. R., CAMPBELL, J. (2009). A multiple-gate runner system for gravity casting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 17, p. 5736-5750.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.06.003>
- HUMPHREYS, F. J.; HATHERLY, M. (2012). Recrystallization and related annealing phenomena. **Elsevier**. ISBN 008098388X.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2>
- HUMPHREYS, N. J., MCBRIDE, D., SHEVCHENKO, D. M., CROFT, T. N., WITHEY, P., GREEN, N. R., CROSS, M. (2013). Modelling and validation: Casting of Al and TiAl alloys in gravity and centrifugal casting processes. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 14, p. 7633-7643.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.03.030>
- HURTALOVÁ, L., TILLOVÁ, E., CHALUPOVÁ, M. (2014). Microstructural and vickers microhardness evolution of heat treated secondary aluminium cast alloy. **9th International Conference on Local Mechanical Properties, LMP 2012**. Levoca. v. 586: p. 137-140.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.586.137>
- HUTCHESON, W.; HOAGLAND, P.; JIN, D. (2018). Valuing environmental education as a cultural ecosystem service at Hudson River Park. **Ecosystem Services**, v. 31, p. 387-394.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.03.005>
- HUYNH, L. A. T.; PHAM, C. H.; RASMUSSEN, K. J. R. (2019). Mechanical properties and residual stresses in cold-rolled aluminium channel sections. **Engineering Structures**, v. 199, p. 109562.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109562>
- IBRAGIMOV, X.; ISMAILOV, N. (2018). Development of lean titanium-alloyed aluminium alloy for electro-technical purposes. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 1, n. 12-91, p. 23-29.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123644>
- ITRPV (2020). International Technology Roadmap for Photovoltaic. Disponível em: <https://itrvp.vdma.org/>. Accessed on: 20/05/2020.
- JERINA, L.; MEDVED, J.; GODEC, M.; VONČINA, M. (2018). Influence of the specific surface area of secondary material on the solidification process and microstructure of aluminium alloy AA7075. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 134, n. 1, p. 455-462.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60417-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60417-9).

KARABAY, S. (2006). Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors. **Materials & Design**, v. 27, n. 10, p. 821-832.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.005>

KARABAY, S. (2008). Influence of AlB_2 compound on elimination of incoherent precipitation in artificial aging of wires drawn from redraw rod extruded from billets cast of alloy AA-6101 by vertical direct chill casting. **Materials & Design**, v. 29, n. 7, p. 1364-1375.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.06.004>

KARABAY, S.; FEYZULLAHOĞLU, E. (2014). Determination of early failure sources and mechanisms for Al 99.7% and Al-Mg-Si alloy bare conductors used in aerial transmission lines. **Engineering Failure Analysis**, v. 38, p. 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.12.002>

KARABAY, S.; GÜVEN, E. A.; ERTÜRK, A. T. (2013). Enhancement on Al-Mg-Si alloys against failure due to lightning arc occurred in energy transmission lines. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 153-160.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.005>

KARABAY, S.; TAYSI, Y. (2004). Improving short-circuit current capacity, resistance, and breaking load of OPGW constructions by modifying aluminium alloy with AlB_2 . **Materials and Manufacturing Processes**, v. 19, n. 6, p. 1157-1169.
<https://doi.org/10.1081/AMP-200035293>

KARABAY, S.; UZMAN, I. (2005). Inoculation of transition elements by addition of AlB_2 and AlB_{12} to decrease detrimental effect on the conductivity of 99.6% aluminium in CCL for manufacturing of conductor. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 160, n. 2, p. 174-182.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.06.015>

KARABAY, S.; YILMAZ, M.; ZEREN, M. (2005). Investigation of extrusion ratio effect on mechanical behaviour of extruded alloy AA-6101 from the billets homogenised-rapid quenched and as-cast conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 160, n. 2, p. 138-147.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.05.025>

KASCHNITZ, E.; FUNK, W.; PABEL, T. (2014). Electrical resistivity measured by millisecond pulse-heating in comparison to thermal conductivity of the aluminium alloy Al-7Si-0.3Mg at elevated temperature. **High Temperatures - High Pressures**, v. 43, n. 2-3, p. 175-191.
<https://doi.org/10.1007/s10765-019-2490-8>

KIPPER, L, BERTOLIN FURSTENAU, L, HOPPE, D, FROZZA, R, IESPEN, S. (2019). Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis. **International Journal of Production Research**. p. 1-24.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1671625>

