



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

LUANE LUIZA PEREIRA MARQUES

**CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS COM
AS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DAS LIGAS DE Al- 0,5% E 1,5%
Ni TRATADAS TERMICAMENTE À 280 °C E 400 °C**

Ananindeua-PA

2023

LUANE LUIZA PEREIRA MARQUES

**CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS COM
AS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DAS LIGAS DE Al- 0,5% E 1,5%
Ni TRATADAS TERMICAMENTE À 280 °C E 400 °C**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para a obtenção do título de bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres

Ananindeua-PA

2023

LUANE LUIZA PEREIRA MARQUES

**CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS COM
AS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DAS LIGAS DE Al- 0,5% E 1,5%
Ni TRATADAS TERMICAMENTE À 280 °C E 400 °C**

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

Data da Avaliação: 05/07/2023

Conceito: Exceleente

BANCA EXAMINADORA:

Deibson Silva da Costa

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

Emerson Rodrigues Prazeres

Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres
(FEM-ITEC-UFPA-Coorientador)

Pedro Paulo Guimarães Ribeiro

Prof. Dr. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
(FEMat-CAMPANIN-UFPA-Examinador Interno)

Amanda Lucena de Medeiros

Prof.^a Dr.^a Amanda Lucena de Medeiros
(FEM-ITEC-UFPA-Examinadora externa)

Wellington Bruno Silva de Jesus

Eng. Esp. Wellington Bruno Silva de Jesus
(PPGEM-ITEC-UFPA-Examinador externo)

Ananindeua-PA

2023

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

- P436c Pereira Marques, Luane Luiza.
Correlação das características macroestruturais com as propriedades elétricas das ligas de Al-0,5% e 1,5% Ni tratadas termicamente à 280 °C e 400 °C / Luane Luiza Pereira Marques. — 2023.
62 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2023.
1. Tecnológico. 2. Fundição. 3. Recozimento. 4. Laminação. I. Título.

CDD 620.143

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus pelo dom da vida e a saúde na qual me permite ir em busca do conhecimento para alcançar meus sonhos, em seguida a fé nos meus guias espirituais que me proporcionam a força para permanecer firme na minha jornada.

Em seguida a minha família, principalmente minha mãe Roseane Sales Pereira na qual e a principal inspiração e motivação em minha vida. A minha mãe de Santo Edna Pinheiro e a minha família de fé do templo de axé de mina vodun cabocla Iracema e dom João. Aos meus queridos amigos: Eric Espíndola, Gabriella Nascimento, Ingrid Angelo, Jeovan Ramos, Ian, Carlos Cicero, Wellington de Jesus, Mateus José, entre outros, que sempre me incentivaram e apoiaram. Ao grupo de pesquisa em engenharia de materiais (GPEMAT): Eric, Mateus, Juliana, Eloany, Andrey, Hanna, Silmara, Gregory, Joab, Adriane. Aos meus amigos do laboratório de caracterização de materiais metálicos (LCAM): Rute, Tarcío, Mateus, Wilson. Entre outros que contribuíram com meus conhecimentos.

Aos professores, Emerson Prazeres, Deibson Costa pelas suas excelentes orientações, me incentivando, contribuindo para construção do meu conhecimento. A professora Dr.^a Amanda Lucena de Medeiros pelo conhecimento, suporte e todo ensinamento repassado, bem como a orientação fornecida. Ao laboratório de Engenharia de Materiais, pela oportunidade do estágio.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que estiveram ao meu lado nessa longa jornada, apoiando direta ou indiretamente. Sou muito grata a todos! Obrigada!

*“O raio de Iansã sou eu cegando o aço das
armas de quem guerreia. E o vento de Iansã
também sou eu, que Santa Bárbara é santa que
me clareia!”*

MARIA BETHÂNIA

RESUMO

O consumo de energia elétrica está presente em diversos segmentos no país é um sistema fundamental para o funcionamento do mundo tecnológico. Desta maneira, torna-se interessante para o setor industrial o melhoramento na rede de distribuição de energia elétrica, pois devido as grandes extensões territoriais do país e as intempéries climáticas ocorre o sucateamento intenso das linhas de transmissão. Diante desta realidade, foi realizado este estudo com o objetivo de estudar a influência das macroestruturas nas propriedades elétricas e mecânicas das ligas de Al- 0,5% e 1,5% Ni tratadas termicamente por recozimento a 280 °C e 400 °C em intervalos de tempo de 1 a 4 horas. As ligas foram fundidas pelo método convencional, em seguida foram retiradas amostras para análise química e macroestrutural das ligas, o restante do material foi usinado para diminuição do diâmetro de 22 mm para 18,5 mm, posteriormente laminados para produção dos fios com diâmetro de 3 mm, em seguida foram separadas amostras para realização do tratamento térmico de recozimento, nas seguintes temperaturas: 280 °C por 1 hora, 280 °C por 4 horas e 400 °C por 4 horas, após esses processos as amostras foram submetidas a ensaio de condutividade elétrica e resistência mecânica. Os resultados obtidos nas análises químicas demonstraram que as ligas fabricadas estão próximas aos valores de 0,5% e 1,5% de níquel estabelecidos para este estudo. As macroestruturas revelaram que a liga Al- 0,5%Ni, apresentou uma morfologia mista com grãos coquilhados, colunares e equiaxiais, diferentemente da liga Al-1,5%Ni que apresentou maior presença de grãos equiaxiais. O ensaio de condutividade elétrica revelou que o tratamento térmico foi eficaz, pois observou-se um crescimento na condutividade elétrica em função do aumento de temperatura, destacando que os melhores resultados foram para a liga com 0,5% Ni. Entretanto, ao avaliar os resultados do ensaio de tração, nota-se que o tratamento térmico não foi satisfatório, pois houve diminuição limite de resistência tração (LRT) nas duas ligas em função do aumento da temperatura, sugerindo que o material após o tratamento térmico se torna menos resistente e mais dúctil. Conclui-se que para a utilização de fios para cabos de transmissão de energia, o tratamento térmico não foi eficaz, pois as perdas no LRT foram acima de 10%, estando fora dos padrões exigidos pelo protocolo COPEL.

Palavras-chave: Tecnológico; Fundição; Recozimento; Laminação.

ABSTRACT

Electricity consumption is present in several segments in the country and is a fundamental system for the functioning of the technological world. In this way, it becomes interesting for the industrial sector to improve the electricity distribution network, because due to the large territorial extensions of the country and the bad weather, intense scrapping of transmission lines occurs. Faced with this reality, this study was carried out with the aim of studying the influence of macrostructures on the electrical and mechanical properties of Al-0,5% and 1,5% Ni alloys heat treated by annealing at 280 °C and 400 °C in time intervals from 1 to 4 hours. The alloys were cast by the conventional method, then samples were taken for chemical and macrostructural analysis of the alloys, the rest of the material was machined to reduce the diameter from 22 mm to 18,5 mm, later laminated to produce wires with a diameter of 3 mm, then samples were separated to carry out the annealing heat treatment, at the following temperatures: 280 °C for 1 hour, 280 °C for 4 hours and 400 °C for 4 hours, after these processes the samples were submitted to a test of electrical conductivity and mechanical strength. The results obtained in the chemical analyzes demonstrated that the manufactured alloys are close to the values of 0,5% and 1,5% of nickel established for this study. The macrostructures revealed that the Al-0,5%Ni alloy had a mixed morphology with chilled, columnar and equiaxed grains, unlike the Al-1,5%Ni alloy, which had a greater presence of equiaxed grains. The electrical conductivity test revealed that the heat treatment was effective, as there was an increase in electrical conductivity as a function of the temperature increase, highlighting that the best results were for the alloy with 0,5% Ni. However, when evaluating the results of the tensile test, it is noted that the heat treatment was not satisfactory, as there was a decrease in the tensile strength limit (TRL) in both alloys because of the increase in temperature, suggesting that the material after heat treatment becomes less resistant and more ductile. It is concluded that for the use of wires for energy transmission cables, the heat treatment was not effective, since the losses in the LRT were above 10%, being outside the standards required by the COPEL protocol.

Keywords: Technological; Foundry; Annealing; Lamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificação das ligas de níquel.	20
Figura 2- Influência dos elementos de liga sobre a condutividade elétrica do alumínio.....	22
Figura 3- Diagrama binário das ligas alumínio e níquel.	23
Figura 4- Processo de solidificação.	25
Figura 5- Representação esquemática da zona coquilhada, colunar e equiaxial.	27
Figura 6- Esquema representativo de um ciclo térmico de homogeneização.....	29
Figura 7- Fluxograma detalhando os processos metalúrgicos realizados nas duas ligas.	32
Figura 8- (a) Cadinho pintado com caulim; (b) forno utilizado para produção das ligas.....	33
Figura 9- (a) Retirada do cadinho do forno para homogeneização do material; (b) Injeção do gás argônio.....	34
Figura 10- (a)Vazamento nos moldes; (b) Desmoldagem de peça, após sua solidificação.....	34
Figura 11- Espectrômetro óptico de massa	35
Figura 12- (a) Lixamento manual das peças; (b) Polimento automático realizado na politriz.	35
Figura 13- (a) Materiais usados no ataque químico; (b) Ataque químico realizado por imersão.	36
Figura 14- (a) Torno mecânico; (b) Laminador elétrico duo reversível.....	36
Figura 15- Estufa usada no tratamento térmico das ligas.	37
Figura 16- Microhmímetro usado no ensaio	39
Figura 17- (a) Máquina de tração usada no ensaio mecânico; (b) ensaio de tração realizado em fio.....	40
Figura 18- Microscópio eletrônico de varredura	40
Figura 19- Macroestrutura da liga Al- 0,5 % Ni.....	42
Figura 20- Macroestrutura da liga Al- 1,5%Ni.....	43
Figura 21- Correlação dos resultados dos ensaios de condutividades elétricas das ligas Al- 0,5 % e 1,5%Ni.....	44
Figura 22- LRT da liga Al- 0,5 % Ni tratada termicamente.....	46
Figura 23- Fios após o ensaio de tração.	47
Figura 24- LRT da liga Al- 1,5% Ni tratadas termicamente	48
Figura 25- Correlação dos limites de resistência a tração (LRT) das ligas Al- 0,5 e 1,5% Ni.	48

Figura 26 -São amostras das superfícies da fratura observada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do corpo de prova Al- 0,5%Ni não tratadas e tratadas termicamente a 280 °C e 400 °C nos intervalos de 1h e 4 h, observadas em lente de aumento de 80X e 1000.	49
Figura 27 -São amostras das superfícies da fratura observada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do corpo de prova Al- 1,5%Ni não tratadas e tratadas termicamente a 280 °C e 400 °C nos intervalos de 1h e 4h, observadas em lente de aumento de 80X e 1000X.	51
Figura 28 -Correlação da condutividade elétrica da liga com 0,5 %Ni e da magrografia após fundição.	52
Figura 29 -Correlação da condutividade elétrica da liga com 1,5 % Ni e da macrografia após fundição.	53
Figura 30 -Correlação das condutividades elétricas com os limites de Resistência a tração das ligas Al- 0,5 e 1,5 % Ni tratadas termicamente	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Composição química das ligas fundidas.....	41
Tabela 2 -Limite de Resistência a Tração das ligas Al- 0,5 e 1,5%Ni tratadas termicamente.	45