KITCHENHAM, B, BRERETON, OP, BUDGEN, D, TURNER, M, BAILEY, J, LINKMAN, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review. **Information and software technology**. v. 51(1), p. 7-15.
<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering (Version 2.3)-EBSE Technical Report. **Keele University and University of Durham**.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.117.471>

KUCHARIKOVÁ, L.; TILLOVÁ, E.; CHALUPOVÁ, M.; MAZUR, M. (2019). Analysis of microstructure in AlSi7Mg0.3 cast alloy with different content of Fe. **Transportation Research Procedia**, v. 40, p. 59-67.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.011>

KUMAR, A.; KUMAR, S.; MUKHOPADHYAY, N. K. (2018). Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites. **Journal of Magnesium and Alloys**, v. 6, n. 3, p. 245-254.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.006>

KUMAR, A., SAMADDER, S. R., KUMAR, N., SINGH, C. (2018). Estimation of the generation rate of different types of plastic wastes and possible revenue recovery from informal recycling. **Waste Management**, v.79, p. 781-790.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.045>

KUMAR, RANJEET., GUPTA, AMAN., DANDEKAR, TUSHAR R., KHATIRKAR, RAJESH K. (2020). Microstructure and texture development in AA3003 aluminium alloy. **Materials Today Communications**, v.24, p. 100965.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100965>

LI, CM, CHEN, ZQ, ZENG, SM, CHENG, NP, GENG, ZH, LI, Q. (2011). Effect of stepped solution treatment on microstructure and properties of AA7085 aluminum alloy, 2011 **International Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials, CEAM 2011**. Changsha, p. 786-792.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.786>

LI, Q, WU, Y, DENG, H, MAO, D. (2008). Harmonic analysis of electromagnetic casting system, **7th World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA'08**. Chongqing, p. 691-696.
<https://doi.org/10.1109/WCICA.2008.4593005>

LIN, J.-H.; ZHAO, H.-D.; HUANG, J.-M. (2019). Spatial interfacial heat transfer and surface characteristics during gravity casting of A356 alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 29, n. 1, p. 43-50.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64913-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64913-1)

LIU, B, XIONG, S, XU, Q. (2007). Study on Macro- and Micromodeling of the Solidification Process of Aluminum Shape Casting. **Metallurgical and Materials Transactions B**. v. 38(4), p. 525-532.

<https://doi.org/10.1007/s11663-007-9073-y>

LIU, B, XU, Q, JING, T, SHEN, H, HAN, Z. (2011). Advances in multi-scale modeling of solidification and casting processes. **JOM**. v. 63(4), p. 19-25.

<https://doi.org/10.1007/s11837-011-0054-x>

LIU, G, MÜLLER, DB. (2012). Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. **J. Clean Prod.** v. 35, p. 108-117.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.030>

LIU, X, LI, K. (2011). Simulation of the dendritic growth of aluminum casting during solidification based on CA method, 2010. **International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes, ICAMMP 2010**. Shenzhen, p. 376-380.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.376>

LIU, XIAO YAN., PAN, QING LIN., FAN, XI., HE, YUN BIN., LI, WEN BIN., LIANG, WEN JIE (2009). Microstructural evolution of Al–Cu–Mg–Ag alloy during homogenization. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 484, n. 1, p. 790-794.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.046>

LONG, Z, HAN, Q, VISWANATHAN, S, NINGILERI, S, DAS, S, KUWANA, K, HASSAN, M, KHRAISHEH, M, SABAU, A, SAITO, K. (2005). Integrated 3D model to simulate solidification and predict hot cracking during DC casting of aluminum alloys, in: Kvande, H. (Ed.) **134th TMS Annual Meeting**. San Francisco, CA, p. 1057-1062. (Warrendale, Penn.: The Minerals, Metals & Materials Society, 2005). ISBN: 978-087339580-9.

<http://www.scopus.com/inward/record.url?partnerID=HzOxMe3b&scp=23244454975&origin=inward>

LUCCHETTA, M. C.; SAPORITI, F.; AUDEBERT, F. (2019). Improvement of surface properties of an Al–Sn–Cu plain bearing alloy produced by rapid solidification. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 805, p. 709-717.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.082>

LØVIK, AN, MODARESI, R, MÜLLER, DB. (2014). Long-term strategies for increased recycling of automotive aluminum and its alloying elements. **Environ. Sci. Technol.** v. 48(8), p. 4257-4265.

<https://doi.org/10.1021/es405604g>

MAHINROOSTA, M.; ALLAHVERDI, A. (2018). Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. **Journal of Environmental Management**, v. 223, p. 452-468.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.068>

MANDATSY MOUNGOMO, J. B.; NGANGA KOUYA, D.; SONGMENE, V. (2016). Aluminium Machining Chips Formation, Treatment & Recycling: A Review. **Key Engineering Materials**, v. 710, p. 71-76.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.710.71>

MANKINS, W. L. (2004). Recovery, recrystallization, and grain-growth structures. **Materials Park, OH: ASM International**, 2004., p. 207-214.

<https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003743>

MANSUROV, Y.; LETYAGIN, N.; FINOGEYEV, A.; RAKHMONOV, J. (2018). Influence of impurity elements on the casting properties of Al-Mg based alloys. **Non-Ferrous Metals**, v.44, n.1, p.24-29. Disponível em:

http://rudmet.net/media/articles/Article_NFM_01_18_pp.24-29.pdf

MAUNG, KN, YOSHIDA, T, LIU, G, LWIN, CM, MULLER, DB, HASHIMOTO, S. (2017). Assessment of secondary aluminum reserves of nations. **Resources, Conservation and Recycling**. v.126, p. 34-41.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.016>

MBUYA, T.; ODERA, B.; NG'ANG'A, S. (2003). Influence of iron on castability and properties of aluminium silicon alloys: literature review. **International Journal of Cast Metals Research**. v.16(5): p.451-65.

<https://doi.org/10.1080/13640461.2003.11819622>

MIŠOVIĆ, M., TADIĆ, N., JAĆIMOVIĆ, M., JANJIĆ, M. (2016). Deformations and velocities during the cold rolling of aluminium alloys. **Materiali in Tehnologije**, v. 50, n. 1, p. 59-67.

<https://doi:10.17222/mit.2014.250>

MOHAMED, AMA, SAMUEL, FH, SAMUEL, AM, DOTY, HW, VALTIERRA, S. (2008). Influence of Tin Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg and Al-Si-Mg Casting Alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v.39(3), p.490-501.

<https://doi.org/10.1007/s11661-007-9454-5>

NAKAJIMA, K, TAKEDA, O, MIKI, T, MATSUBAE, K, NAKAMURA, S, NAGASAKA, T. (2010). Thermodynamic analysis of contamination by alloying elements in aluminum recycling. **Environ Sci Technol**. v.44(14), p.5594-5600.

<https://doi.org/10.1021/es9038769>

NETO, ACD, SUBRAMANYAN, R, VIEIRA, M, TRAVASSOS, GH. (2007). A survey on model-based testing approaches: a systematic review, **Proceedings of the 1st ACM international workshop on Empirical assessment of software engineering languages and technologies: held in conjunction with the 22nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE) 2007**. ACM, Atlanta, Georgia, p. 31-36.

<https://doi.org/10.1145/1353673.1353681>.

NING, Z, WANG, H, SUN, J. (2006). The effect of initial microstructure of A356 alloys on the mechanical behavior in the semisolid state, 9th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, S2P 2006. **Trans Tech Publications Ltd**, Busan, p. 449-452.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.116-117.449>.

NURCHESHMEH, M.; GREEN, D. E. (2011). Prediction of sheet forming limits with Marciniak and Kuczynski analysis using combined isotropic–nonlinear kinematic hardening. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 53, n. 2, p. 145-153.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.12.004>

PARAS, M. K., EKWALL, D., PAL, R., CURTEZA, A., CHEN, Y., WANG, L. (2018). An exploratory study of Swedish charities to develop a model for the reuse-based clothing value chain. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 4.

<https://doi.org/10.3390/su10041176>

PARASKEVAS, D, KELLENS, K, DEWULF, W, DUFLOU, JR. (2015). Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management. **J. Clean Prod.** v. 105, p. 357-370.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.102>

PEDERSEN, KETILL O., WESTERMANN, IDA., FURU, TROND., BØRVIK, TORE., HOPPERSTAD, ODD STURE. (2015). Influence of microstructure on work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys. **Materials and Design**, v. 70, p. 31-44.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.035>

PENG, TIANDUO., OU, XUNMIN., YAN, XIAOYU., WANG, GEHUA. (2019). Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China. **Energy Procedia**, v. 158, p. 3937-3943.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.849>

PHAN HOANG, T. T.; KATO, T. (2016). Measuring the effect of environmental education for sustainable development at elementary schools: A case study in Da Nang city, Vietnam. **Sustainable Environment Research**, v. 26, n. 6, p. 274-286.