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 -Tratamentos térmicos para ligas de alumínio fundidas.....	28
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
SiC	Carbeto de Silício
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
FEMAT	Faculdade de Engenharia de Materiais
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
GPEMAT	Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais
h	Hora
IACS	International Annealed Cooper Standard
LCAM	Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos
LRT	Limite de Resistência à Tração
MPa	Mega Pascal
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
DIMPLES	Microcavidades
Ni	Níquel
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
STT	Sem Tratamento Térmico
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Justificativa	16
1.2.	Objetivos.....	16
1.2.1.	Objetivo Geral.....	16
1.2.2.	Objetivo Específico.....	16
1.3.	Estrutura do trabalho	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	18
2.1.	Ligas metálicas.....	18
2.2.	O alumínio	18
2.3.	O níquel	19
2.4.	Ligas de alumínio.....	21
2.5.	Efeito do níquel sobre as ligas de alumínio	22
2.6.	Fundição dos metais	23
2.7.	Solidificação dos metais.....	24
2.7.1.	Solidificação convencional	24
2.8.	Estruturas características da solidificação.....	25
2.8.1.	Zona coquilhada.....	26
2.8.2.	Zona colunar	26
2.8.3.	Zona equixial	27
2.9.	Tratamento térmico.....	27
2.9.1.	Recozimento	28
2.10.	Parâmetros estruturais.....	30
2.10.1.	Deformação plástica.....	30
2.10.2.	Encruamento.....	30
2.10.3.	Recuperação	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1.	Metodologia.....	32
3.2.	Fundição e solidificação	33
3.3.	Análise química.....	35
3.4.	Metalografia	35
3.5.	Macroestrutura.....	36
3.6.	Produção dos fios.....	36

3.7.	Tratamento térmico.....	37
3.8.	Caracterização elétrica.....	37
3.9.	Caracterização mecânica	39
3.9.1.	Ensaio de tração	39
3.9.2.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1.	Análise química.....	41
4.2.	Macroestrutura	41
4.3.	Caracterização elétrica.....	44
4.4.	Limite de resistência a tração	45
4.4.1.	Análise das fraturas após o ensaio de tração.....	48
4.5.	Comparação das macrografias com a condutividade elétrica das ligas	52
4.6.	Comparação a condutividade elétrica e limite de resistência a tração (LRT) em função do tratamento térmico	53
5.	CONCLUSÃO.....	55
5.1.	Sugestões de trabalhos futuros	57
	REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

O consumo energia elétrica está presente em diversos setores da sociedade e da indústria. No Brasil, ela é a segunda mais consumida perdendo apenas para o petróleo e derivados (EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGICA, 2019). Este consumo está diretamente relacionado ao aumento populacional que impulsiona o mercado industrial na produção de novas tecnologias. De acordo, com o Plano Nacional de Energia (2023) é fundamental para buscar por novos meios e pesquisas para avaliar as tendências na produção e no uso da energia e balizar as estratégias e alternativas para expansão da oferta de energia nas próximas décadas.

A rede de transmissão de energia elétrica no país, passa por diversas dificuldades socioambientais e fundiárias. As mudanças climáticas, a emissão dos gases geradores dos efeitos estufa, amplitudes das temperaturas regionais, radiação solar, intensidade dos ventos, densidade do ar e intensidade das chuvas são variáveis que afetam diretamente a ampacidade dos cabos condutores das linhas, afetando sua transmissão ao longo da rede (EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGICA, 2016).

Dentro do setor nacional a Diretoria de Estudos de Energia Elétrica é responsável por coordenar, orientar e acompanhar as atividades de elaboração dos estudos necessários para o desenvolvimento dos planos de expansão da geração e transmissão de energia elétrica; dos estudos de viabilidade técnica econômica para os empreendimentos de geração e transmissão de energia elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGICA, 2019).

Com isso uma das alternativas é melhorar as características dos cabos de transmissão de energia elétrica, pesquisando novas ligas capazes de propagar a corrente elétrica por longas distâncias que possam resistir as intemperes. O alumínio (Al), por sua elevada condutibilidade elétrica e leveza, reúne as características ideais para uma aplicação confiável na transmissão de energia, com uma das menores taxas de desperdício de eletricidade ao longo das redes de transmissão (ABAL, 2023).

No entanto, como o Al comercialmente puro não possui uma resistência mecânica elevada, são adicionados alguns elementos químicos na sua matriz, com o objetivo de elevar os valores de suas propriedades mecânicas e elétricas, tornando a liga adequada para a utilização em cabos de transmissão de energia elétrica (PRAZERES, 2016).

As ligas metálicas são materiais que possuem propriedades metálicas, composto pela união de dois ou mais componentes, onde o componente principal é um metal (SANTOS, 2006), podendo conter metais ou ametais como elementos de liga, essa solução sólida busca melhorar as propriedades do metal base da liga quando solicitado eletricamente.

O níquel é o elemento mais comumente utilizado em conjunto com o cobre para realçar as propriedades do material à altas temperaturas. Também é responsável pela redução do coeficiente de expansão térmica da liga (KAUFMAN; ROOY, 2004). De acordo com a ABAL (2004), as ligas tratáveis termicamente podem ser trabalhadas a frio e, posteriormente, sofrer tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica.

O tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades (PRAZERES, 2014).

De acordo com Garcia (2001), a interação entre as discordâncias com outros obstáculos, como solutos, contornos de grão etc., impedem da livre movimentação das discordâncias e desta forma, é preciso uma energia maior para que ocorra essa movimentação, e, conseqüentemente, a deformação plástica é acompanhada por uma necessidade de maior tensão para deformar o material.

Com base nesse cenário, o Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais (GPEMAT), produz e estuda novas ligas de alumínio, para aplicação na transmissão e distribuição de energia elétrica.

Desta maneira, o presente trabalho busca desenvolver e estudar o comportamento elétrico e mecânico das ligas Al-0,5% e 1,5% Ni, tratadas termicamente a 280 °C e 400 °C durante 1h e 4h, avaliando os efeitos do tratamento térmico de recozimento sob estas propriedades, correlacionando os resultados obtidos com a literatura e avaliar se são viáveis para aplicação em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica.

1.1. Justificativa

Em decorrência do aumento populacional, intensifica-se o consumo de energia elétrica em diversos setores. Como consequência da intensa utilização da rede elétrica, tem-se as dificuldades socioambientais e fundiárias, alta exposição a intempéries climáticas que favorecem o processo de corrosão dos cabos de distribuição de energia elétrica, diminuindo sua ampacidade ao longo da rede elétrica.

Desta maneira o alumínio como metal base das ligas escolhidas, reúne propriedades interessantes que podem melhorar a resistência a corrosão, com distribuição de energia elétrica com menores perdas ao longo da rede, podendo resistir as intemperes climáticas e sendo amplamente encontrado na natureza. Juntamente com o níquel que é um elemento amplamente utilizado no setor industrial, pois a utilização como elemento de liga normalmente ressalta as propriedades do elemento de base produzindo superligas. Em função disso, avaliar o comportamento elétrico e mecânico dessas duas ligas após o tratamento térmico de recozimento é uma importante contribuição para a ciência de materiais, visando sua possível utilização na produção de cabos de distribuição de energia elétrica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar o efeito do níquel na macroestrutura das ligas de alumínio e seu comportamento elétrico e mecânico das ligas Al- 0,5%Ni e Al- 1,5%Ni fundidas por método convencional quando tratadas termicamente a 280 °C e 400 °C em nos tempos de 1 h e 4 h.

1.2.2. Objetivo Específico

- ❖ Comparar as características macroestruturais das ligas Al- 0,5% e 1,5%Ni, analisando sua morfologia após o processo de solidificação;
- ❖ Analisar a condutividade elétrica das ligas com e sem tratamento térmico após o processo de laminação, nos fios com 3 mm de diâmetro;

- ❖ Avaliar o LRT (Limite de Resistência a Tração) nas amostras não tratadas e tratadas termicamente, após o ensaio de condutividade, correlacionando os resultados das propriedades elétricas e mecânicas.

- ❖ Analisar a região da fratura após o ensaio de tração, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco sessões:

- ❖ Seção 2: Nela é apresentada uma revisão bibliográfica, a respeito do assunto estudado, contendo trabalhos recentes e relevantes para as discussões feitas posteriormente.

- ❖ Seção 3: Consta os materiais e métodos utilizados para a fundição e caracterização das ligas estudadas.

- ❖ Seção 4: Os resultados obtidos nos ensaios são mostrados e discutidos.

- ❖ Seção 5: Neste tópico são apresentadas as conclusões dos resultados anteriormente discutidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Ligas metálicas

As ligas metálicas são preparadas a partir da mistura de metais quando estão no estado líquido. As propriedades de uma liga metálica podem variar bastante conforme sua composição, deslocando-as para condições desejáveis. Isso permite que propriedades como dureza, maleabilidade, ductilidade, condutividade térmica e elétrica, resistência à tração e à corrosão, possam ser alteradas de forma a atender às especificações dos projetos de engenharia (FREITAS, 2010).

De acordo com Prazeres (2014), esses materiais podem até apresentar semimetais e não-metais, mas sempre com predominância dos elementos metálicos. As ligas são, normalmente, desenvolvidas para modificar ou acrescentar propriedades diferentes dos metais de base que as formam. Essa união de elementos normalmente metais e semimetais influenciam diretamente em suas propriedades solicitadas de determinadas ligas, buscando a melhora das propriedades sem perdas de outras.

2.2. O alumínio

O alumínio é um metal leve com densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$ de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Seu ponto de fusão corresponde a $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Sua baixa densidade torna-o um metal de grande utilidade em vários campos de aplicação, como construção civil, transporte ferroviário, rodoviário, aéreo, naval e na indústria mecânica. Entretanto, a sua resistência mecânica é baixa, pois no estado puro – 99,99% de Al – seu valor gira em torno de 5 kgf/mm^2 a 6 kgf/mm^2 (50 MPa a 60 MPa). No estado encruado (laminado a frio, com redução de 75 %), sobe para cerca de $11,5 \text{ kgf/mm}^2$ (115 MPa). Sua ductilidade é elevada: alongamento de 60 % a 70 %, sua resistência a corrosão é boa, devido à formação de oxido superficial Al_2O_3 , que é muito estável (CHIAVERINI, 2003).

Esse metal também oferece um bom comportamento de aquecimento e resfriamento. Alguns trocadores e dissipadores de calor em alumínio são utilizados em larga escala nas indústrias alimentícia, automobilística, química, aeronáutica, petrolífera etc. Presente nas embalagens e utensílios domésticos, essa característica confere ao alumínio a condição de melhor condutor térmico, o que na cozinha é extremamente importante (ABAL, 2014).