<https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.08.005>

POLMEAR, IAN., STJOHN, DAVID., NIE, JIAN-FENG., QIAN, MA. (2017). 3 - Casting of Light Alloys. In: POLMEAR, I., STJOHN, D., et al (Ed.). **Light Alloys (Fifth Edition)**. Boston: Butterworth-Heinemann. p. 109-156. ISBN 978-0-08-099431-4.

<https://www.elsevier.com/books/light-alloys/polmear/978-0-7506-6371-7>

PRASAD, D. S., SHOBA, C., RAMANAIAH, N. (2014). Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 3, n. 1, p. 79-85.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.11.002>

PUGA, H, BARBOSA, J, SOARES, D, SILVA, F, RIBEIRO, S. (2009). Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts. **J Mater Process Technol.** v. 209(11), p. 5195-5203.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.03.007>

QINGMING, C, XIA, C, CHANGJUN, C, SIQIAN, B, SCHWAM, D. (2009). Characteristics and influence factors of mold filling process in permanent mold with a slot gating system. **China Foundry.** v. 6(4), p. 328-332.

<http://www.foundryworld.com/uploadfile/200912448555201.pdf>

REIS, A, XU, Z, TOL, RV, NETO, R. (2012). Modelling feeding flow related shrinkage defects in aluminum castings. **J. Manuf. Processes.** v. 14(1), p. 1-7.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.05.003>

SAMPAIO, R, MANCINI, M. (2007). Systematic review studies: a guide for careful synthesis of the scientific evidence. **Brazilian Journal of Physical Therapy.** v. 11, p. 83-89.

<https://doi.org/10.1590/S1413-35552007000100013>

SAMUEL, A.M, DOTY, H.W, VALTIERRA, S, SAMUEL, F.H. (2018). Metallurgical Aspects of Inclusion Assessment in Al-6%Si Casting Alloy Using the LiMCA Technique. **International Journal of Metalcasting.** v. 12(3), p. 643-657.

<https://doi.org/10.1007/s40962-017-0203-2>

SAUVAGE, X., BOBRUK, E. V., MURASHKIN, M. YU., NASEDKINA, Y., ENIKEEV, N. A., VALIEV, R. Z. (2015). Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys. **Acta Materialia,** v. 98, p. 355-366.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.039>

SCHLESINGER, M. E. (2013). 2^a ed. Aluminum recycling. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, **CRC press.** ISBN: 1466570253. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053949471&doi=10.1201%2fb16192&partnerID=40&md5=0095cc4a63ac1244aedb06b6bb657800>

SELLITTO M.A. (2018). Reverse logistics activities in three companies of the process industry. **Journal of Cleaner Production.** v. 187: p. 923-931.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.262>

SETZER, W.; BOONE, G. (1992). The use of aluminium boron master alloys to improve electrical conductivity. **Light Metals,** TMS Annual Meeting, San Diego, California, March 1 - 5; Euel R. Cutshall, ISBN: 0-87339-146-2 v. 1991, p. 837-844.

SHACKELFORD, J. F. (2008). Introduction to materials science for engineers. 6^a. **Pearson Prentice Hall.** ISBN: 9788576051602.

SHAMSUDIN, S.; LAJIS, M.; ZHONG, Z. W. (2016). Evolutionary in Solid State Recycling Techniques of Aluminium: A review. In: SELIGER, G.; KOHL, H., *et al*, **13th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 2015**, Elsevier B.V. p.256-261.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.117>

SINGH, J.; CHAUHAN, A. (2016). Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications–A review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 5, n. 2, p. 159-169.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.05.004>

SMYRAK, B., KNYCH, T., MAMALA, A., ULIASZ, P., JABŁOŃSKI, M. (2011). A study of a new generation of multi-functional aluminium alloys for the power industry. **5th International Conference on Light Metals Technology**. Lunenburg. v. 690: p. 439-442.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.690.439>