Desta maneira o alumínio é um excelente meio de transmissão de energia, seja elétrica ou térmica. Um condutor elétrico de alumínio pode conduzir tanta corrente elétrica quanto um de cobre, que é duas vezes mais pesado e, conseqüentemente mais caro. Por isso, o alumínio é muito utilizado pelo setor de fios e cabos (ABAL, 2014).

Vale ressaltar que o alumínio (Al), tem a segunda maior condutividade elétrica dos metais não preciosos, perdendo apenas para o cobre que, entretanto, apresenta vários obstáculos para o seu uso em função do alto custo (MARQUES, 2008).

Possuindo facilidade de conformação devido à alta maleabilidade e ductilidade, possibilitando adequar sua forma aos mais variados projetos. Com isso pode-se afirmar também que o alumínio possui uma alta trabalhabilidade, característica definida como sendo “a capacidade de ser submetido a deformações sem sofrer fissuras, além de endurecer gradativamente” (FREITAS, 2010).

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. A adição dos diferentes elementos de liga no Al para aumentar sua resistência, que está condicionada a possibilidade de serem ou não solúveis no mesmo (FREITAS, 2010).

Essas propriedades do alumínio são atraentes para o setor industrial, porém ele puro, não possui uma boa resistência mecânica, sendo necessário de inserir elementos de ligas que visem aumentar essa propriedade, melhorando a resistência do material a deformação sem a perda de sua capacidade de condução de corrente elétrica.

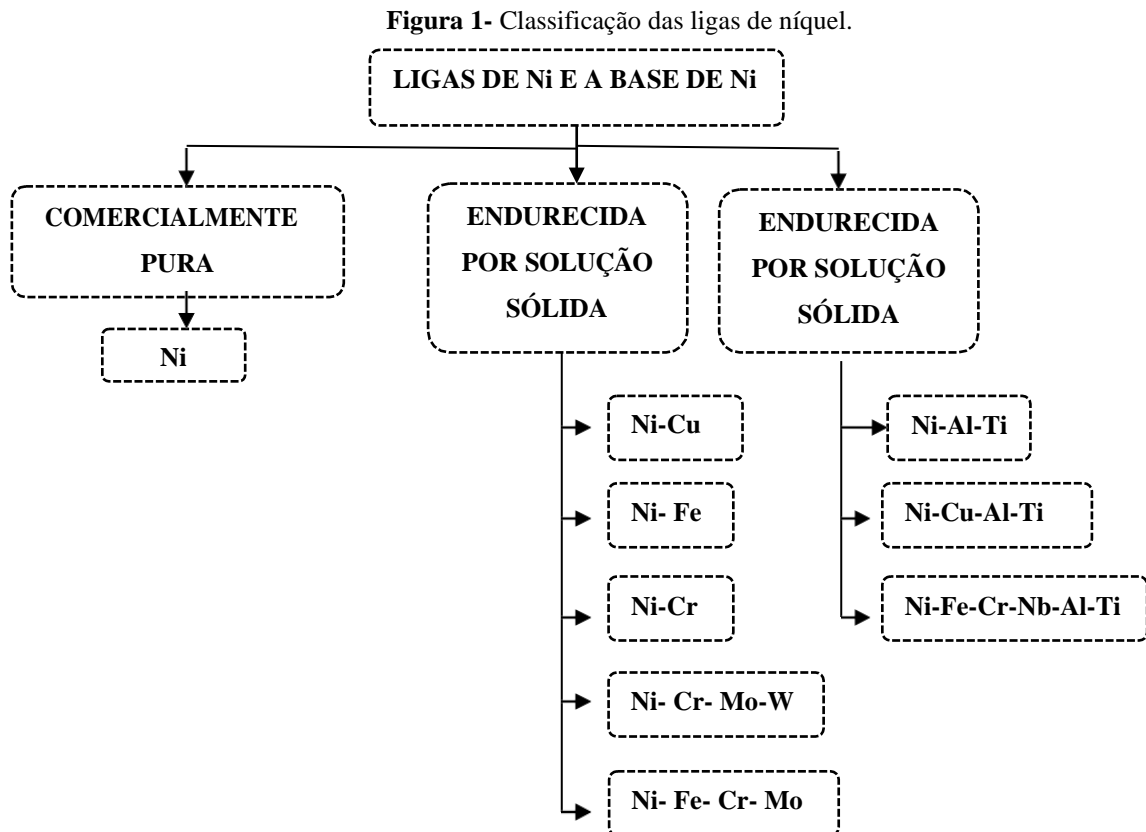
2.3. O níquel

O níquel foi descoberto por um cientista sueco em 1751, entretanto não havia aplicações úteis do elemento até o final do século XIX. A família de ligas de base de níquel desenvolveu-se no início dos anos 1900 e quantidades significativas de níquel começaram a ser usados em materiais de engenharia na década de 1920. A primeira liga principal à base de minério contendo níquel era composta 67% de níquel e 33% de cobre (MORAES, 2022).

De acordo com Dantas (2014), o níquel é um dos poucos metais solúveis em alumínio, capaz de formar intermetálicos como Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi$, Al_3Ni_5 e $AlNi_3$, que produzem efeitos pronunciados nas propriedades mecânicas, mesmo presente em pequenas quantidades.

As ligas à base de níquel são uma das classes de materiais altamente empregadas na engenharia hoje em dia, são materiais usados em ampla variedade de aplicações. São ligas

selecionadas para resistência à corrosão em meio aquoso e a alta temperatura, ductilidade e resistência a baixas temperaturas, propriedades elétricas específicas entre outras (MORAES, 2022). A maioria dessas ligas é conhecida por seu nome comercial, sendo classificadas de acordo com sua composição, como mostrada na Figura 1.



Fonte: Adaptado de LIPPOLD, 2004.

De acordo com Moraes (2022), as superligas a base de níquel, Cr, Mo, Nb, sendo a matriz do níquel pode dissolver grande quantidade de elementos de liga em várias combinações para fornecer endurecimento por solução sólida. O níquel possui quase que solubilidade completa com ferro, solubiliza aproximadamente 35% de cromo, 20% de molibdênio e tungstênio, cada, e 5 a 10% de alumínio, vanádio, titânio e manganês.

2.4. Ligas de alumínio

O Alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações. Sua aplicação como metal estrutural só é menor que a dos aços. Em fundição, os elementos são acrescentados ao alumínio para algumas destas razões: melhorar as características de fundição; aumentar a fluidez; reduzir a fragilidade; dar ao produto acabado certas características desejadas (maior resistência à corrosão, resistência mecânica, usinabilidade, soldabilidade) ou ainda tornar a liga suscetível ao tratamento térmico (MARQUES, 2008).

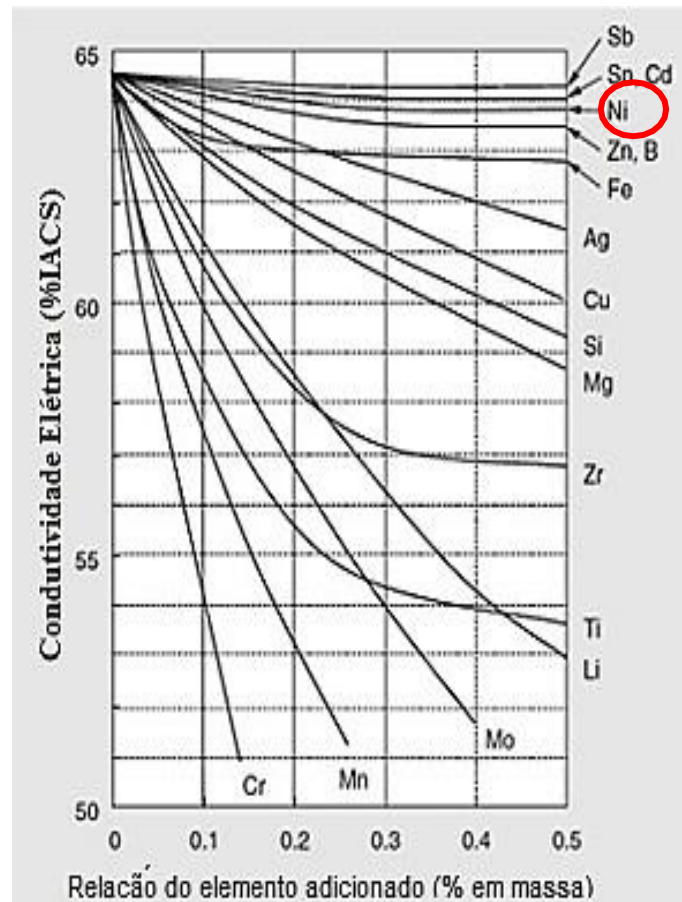
No metal de base são adicionados elementos de liga para obtenção de materiais com propriedades desejadas, no qual chama-se de ligas metálicas. A busca por aprimoramentos de propriedades dos materiais metálicos culminou no desenvolvimento de inúmeras ligas com as mais diversas combinações de elementos ligantes (PRAZERES, 2014).

A adição de elementos de liga aumenta a resistência das ligas através do endurecimento por solução sólida ou endurecimento por precipitação. Este endurecimento ocorre através da formação de barreiras que dificultam o movimento das deslocamentos. Quantas mais barreiras, mais energia é necessária para o movimento das deslocamentos, tornando-se mais difícil deformar plasticamente o metal (TOTTEN, 2003).

Em relação ao endurecimento por precipitação, que será tratado em detalhe mais à frente por ser o mecanismo principal de endurecimento da liga estudada, consiste na formação de partículas duras de segunda fase, que também formam barreiras à movimentação das deslocamentos afetando assim a resistência da liga, que aumenta consideravelmente (MARQUES, 2008).

De acordo com Machado (2012) a adição de outros metais para a formação de ligas altera suas propriedades elétricas e mecânicas. A modificação estrutural promovida em algumas de suas ligas via aplicação de tratamentos térmicos, também afeta estas propriedades. Alguns elementos em solução sólida, quando controlados promovem melhoras nas propriedades do material, como mostrado na Figura 2.

Figura 2- Influência dos elementos de liga sobre a condutividade elétrica do alumínio.



Fonte: Adaptado de HORIKOSHI et al, 2006.

Para este trabalho foi utilizado o níquel, elemento destacado acima na Figura 2, nas porcentagens descritas na metodologia.

2.5. Efeito do níquel sobre as ligas de alumínio

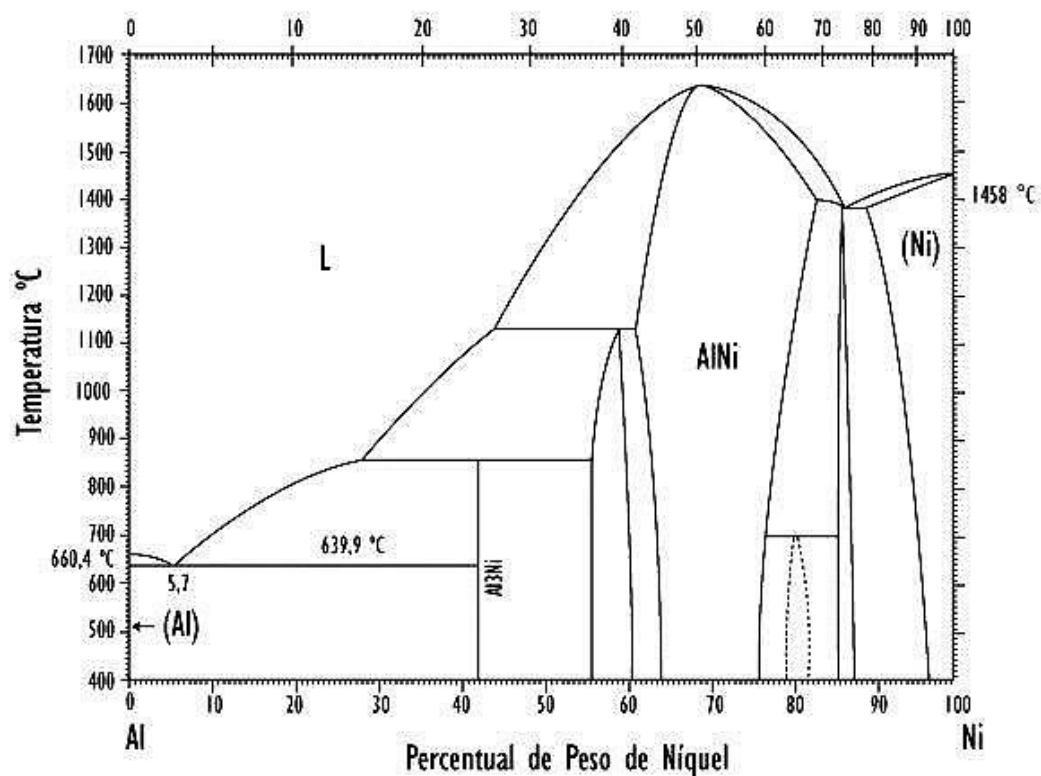
O níquel é o elemento mais comumente utilizado em conjunto com o cobre para realçar as propriedades do material à altas temperaturas. Também é responsável pela redução do coeficiente de expansão térmica da liga (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Ele tem uma elevada resistência à corrosão, mesmo a altas temperaturas e é usado principalmente como um elemento de liga para aumentar a resistência à corrosão. O níquel é quase insolúvel em alumínio (solubilidade de níquel é de cerca de 0,05% em peso a 640° C e menos de 0,005% em peso a 450°C).

O Ni em até 2% em peso resulta em um aumento de resistência da liga, contudo, reduz sua ductilidade. A adição de teores de abaixo de 0,05% Ni, permitem que a liga seja tratada

termicamente (BATALU; GEORGETA; ANGEL, 2006). Na Figura 3 apresenta o diagrama binário das ligas de alumínio com percentual atômico de níquel.

Figura 3- Diagrama binário das ligas alumínio e níquel.



Fonte: Adaptado de HORIKOSHI et al, 2006.

A adição de Ni, na presença de tratamento térmico de envelhecimento, faz com que a liga de alumínio tenha boa resistência mecânica sem uma perda considerável de suas propriedades elétricas, o que sugere que este material pode ter potencial uso na indústria (PRAZERES, 2016).

2.6. Fundição dos metais

O processo de fabricação por fundição é aquele em que se obtêm peças pela aplicação de temperaturas acima do ponto de fusão do metal ou da liga desejada, com subsequente solidificação e resfriamento em um molde (PARIS, 2008).

O molde, item que receberá o metal no estado líquido, poderá ser fabricado para uma única utilização ou para muitas utilizações. Quando se utiliza o molde em mais de uma vez, o mesmo é denominado permanente e é construído em materiais que tenham um ponto de fusão

superior ao do metal a ser fundido. O molde permanente também é comumente chamado de coquilha e é largamente utilizado na fabricação de peças como alumínio e suas ligas, pois o molde é quase sempre fabricado em aço que tem ponto de fusão muito superior ao do alumínio (MASSARO, 2017).

O objetivo fundamental da fundição é o de dar forma adequada ao metal, vertendo-o em estado líquido dentro da cavidade de um molde com a forma desejada, o próprio molde retira calor do metal líquido provocando sua solidificação e fixando sua forma inicial. Apesar da extrema simplicidade desse objetivo (FREITAS, 2010).

2.7. Solidificação dos metais

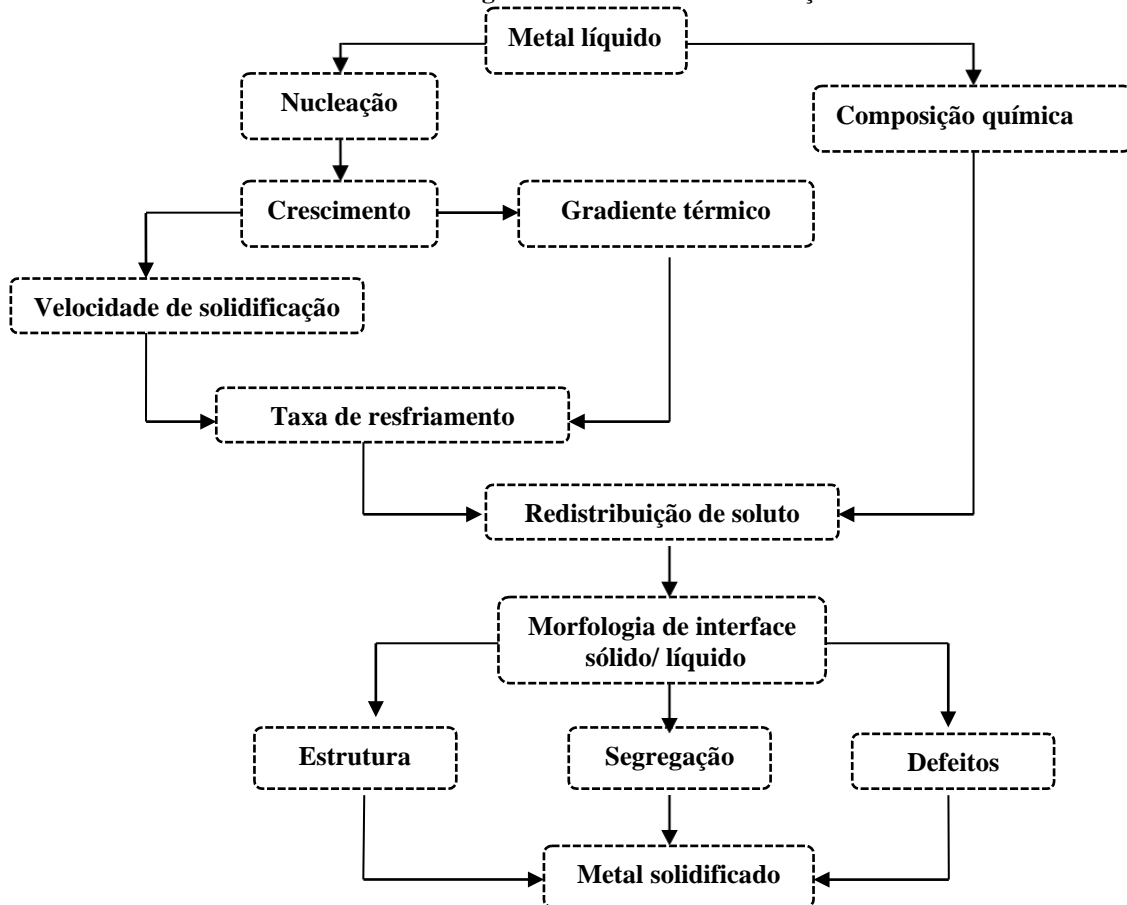
2.7.1. Solidificação convencional

A solidificação de metais e ligas é caracterizada por uma transformação de fase com mudança de estado, em que a fase líquida se transforma em uma fase sólida, quando as condições termodinâmicas são tais que o sólido apresenta menor energia livre, devido a liberação de calor latente, tornando-se mais estável; dá-se através da nucleação e do crescimento de partículas da fase sólida no interior da fase líquida (SANTOS, 2006).

Desta maneira as transformações do metal líquido em um sólido envolvem a remoção do superaquecimento do líquido, do calor latente de fusão na interface sólido/líquido devido à transformação de fase e do calor sensível da casca solidificada (MARQUES, 2008).

A solidificação do metal no molde não se efetua de modo passivo, como pode parecer a primeira vista, a transformação líquido-sólido por que passa o metal é de natureza ativa e dinâmica, já que durante a mesma ocorrem diversos eventos que, se não forem devidamente controlados, podem comprometer o desempenho do produto final ou, até mesmo, interromper a sequência de fabricação. Tais eventos podem dar origem a diversos tipos de heterogeneidades que interferem drasticamente na qualidade metalúrgica do produto (FREITAS, 2010). A Figura 4 apresenta as variáveis durante o processo de solidificação, como: velocidade, gradiente térmicos, composição química e os fatores de qualidade do metal solidificado, correlacionando com os fatores resultantes desse processo, que implicaram diretamente no desempenho do produto.

Figura 4- Processo de solidificação.



Fonte: Adaptado de DANTAS, 2014.

Conforme Garcia (2001), a estrutura bruta de solidificação determina as propriedades finais também dos produtos oriundos de conformação, embora muitos defeitos desapareçam macroscopicamente com o processo de deformação, interferindo em suas propriedades mecânicas, elétricas e químicas.

2.8. Estruturas características da solidificação

De acordo com Garcia (2007) a estrutura bruta de solidificação de um modo geral pode ser discutida a partir das macroestruturas observadas em lingotes. Quando o metal líquido é vazado em uma lingoteira, a parte que entra em contato com as paredes frias da lingoteira é rapidamente super-resfriada, e, nessa fina camada de líquido super-resfriado, ocorre uma nucleação intensa de grãos cristalinos de orientação aleatória.

Qualquer processo baseado na solidificação de um metal com o objetivo de produzir uma peça sólida, deve atender certas exigências, que dependem de sua aplicação futura, e que

decorrem de aspectos estruturais e geométricos. Sabe-se que as propriedades finais do fundido dependerão da estrutura solidificada, por consequência de diversos fatores do processo que a controlam, como o fluxo de calor do metal líquido, propriedades químicas e termofísicas do metal em estudo, condições de vazamento e propriedades do sistema de solidificação (PEIXOTO, 2009).

De maneira geral, nos materiais policristalinos é possível, após a sua solidificação, identificar-se três zonas estruturais distintas. A zona coquilhada, que é formada por uma camada de grãos cristalinos de orientações aleatórias, normalmente de pequenas dimensões, localizados junto às paredes do molde. Após a zona coquilhada, tem-se a zona colunar, onde os grãos cristalinos são alongados e alinhados paralelamente à direção do fluxo de calor, isto é, perpendiculares às paredes do molde. A terceira zona, equiaxial central, é constituída por uma região central de grãos cristalinos sem orientações preferenciais e de dimensões relativamente grandes quando comparados com os grãos coquilhados (PRAZERES, 2016).