SPINELLI, J. E., CHEUNG, N., GOULART, P. R., QUARESMA, J. M. V., GARCIA, A. (2012). Design of mechanical properties of Al-alloys chill castings based on the metal/mold interfacial heat transfer coefficient. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 51, n. 1, p. 145-154.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.08.014>

SUA-IAM G, MAKUL N, CHENG S, SOKRAI P. (2019). Workability and compressive strength development of self-consolidating concrete incorporating rice husk ash and foundry sand waste – A preliminary experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 228.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116813>

TAJALLY, M.; HUDA, Z. (2011). Recrystallization kinetics for aluminum alloy 7075. **Metal science and heat treatment**, v. 53, n. 5-6, p. 213-217.
<https://doi.org/10.1007/s11041-011-9371-5>

TAJALLY, M.; HUDA, Z.; MASJUKI, H. H. (2010). A comparative analysis of tensile and impact-toughness behavior of cold-worked and annealed 7075 aluminum alloy. **International Journal of Impact Engineering**, v. 37, n. 4, p. 425-432.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.08.009>.

THOMÉ, AMT, SCAVARDA, LF, SCAVARDA, AJ. (2016). Conducting systematic literature review in operations management. **Production Planning & Control**. v. 27(5), p. 408-420.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>

TSAKIRIDIS, P. E. (2012). Aluminium salt slag characterization and utilization – A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 217-218, p. 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.052>

TUTUR N., DAHALAN N.H., ROSSELI S.R., JOHARI M.A., (2019). editors. Rice husk ash and sewage sludge ash as sustainable replacement material for concrete. **International Conference on Nanomaterials: Science, Engineering and Technology 2019, ICoNSET 2019**. Institute of Physics Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012092>

VASUDEVAN, A. K.; DOHERTY, R. D. (2012). Aluminum Alloys - Contemporary Research and Applications: Contemporary Research and Applications. **Elsevier**. ISBN: 0323140238. <https://www.sciencedirect.com/bookseries/treatise-on-materials-science-and-technology/vol/31/suppl/C>

VERRAN, G.; KURZAWA, U.; PESCADOR, W. (2005). Reciclagem de latas de alumínio visando melhor rendimento e qualidade metalúrgica no alumínio obtido. **Revista Matéria**, v. 10, n. 1, p. 334-343, 2005. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10635>

VERRAN, G. O.; KURZAWA, U. (2008). An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace. **Resources, Conservation and Recycling**, v.52, n. 5, p. 731-736. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.10.001>

VERRAN, G. O.; KURZAWA, U.; PESCADOR, W. A. (2004). Reciclagem de latas de alumínio visando a obtenção de matérias primas com qualidade para aplicação em processos metalúrgicos de fabricação. In: **SUSTENTÁVEL, I.-I. D. C. E. T. E. R. E. D., Anais..., ICTR 2004-Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Florianópolis, CD-Rom, 2004, Santa Catarina. ICTR - Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://slidex.tips/download/ictr-2004-congresso-brasileiro-de-ciencia-e-tecnologia-em-residuos-e-desenvolvim-39>.

WAN, B, CHEN, W, LU, T, LIU, F, JIANG, Z, MAO, M. (2017). Review of solid state recycling of aluminum chips. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 125, p. 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.004>

WANG, BO., CHEN, XIAN-HUA., PAN, FU-SHENG., MAO, JIAN-JUN., FANG, YONG. (2015). Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 25, n. 8, p. 2481-2489. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63866-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63866-3)

WANG, H, LU, Y, RIPPLINGER, K, DETWILER, D, LUO, AA. (2016). A Statistics-Based Cracking Criterion of Resin-Bonded Silica Sand for Casting Process Simulation. **Metallurgical and Materials Transactions B**. v. 48(1), p. 260-267. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0865-9>

WANG, HJ, XU, J, ZHANG, ZF, LIANG, B, GAO, MW. (2015). Application research of a new coupling stirring on DC casting process for large-sized aluminum ingots, in: Han, Y., Wu, Y., Liu, X. (Eds.), **Chinese Materials Congress, CMC 2014**. Trans Tech Publications Ltd, p. 48-54. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.817.48>

WANG, J. Y., LI, N., ALIZADEH, R., MONCLÚS, M. A., CUI, Y. W., MOLINA-ALDAREGUÍA, J. M., LLORCA, J. (2019). Effect of solute content and temperature on the deformation mechanisms and critical resolved shear stress in Mg-Al and Mg-Zn alloys. **Acta Materialia**, v. 170, p. 155-165.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.03.027>

WANG, Q, JONES, P, WANG, Y, GERARD, D. (2011). Advances in computational tools for virtual casting of aluminum components, **1st World Congress on Integrated Computational Materials Engineering, ICME**. Seven Springs, PA, p. 217-222.