2.8.1. Zona coquilhada

A zona coquilhada é formada por uma camada de grãos cristalinos com orientações aleatórias, normalmente de pequenas dimensões, localizados junto às paredes do molde, resultado do primeiro contato do metal líquido com o molde frio no vazamento. As altas taxas de resfriamento obtidas irão provocar uma rápida diminuição local da temperatura e favorecer uma nucleação intensa de grãos. Esse decréscimo de temperatura ocasionará um super-resfriamento térmico; com isso, os primeiros grãos cristalinos começam a se desenvolver de forma e tamanho pequenos, quase sempre uniformes, constituindo uma fina camada de grãos de crescimento 13 aleatório junto às paredes do molde (PERES, 2005).

Conforme Lima (2014), o tamanho dessa zona depende de uma série de fatores dentre os quais cita-se as propriedades termofísicas do material do molde, e o coeficiente de transferência de calor metal/molde e temperatura de vazamento do metal líquido.

2.8.2. Zona colunar

A zona colunar é constituída por grãos alongados e alinhados paralelamente à direção do fluxo de calor, ou seja, normais às paredes do molde. Inicia-se a formação desta zona pelo

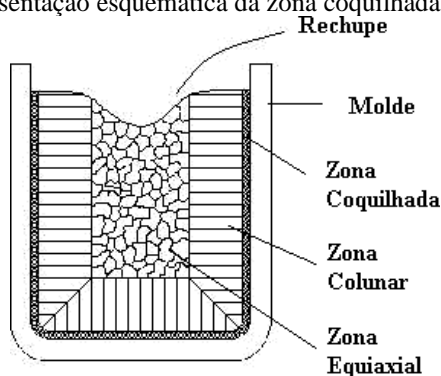
crescimento dos grãos formados a partir dos núcleos oriundos do rápido resfriamento do líquido nos instantes iniciais da solidificação, e que apresentam direção cristalográfica favorável ao crescimento na direção da extração de calor. Esses núcleos tendem a crescer mais rapidamente que os outros, bloqueando o crescimento dos demais grãos coquilhados (DANTAS, 2014). Os grãos assim formados são alongados e de dimensões bem maiores que os grãos da zona coquilhada, apresentando ainda direções cristalográficas fortemente orientadas (PERES, 2005).

2.8.3. Zona equiaxial

A terceira zona macroestrutural é denominada de equiaxial, e é constituída por grãos cristalinos sem orientações preferenciais e de dimensões relativamente grandes quando comparados aos grãos coquilhados. Diferentemente do crescimento da zona colunar, a zona equiaxial é caracterizada por grãos que crescem com direções cristalográficas aleatórias, como o observado na Figura 5 (PEIXOTO, 2009; PERES, 2005).

Os grãos equiaxiais podem surgir como decorrência de eventos isolados de nucleação, a partir da zona colunar ou da nucleação de cristais na superfície livre do líquido. Os núcleos geradores têm várias origens, mas só podem crescer após o líquido ter atingido temperaturas abaixo da *liquidus* (GARCIA, 2001).

Figura 5- Representação esquemática da zona coquilhada, colunar e equiaxial.



Fonte: GARCIA, 2001.

2.9. Tratamento térmico

O alumínio e suas ligas podem ser tratados de modo a obter a combinação de propriedades mecânicas e físicas desejadas. Os tratamentos térmicos baseiam-se na variação das solubilidades dos elementos microestruturais. Como a solubilidade dos elementos

aumenta com o aumento da temperatura até à temperatura de *solidus*, pode-se controlar a solidificação e posterior envelhecimento de forma a controlar a formação e distribuição das fases precipitadas que influenciam as propriedades do material (ZOLOTOREVSKY; GLAZOFF, 2007).

A nomenclatura dos tratamentos térmicos para ligas de alumínio fundidas é apresentada na Quadro 1. Os tratamentos designados pela letra “T” têm como objetivo aumentar a resistência mecânica das ligas de alumínio através de tratamentos térmicos. Este é o processo mais importante para o endurecimento e aumento das propriedades de resistência das ligas de alumínio para fundição, sendo designado por endurecimento por precipitação (ZOLOTOREVSKY; GLAZOFF, 2007).

Quadro 1-Tratamentos térmicos para ligas de alumínio fundidas.

F	Tal como fabricado; Refere-se à condição resultantes após vazamento, em que não foram realizados controlos sobre a velocidade de arrefecimento.
O	Estado recozido; nos produtos fundidos, indica um recozimento para alívio de tensões e estabilidade dimensional, levando ao estado com menor resistência mecânica e de maior ductilidade.
T1	Envelhecimento natural; O produto é arrefecido desde a temperatura a que é fundido e envelhecido naturalmente até a um estado de propriedades mecânicas estáveis.
T4	Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural para um estado de propriedades mecânicas estáveis.
T5	O produto é arrefecido desde a temperatura a que é fundido e seguidamente envelhecido artificialmente.
T6	Tratamento térmico de solubilização e seguidamente envelhecido artificialmente.
T7	Tratamento térmico de solubilização e seguidamente envelhecimento artificial para um estado de propriedades mecânicas estáveis. Designado também por sobre envelhecimento.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2012.

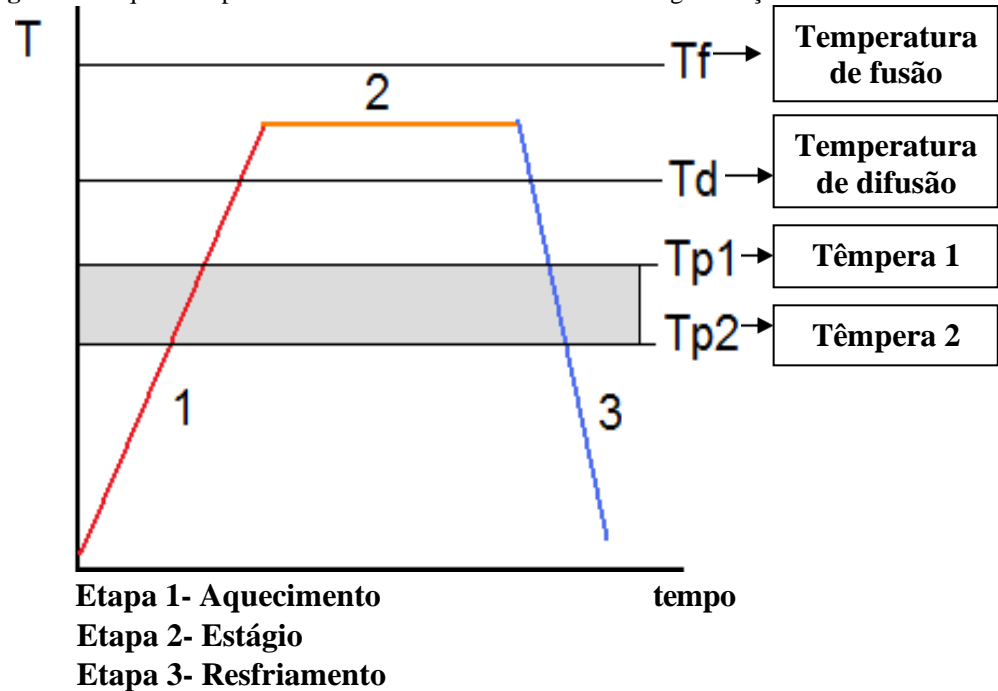
De acordo com Prazeres (2014), a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. É necessário que o tratamento térmico seja escolhido e aplicado criteriosamente, para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo. Os fatores a serem inicialmente considerados no tratamento térmico são: o aquecimento, o tempo de permanência a temperatura de aquecimento e o resfriamento.

2.9.1. Recozimento

O recozimento é normalmente aplicado com intuito de homogeneizar uma peça antes de se proceder para a extrusão. Um tratamento de homogeneização típico para as ligas de alumínio consiste num aquecimento até uma temperatura perto da temperatura de *solidus*

seguido por um estágio a esta temperatura e, finalmente, por um arrefecimento a uma taxa pré-determinada, observado na Figura 6 (NOGUEIRA, 2012).

Figura 6- Esquema representativo de um ciclo térmico de homogeneização.



Fonte: Adaptado de NOGUEIRA, 2012.

Os cabos fabricados com as ligas de alumínio apresentam características de recozimento e fluência em alta temperatura significativamente superior em relação ao alumínio 1350 (alumínio comercialmente puro). Devido a essas características, um condutor 32 com alumínio termorresistente pode ser utilizado em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150°C sem que haja deterioração das características mecânicas, tais como: tração, alongamento e dureza, já para condutores de alumínio 1350 a temperatura máxima recomendável para regime contínuo de trabalho está em torno de 90 °C (RÉGIS JÚNIOR, 1999).

2.10. Parâmetros estruturais

2.10.1. Deformação plástica

A resistência mecânica de um metal durante a deformação plástica é elevada, devido o aumento da densidade de discordâncias, que são os defeitos lineares do material. Esse aumento da densidade das discordâncias se dá pela distorção de sua rede cristalina. Segundo a lei de Schmid, ao aplicarmos uma tensão acima do limite de escoamento do material, as discordâncias deslizam em seus planos cristalinos (ASKERLAND; PHULÉ, 2008).

A maioria da energia gasta na deformação de um metal por trabalho a frio é convertida em calor. Entretanto, cerca de 10% da energia gasta são armazenados na estrutura causando um aumento na energia interna. A grandeza da energia armazenada aumenta com o ponto de fusão do metal e com a adição de soluto. Por tanto, em muitos casos, este processo pode realmente iniciar-se durante a deformação plástica e, quando isso ocorre, diz-se que o metal sofreu recuperação dinâmica (FREITAS, 2010).

Outro fenômeno para compreender melhor o comportamento mecânico de uma liga é através da avaliação de seus dimples (microcavidades). Esse mecanismo, de acordo com Cavalcante (2016) consiste na nucleação em partículas de segunda fase e que a presença de um número considerável de dimples se traduz em maior ductilidade ao material.

2.10.2. Encruamento

O metal quando conformado plasticamente a frio absorve até 10% da energia utilizada em sua deformação, a parte restante perde-se na forma de calor. A energia armazenada no metal é “retida” na forma de energia dos defeitos da rede cristalina, os quais se formam com a deformação plástica (LOBATO, 2016).

Um cristal metálico sofre um processo de encruamento quando deformado plasticamente. O fenômeno de *encruamento* pode ser representado numa curva tensão de cisalhamento versus deformação tangencial (decompostos no plano e na direção de deslizamento), onde se observa a elevação da tensão com o aumento da deformação (BRESCIANE et al., 1997).

Algumas propriedades dos metais são alteradas pelo encruamento, que é obtido, nos produtos metálicos, através de processos de conformação plástica realizados com um trabalho a frio, a uma temperatura – comumente a ambiente – que não pode ultrapassar a temperatura de recristalização, ou seja, a uma temperatura que deve ser bem inferior à temperatura de fusão do metal (FREITAS, 2010).

2.10.3. Recuperação

Na recuperação estática de maneira geral, há pouca variação na resistência mecânica e na dureza, que dependem principalmente da densidade das discordâncias, mas uma redução sensível da resistividade elétrica, que depende principalmente dos defeitos intersticiais, tendendo a recuperar seu valor original (SANTOS, 2006).

De acordo com Freitas (2010), na recuperação dinâmica, a tensão aplicada que provoca a deformação do material se adiciona às tensões que agem entre as discordâncias. Assim, os efeitos da recuperação dinâmica podem ser observados a temperaturas muito baixas, onde as tensões aplicadas podem ser elevadas. A recuperação dinâmica tende a diminuir a velocidade de encruamento e não é igual em todos os metais.

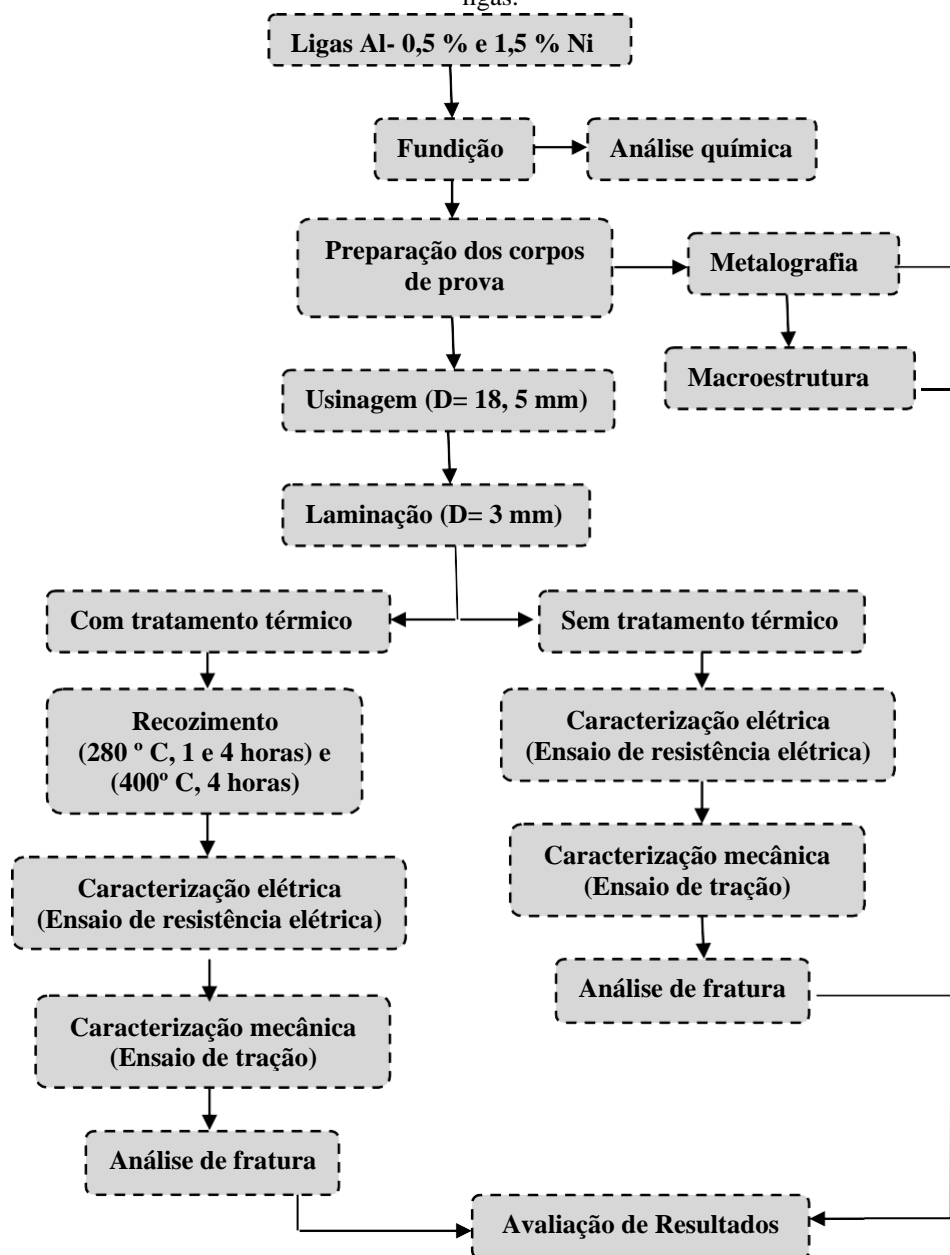
Para Espíndola (2022), o termo recuperação refere-se às mudanças nas propriedades de um material deformado que acontece antes da recristalização; estas mudanças restabelecem parcialmente os valores das propriedades mecânicas aos valores anteriores à deformação. Sabe-se que a recuperação acontece nestas circunstâncias, principalmente devido a mudanças no arranjo das discordâncias provocadas no material.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Metodologia

Foi utilizado método de fundição convencional partindo do alumínio com pureza de 99,8% adicionando 0,5% e 1,5% níquel. Os equipamentos utilizados neste trabalho para caracterização destas ligas estão descritos abaixo em cada etapa dos métodos, o fluxograma da Figura 7 descreve a metodologia aplicada.

Figura 7- Fluxograma detalhando os processos metalúrgicos realizados nas duas ligas.

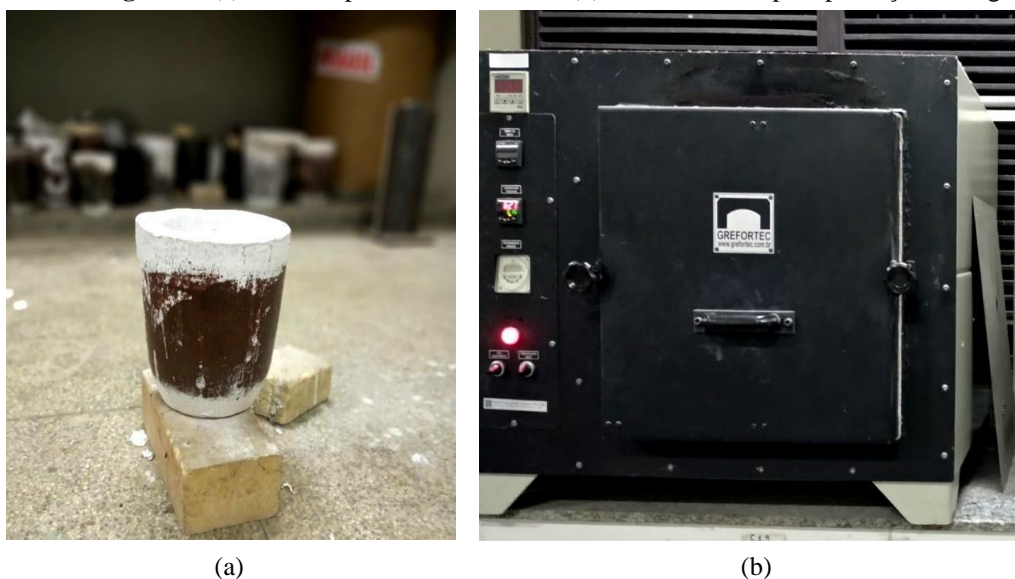


3.2. Fundição e solidificação

As ligas foram vazadas em cadinhos de SiC, Figura 8 (a), que primeiramente foi aquecido no forno de marca GREFORTEC Figura 8 (b), até uma temperatura de 400 °C para eliminação da umidade que pode ter sido absorvida da atmosfera, em seguida retirado e pintado com caulim que é um material formado por silicatos hidratados de alumínio, sua utilização se deu devido a sua propriedade de cobertura quando utilizado como pigmento diluído em H₂O, possuindo baixa condutividade térmica que gerou um excelente material para revestimento interno no cadinho.

Segundo os estudos do autor Prazeres (2014) para este procedimento, após o pré-aquecimento, o cadinho foi aquecido no forno até a temperatura chegar a 900 °C, permanecendo por 30 minutos para formação dos vidrados que auxiliam na resistência e durabilidade do recipiente.

Figura 8- (a) Cadinho pintado com caulim; (b) forno utilizado para produção das ligas.



Fonte: Autora, 2023.

Em seguida, foram adicionados o alumínio e níquel retornando o cadinho permanecendo no forno por mais uma hora e trinta minutos temperatura estimada pelo autor Prazeres (2014), cujo seja suficiente para a difusão dos elementos, após a constatação da fundição total dos elementos o cadinho e retirado do forno para a realização da homogeneização como observado na Figura 9 (a) e (b). Utilizando uma espátula de aço, que

anteriormente foi aquecida em uma estufa e pintada com caulim evitando a aderência do material durante a agitação vigorosa. Posteriormente, em consonância com a metodologia utilizada por Prazeres (2014), foi injetado o argônio na vazão de 0, 2 l/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10 mm³ durante 1 minuto, para a remoção de gases e impurezas com baixa densidade, foi formado na superfície do banho uma camada de escória que o protege contra a reincidência de gases nocivos ao banho metálico.

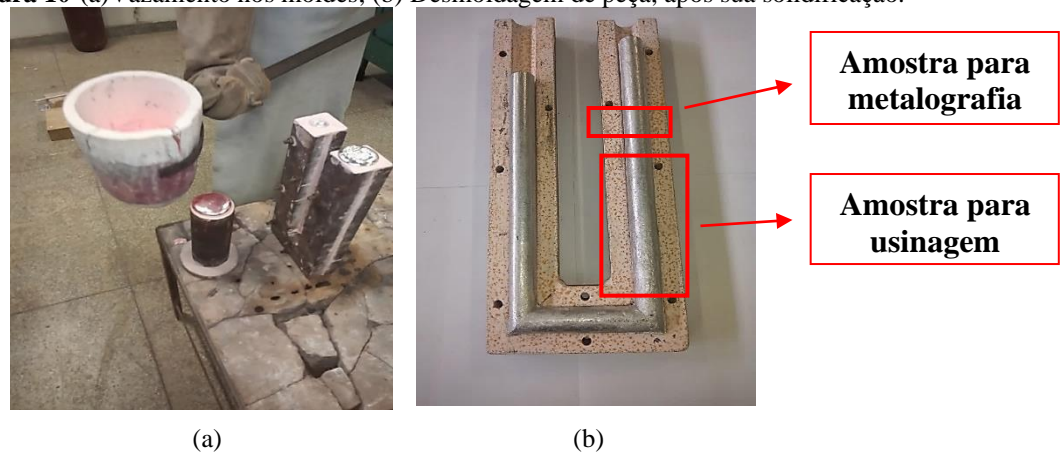
Figura 9- (a) Retirada do cadinho do forno para homogeneização do material; (b) Injeção do gás argônio.



Fonte: Autora, 2023.