<https://doi.org/10.1002/9781118147726.ch30>

WANG, Q, JONES, P, WANG, Y, GERARD, D. (2017). Latest Advances in Aluminum Shape Casting. **SAE Techn. Paper**.

<https://doi.org/10.4271/2017-01-1665>

WANG, T, CHEN, C, ZHANG, X, TANG, Y. (2012). Production of thin-walled aluminum castings with gypsum mold casting combining with vacuum pouring and solidification under pressure. **Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys**, v. 32, n. 3, p. 264-266.

<http://www.scopus.com/inward/record.url?partnerID=HzOxMe3b&scp=84861771143&origin=inward>

WANG, W, DU, A, ZHAO, X, FAN, Y, WANG, X, MA, R, CAO, X, LI, Q. (2018). Effect of Si addition on the stability of Al-10Ti-5Cu-xSi alloy/SiC interface. **Compos Interfaces**. V. 25(9), p. 761-770.

<https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1439627>

WANG, Y, LI, XQ, LI, RQ, TIAN, Y. (2019). Fine grain mechanism of ultrasonic vibration depth in large diameter aluminum ingot hot-top casting. **Gongcheng Kexue Xuebao**. v. 41(1), p. 96-103.

<https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.01.010>

WANG, Y.; SCHWAM, D. (2012). Application of bayesian analysis method in the design optimization of permanent casting mold. **ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2012**, Houston, TX. PARTS A, B, AND C. p.1 7-21.

<https://doi.org/10.1115/IMECE2012-86413>

WANG, Y, YANG, M, YOU, J, ZHENG, W, DI, Y, FENG, N, MA, S. (2007). Study of making casting grade Aluminum-silicon alloy with coarse aluminum-silicon alloy produced by carbothermal reduction of aluminous ore. **TMS 2007 Annual Meeting and Exhibition**, Orlando, FL. p.477-482. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34547922094&partnerID=40&md5=032a4e406af4a86f3fa597e3f4c2fb29>

WANG, Z., GAO, M. C., MA, S. G., YANG, H. J., WANG, Z. H., ZIOMEK-MOROZ, M., QIAO, J. W. (2015). Effect of cold rolling on the microstructure and mechanical properties of Al_{0.25}CoCrFe_{1.25}Ni_{1.25} high-entropy alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 645, p. 163-169.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.088>

WEI, X, WANG, H, LIU, C, CAO, H, YAN, P, SUN, Z. (2019). A review on recycling of waste aluminum alloy. **Guocheng Gongcheng Xuebao/The Chinese Journal of Process Engineering**, v. 19, n. 1, p. 45-54.

<http://dx.doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.218180>

XU, K, WANG, Y, SHEN, SH, XIA, X, TU, WC, KARUPPIAH, L, YANG, H, GE, Z, LEI, Y, ALLEN, M, YOSHIDA, N, CHANG, LW, LIU, B, OKAZAKI, M, BRAND, A. (2012). Aluminum alloy formation and impacts in advanced replacement metal gate process, **20th International Materials Research Congress, IMRC 2011**. Cancun, p. 107-115.

<https://doi.org/10.1557/opl.2012.113>

XU, Q, LI, B, LIU, B. (2009). Application of microstructure simulation by modified CA method to Al alloy casting production, **4th International Conference Organised by the CAST CRC, on Behalf of the Global Light Metals Alliance**. Gold Coast, QLD, p. 199-202.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.199>

XU, Z, ZOU, Y, GU, H, ZENG, J, (2007). Investigations on hydrogen content change in melt aluminum during casting under adjusted pressure. **Asian Pacific Conference for Fracture and Strength (APCFS'06)**. Sanya, Hainan Island. 353-358: pp. 3059-3062.

<http://www.scopus.com/inward/record.url?partnerID=HzOxMe3b&scp=36049028991&origin=inward>

XU, Z. B., ZOU, Y. Z., GU, H., ZENG, J. M. (2007). Investigations on hydrogen content change in melt aluminum during casting under adjusted pressure. In: ZHOU, Y.; TU, S. T., *et al* (Ed.). **Progresses in Fracture and Strength of Materials and Structures, 1-4**. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, v. 353-358. p. 3059-3062. (**Key Engineering Materials**).