O vazamento foi realizado de maneira contínua do banho metálico no molde em formato de U e na coquilha de ferro, usada para retirar amostras para análise química, Figura 10 (a), que foi anteriormente lixada, aquecida e pintada com solução de caulim juntamente com a espátula de aço. O desmolde da peça foi realizado após 24 horas, tempo necessário para total solidificação, Figura 10 (b). Em seguida foi realizado um corte para a retirada de uma amostra para a metalografia, outra para usinagem e análise química.

Figura 10-(a)Vazamento nos moldes; (b) Desmoldagem de peça, após sua solidificação.



Fonte: Autora, 2023.

3.3. Análise química

Para realização da análise química foi retirada uma amostra das duas ligas após o desmolde das peças solidificadas na coquilha, sendo primeiramente preparada através do lixamento nas lixas: 80 a 1500 meshes, em seguida direcionadas ao aparelho espectrometro ótica de massa, da marca OXFORD- Foundry Master Xpert, Figura 11. Onde os resultados foram obtidos a partir da média de no mínimo três leituras da composição química da amostra, o ensaio foi destrutivo pois ocorreu a queima no ponto analisado.

Figura 11- Espectrômetro óptico de massa.



Fonte: Autora, 2023.

3.4. Metalografia

Após a desmoldagem do material, retirou-se uma seção das duas ligas para realização da metalografia. Foram utilizadas as lixas desbastadoras de granulometria: 80,120, 220, 320, 400 para nivelar as peças e lixas de acabamento: 600, 800, 1000, 1200 e 2000 para deixar as peças mais regulares para a análise Figura 12(a). Em seguida, foi realizado o polimento utilizando aluminas líquidas: 1 μ ; 0,5 μ e 0,3 μ para retirar os riscos das lixas e melhorar o acabamento nas peças Figura 12(b).

Figura 12-(a) Lixamento manual das peças; (b) Polimento automático realizado na politriz.



(a)



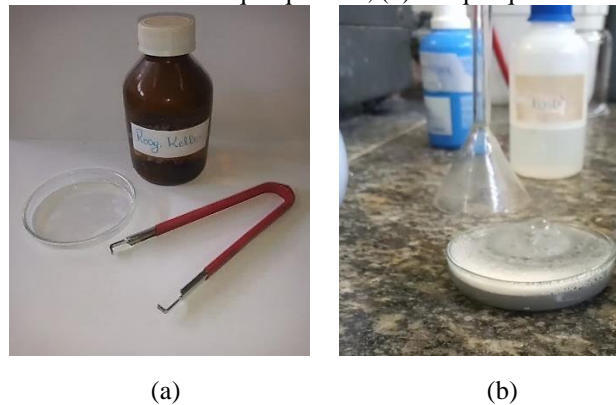
(b)

Fonte: Autora, 2023.

3.5. Macroestrutura

Posteriormente a metalografia, foi realizado o ataque químico nas peças das duas ligas para a revelação das macroestruturas das ligas. Foi realizado o ataque químico com reagente Keller pelo método de imersão durante 10 segundos, Figura 13 (a) e (b). Em seguida, foi verificada a olho nu ou com uma ampliação de no máximo 10 vezes, de uma superfície plana.

Figura 13- (a) Materiais usados no ataque químico; (b) Ataque químico realizado por imersão.

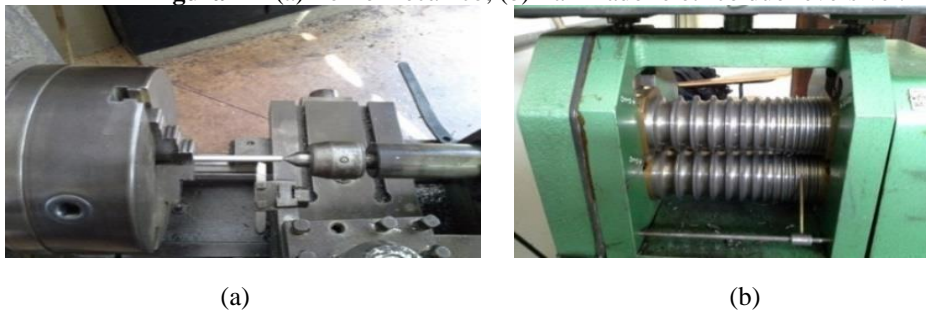


Fonte: Autora, 2023.

3.6. Produção dos fios

Para produção dos fios, após as peças serem desmoldadas e seccionadas, foram usinadas no torno Figura 14 (a), para diminuição do diâmetro de 22,5 mm para 18,5 mm, com objetivo de facilitar o processo de laminação a frio. Em seguida, estas foram conformadas em laminadoras semi industrial de marca MENAC elétrico duo reversível, Figura 14 (b). Desta maneira, as peças foram conformadas através dos canais até o diâmetro de 3,0 mm.

Figura 14- (a) Torno mecânico; (b) Laminador elétrico duo reversível.



Fonte: ESPÍNDOLA, 2022.

3.7. Tratamento térmico

Os fios produzidos no processo de laminação, foram cortados no tamanho de 400 mm e em seguida tratados termicamente em estufa de marca NEVONI, Figura 15. Foram realizados o tratamento térmico de recozimento nas ligas, nas seguintes temperaturas: 280 °C e 400 °C. Na temperatura de 280 °C foram utilizados dois tempos de 1 hora e 4 horas, essa foi especificada pela norma ASTM B941, utilizada como padrão normativo para ensaios de tração em fios de liga Al-Zr para aplicações elétricas.

Finalmente, para temperatura de 400 °C foi utilizado o tempo de 4 horas, sendo especificada para este trabalho com base no estudo do tratamento térmico e da modificação da liga Al-0,05%pcu- [0,24-0,28]%pFe-0,6%pMg com a adição de 0,03%Ni (PRAZERES, 2014).

Figura 15- Estufa usada no tratamento térmico das ligas.



Fonte: Autora, 2023.

3.8. Caracterização elétrica

Posteriormente ao processo de laminação e tratamento térmico, foi realizado o ensaio de condutividade elétrica com o auxílio do microhmímetro MEGABRÁS (ponte de kelvin), modelo MPK-2000, Figura 16. A análise consiste em calcular as resistências elétricas dos fios foram medidas a uma temperatura superior a 10 °C e inferior a 30 °C e corrigida para a temperatura de 20 °C como a norma NBR 5118 recomenda. Após a obtenção dos resultados a

partir da leitura das resistências dos corpos de provas para o diâmetro de 3 mm, utilizar a equação fornecida pela norma NBR 6814 mostrada na Equação 1.

$$R_{20} = R_t \left[\frac{1}{1 + \alpha(t-20)} \right] \quad (1)$$

onde:

t = temperatura na qual foi efetuada a medição, °C;

R_t = resistência a T °C, em Ω;

R₂₀ = resistência corrigida a 20 °C, em Ω;

α = coeficiente de variação da resistência com a temperatura 20 °C, especificado pela norma para liga de alumínio.

Com a resistência corrigida para 20 °C pode-se obter a resistividade que é fornecida através da Equação 2, conforme a norma NBR 6815.

$$R_v = \rho_c \cdot A \quad (2)$$

onde:

R_v = resistência elétrica do corpo de prova por unidade de comprimento a 20 °C, em $\frac{\Omega}{m}$;

ρ_c = resistividade volumétrica do corpo de prova a 20 °C, em $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$;

A = área da secção transversal do corpo de prova, em mm².

Os resultados obtidos foram, em seguida, transformados em condutividade elétrica (IACS), “International Annealed Cooper Standard”, padrão internacional de condutividade correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1 m de comprimento, 1 mm² de seção transversal a 20 °C, através da fórmula:

$$\varphi = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} \quad (3)$$

onde:

φ = a condutividade elétrica do fio em IACS;

ρ_{Cu} = a resistividade elétrica do cobre em $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$.

ρ_{Al} = a resistividade elétrica do alumínio em $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$.

Figura 16- Microhmímetro usado no ensaio



Fonte: Autora, 2023

3.9. Caracterização mecânica

3.9.1. Ensaio de tração

Após o ensaio de condutividade elétrica, os fios foram seccionados em amostras de 200 mm de comprimento para realização do ensaio. A caracterização mecânica foi realizada em uma máquina de ensaio de tração KRATOS modelo IKCL1 – USB mostrada na Figura 17 (a), acoplada a um microcomputador para o armazenamento de dados, os corpos de prova foram adaptados para esse ensaio de acordo com a norma NBR 6810 e NBR ISO 6892, respeitando as distâncias entre garras Figura 17 (b).

Figura 17- (a) Máquina de tração usada no ensaio mecânico; (b) ensaio de tração realizado em fio.



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2023.

3.9.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Segundo Prazeres (2016), a microestrutura das ligas é obtida através de corpos de prova resultantes do ensaio de tração, que são preparados para a caracterização estrutural via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), como observado na Figura 18, que envolve o corte da região da fratura, além de cortes transversal. Em seguida, foi realizada a limpeza das amostras utilizando um aparelho ultrassônico com tanque em aço modelo TESCAN- MIRA3, com ondas que agiram sob uma solução de álcool etílico absoluto, P.A. 99,99 e acetona P.A. Posteriormente, os corpos de prova foram direcionados à caracterização microestrutural, avaliando os aspectos das fraturas microscopicamente, juntamente com softwares que auxiliam na leitura do tamanho e forma.

Figura 18- Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Autora, 2023.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise química

Na Tabela 1, representa os resultados da composição química de forma quantitativa para as duas ligas preparadas e fundidas. Os valores expressos são resultados de uma média realizada de no mínimo três pontos aleatórios para análises. Correlacionando com os valores desejados e os valores reais.

Tabela 1-Composição química das ligas fundidas.

LIGAS	COMPOSIÇÃO DAS LIGAS (%p)	
	ALUMÍNIO	NÍQUEL
Al- 0,5%Ni	98,5	0,65
Al- 1,5%Ni	98,5	1,31

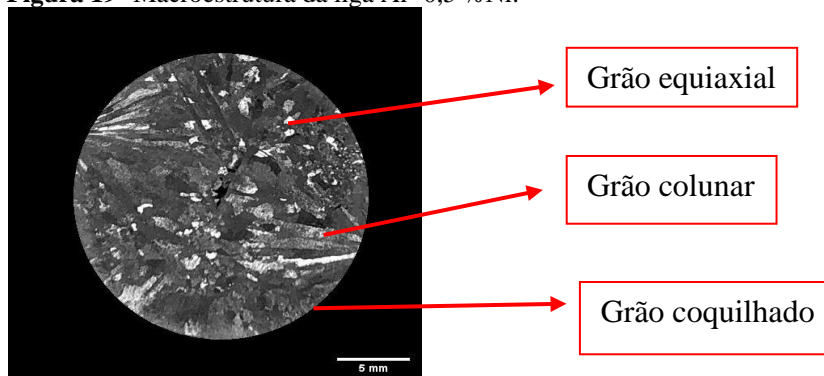
Fonte: Autora, 2023.