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.353-358.3059>

YAN, X, LIN, JC. (2006). Prediction of hot tearing tendency for multicomponent aluminum alloys. **Metallurgical and Materials Transactions B**. v. 37(6), p. 913-918.

<https://doi.org/10.1007/BF02735013>

YANG, S-F, WANG, T-M, SHIE, Z-YJ, JIANG, S-J, HWANG, C-S, TZENG, C-C. (2014). Fine Al₂O₃ Powder Produced by Radio-Frequency Plasma From Aluminum Dross. **IEEE Trans Plasma Sci**. v. 42(12), p. 3751-3755.

<https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2333543>

YANG, XIAOJIE., ZHAO, JIANFENG., LI, HAOXIN., ZHAO, PIQI., CHEN, QIN. (2017). Recycling red mud from the production of aluminium as a red cement-based mortar. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 5, p. 500-507.

<https://doi.org/10.1177/0734242X16684386>

YUNA, W., JIANFENG, Z., HENGCHENG, L., YONGJIN, W., YUPING, W. (2016). Effect of Homogenization Temperature on Microstructure and Conductivity of Al-Mg-Si-Ce Alloy. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 25, n. 7, p. 2720-2726.

<https://doi.org/10.1007/s11665-016-2121-5>

ZARMAI, MUSA T., EKERE, N. N., ODUOZA, C. F., AMALU, EMEKA H. (2015). A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly. **Applied Energy**, v. 154, p. 173-182.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.120>

ZENG, J, HU, Z, XU, Z, YAN, Y, HE, C, HE, H. (2014). An additive manufacturing process combined with investment casting, **SAMPE Tech Seattle 2014 Conference**. Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84907766293&partnerID=40&md5=01a730ed3ab6e14afa0fafac9ded7bbf>

ZHANG, J, LIU, J, LI, Q. (2019). Microstructure and Properties of Al-Ga Alloys with Different Mg/Sn Ratios. **Chinese Journal of Rare Metals**. Xiyou Jinshu. v. 43(6), p. 592-597.

<https://www.cnki.net/kcms/doi/10.13373/j.cnki.cjrm.XY18060008.html>

ZHANG, L.; GAO, J.; DAMOAH, L. N. W. (2012). Robertson, D. G. Removal of iron from aluminum: a review. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 33, n. 2, p. 99-157.

<https://doi.org/10.1080/08827508.2010.542211>

ZHOU, ZP, LI, RD, MA, JC, WANG, Y. (2005). Effect of melt mixing on the microstructure in Al-5%Fe alloy. **Hangkong Cailiao Xuebao/Journal of Aeronautical Materials**, v. 25, n. 4, p. 6-9. Disponível em:

<http://www.scopus.com/inward/record.url?partnerID=HzOxMe3b&scp=23944476874&origin=inward>

ZHU, Y.; COOPER, D. R. (2019). An Optimal Reverse Material Supply Chain for U.S. Aluminum Scrap. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 677-682.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.065>

ZOLOTOREVSKY, V. S.; BELOV, N. A.; GLAZOFF, M. V. (2007). Chapter three - Influence of Heat Treatment Upon Microstructure of Casting Aluminum Alloys. In: ZOLOTOREVSKY, V. S.; BELOV, N. A., et al (Ed.). **Casting Aluminum Alloys**. Amsterdam: Elsevier. p. 183-245. ISBN 978-0-08-045370-5.

<https://www.globalspec.com/reference/32005/203279/chapter-three-influence-of-heat-treatment-upon-microstructure-of-casting-aluminum-alloys>

ZUPIC, I, ČATER, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**. vol. 18, (3), p. 429-472.

<https://doi.org/10.1177%2F1094428114562629>

ZÁVODSKÁ, D.; TILLOVÁ, E.; ŠVECOVÁ, I.; KUCHARIKOVÁ, L. (2018). Secondary cast Al-alloys with higher content of iron. **Materials Today: Proceedings**, vol. 5, n. 13, Part 2, p. 26680-26686.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.135>

ŠKŮRKOVÁ, K. L.; INGALDI, M. (2014). Recycling Process of the Aluminium Cans as an Example of the Renewable Material Sources. **Advanced Materials Research**, vol. 1001, p. 103-108.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.103>