Ao analisar os dados obtidos, verificou-se que para liga Al- 0,5% Ni, o teor alcançado estava acima do desejado, com um aumento de 0,15% na composição desejada da liga, podendo implicar diretamente nos resultados obtidos. Diferentemente dos dados verificado na liga Al- 1,5%Ni que houve uma perda de 0,19% no valor desejado, ocasionado durante o processo de fabricação da liga não ocorrendo a completa dissolução do elemento de liga no banho metálico. Apesar dessa variação as duas ligas possuem valores próximos aos estabelecidos para este estudo.

4.2. Macroestrutura

De acordo com Peixoto (2009), as condições termodinâmicas a solidificação se processa dando origem a núcleos, que vão crescendo e formando grãos cristalinos, que definirão a macroestrutura da peça. Onde a macroestrutura de um metal solidificado será caracterizada pelos seus grãos cristalinos, ou seja, suas dimensões, orientações, forma e distribuição. Desta maneira a Figura 19 e 20 apresentam as morfologias das ligas Al- 0,5 e 1,5%Ni, respectivamente.

Figura 19- Macroestrutura da liga Al- 0,5 %Ni.



Fonte: Autora, 2023.

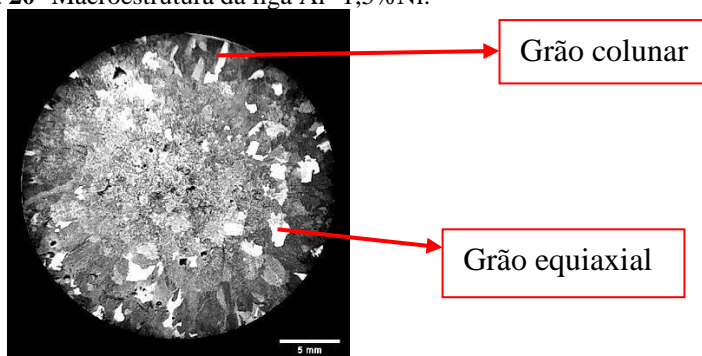
Na liga Al- 0,5%Ni, Figura 19, observa-se presença da zona coquilhada na morfologia da liga após o processo de solidificação. De acordo com Ohno (1976) essa zona é formada devido a precipitação de grãos nucleados de pequenas dimensões sobre as paredes do molde em regiões mais drasticamente resfriadas, como o topo do lingote, para a região de líquido adjacente a essas paredes.

Desta maneira o níquel contribui para formação da primeira zona no processo de solidificação do metal que neste teor poder ser associado a separação de ramos dendríticos dos cristais, provocada pela convecção no líquido durante o processo, como afirma o autor em seus estudos Beskow (2008) que a formação da zona coquilhada se deve a separação de ramos dendríticos dos cristais, provocada pela presença de convecção no líquido.

Em consonância com Gomes (2015) que reforça que na ausência convecção no líquido não ocorre a formação da zona coquilhada. A macroestrutura da Figura 19, apresenta algumas zonas colunares (onde alguns destes grãos) partem da interface metal/ molde até o centro da peça, originários do resfriamento rápido na solidificação do metal que possivelmente favoreceram o crescimento cristalográfico. Nesta morfologia observa-se a presença de grãos equiaxiais no meio dessa zona, com características maiores e diversas direções cristalográficas estando presentes em boa parte da amostra.

Na morfologia apresentada na Figura 20 da liga Al- 1,5%Ni, observa-se que maioria dos grãos são equiaxiais, sendo maiores, com direções aleatórias e presente em toda extensão da amostra, a intensa nucleação dessa fase pode ter ocorrido devido ao aumento da porcentagem de níquel que impediu a formação da zona colunar e provavelmente agiu como controlador de nucleação dentro do processo de solidificação.

Figura 20- Macroestrutura da liga Al- 1,5%Ni.



Fonte: Autora, 2023.

De acordo com Garcia (2001) o bloqueio do crescimento da zona colunar ocorre quando o líquido torna-se super-resfriado, tanto por efeito térmico quanto constitucional, fazendo com que os embriões do sólido ao surgirem cresçam de forma aleatória.

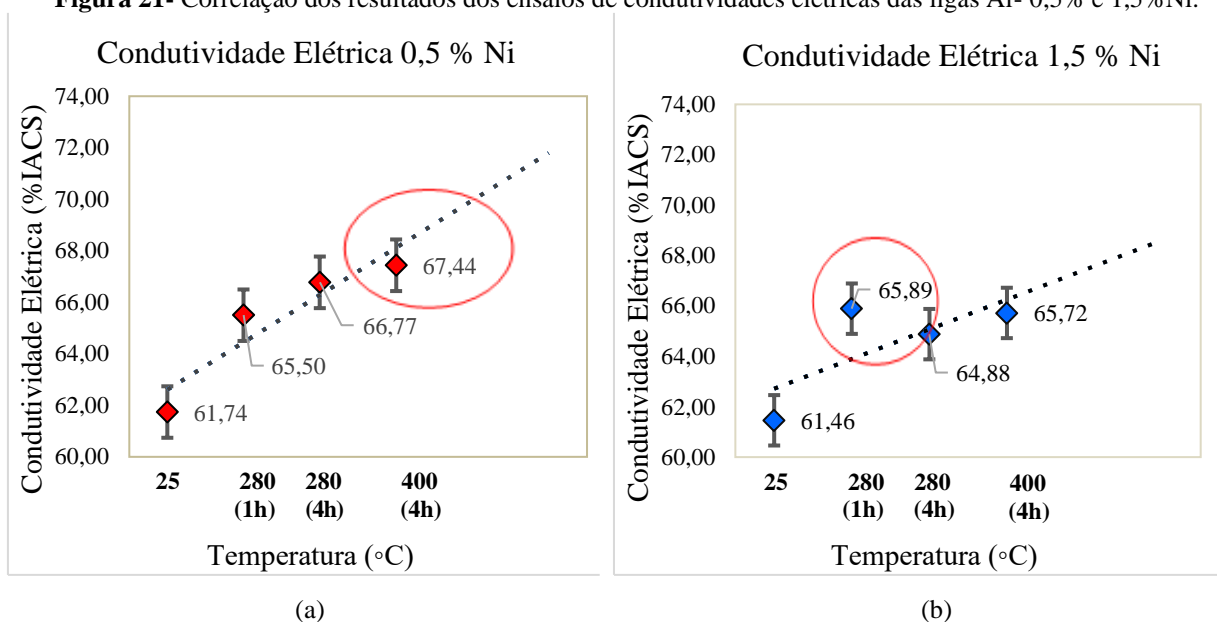
Desta maneira, para essa liga provavelmente a quantidade de soluto pode ter elevado a taxa de resfriamento, impedindo o crescimento da zona colunar, tornando os grãos menores. De acordo com Oliveira (2012) um tamanho de grão mais fino promove uma sanidade melhorada do fundido pois minimiza a contração, a fratura a quente e a porosidade causada pelo hidrogênio. Assim, as propriedades mecânicas e desempenho a altas temperaturas são normalmente melhorados com estruturas de grão mais fino.

Em função do aumento do teor de níquel, observa-se que aumenta a presença de grãos equiaxiais, desta forma tem-se mais contornos de grão e conseqüentemente mais barreiras na estrutura desta liga, implicando diretamente na propagação de corrente elétrica ao longo de sua estrutura e elevando sua resistência. Como o citado pelo autor Totten (2003) o endurecimento ocorre através da formação de barreiras que dificultam o movimento das deslocamentos. Quantas mais barreiras, mais energia é necessária para o movimento das deslocamentos, tornando-se mais difícil deformar plasticamente o metal. Os elementos de liga quer como soluto, quer sob a forma de fases precipitadas (muitas vezes intermetálicos), são os responsáveis pelas barreiras formadas na matriz de alumínio, e por conseqüência do aumento de dureza e resistência.

4.3. Caracterização elétrica

Após o processo de conformação plásticas e tratamento térmico, as ligas estudadas foram submetidas a análise de resistividade elétrica, os resultados parametrizados em IACS estão apresentados graficamente nas Figuras 21 (a) e (b).

Figura 21- Correlação dos resultados dos ensaios de condutividades elétricas das ligas Al- 0,5% e 1,5%Ni.



Fonte: Autora, 2023.

Nos resultados obtidos para liga Al-0,5%Ni, na Figura 21 (a), nota-se que quanto maior a temperatura e tempo de tratamento térmico aumenta a condutividade elétrica do material, sendo grandezas diretamente proporcionais para essa porcentagem de 0,5% níquel. O maior valor constado nessa liga foi de 67,44% IACS após o tratamento térmico de 400 °C por 4 horas abaixo da linha *solvus* e o menor valor foi de 61,74% IACS em temperatura ambiente de 25 °C, após o processo de laminação, correlacionando esses valores verifica-se que houve um crescimento de aproximadamente 5,7% na condutividade da liga, de acordo com a linha de tendência linear seu crescimento será gradual.

Segundo Freitas (2010) com a deformação sofrida pelo fio a condutividade tendia a diminuir com a redução do diâmetro, visto que os canais da cadeia de laminação inferem ao material o fenômeno de recuperação dinâmica, apresentando como consequência melhoria a condutividade elétrica notadamente para o diâmetro de 3 mm. Desta maneira constata-se que o teor de 0,5%Ni favoreceu o fenômeno de recuperação dinâmica da liga, possibilitando o aumento dessa propriedade.

Para os dados alcançados da condutividade elétrica da liga Al- 1,5%Ni, são mostrados na Figura 21 (b), onde o valor máximo para condutividade é de 65,89% em IACS, após o tratamento térmico de 280 °C por 1 hora. Em consonância com Freitas (2010) o tempo de 1h utilizado para a temperatura de 230 °C, para as ligas modificadas com os teores de Ti, resultou em Temperatura de Recuperação por associar valores de condutividade elétrica elevada aos menores diâmetros, pós Tratamento Térmico.

Apesar da temperatura utilizada neste estudo não ser exatamente a citada pelo autor, os valores encontram-se próximos sendo possíveis essa associação. O menor valor obtido para essa liga Al- 1,5%Ni foi de 61,46% para temperatura de 25 °C, verificando-se que não houve perda de condutividade elétrica, quando comparado com o Al-EC que possui resistividade elétrica de 61% IACS. Após comparar o resultado mínimo e máximo, observa-se um crescimento de 4,43%. Segundo Kamizono (2014) a aplicação de temperatura no material pode recuperá-lo, o que elimina a concentração de discordâncias e melhora a condutividade elétrica.

Ao correlacionar os dados na Figura 21 (a) e (b), verifica-se que os melhores resultados são da liga Al- 0,5%Ni, pois os menores teores diluem-se com mais facilidade reforçando a matriz, favorecendo a possível formação dos ramos dendríticos provocando a convecção no líquido na formação da zona coquilhada. Além disso, observa-se que o crescimento da condutividade da liga contendo 0,5% de níquel é superior a liga com 1,5%, podendo manter uma tendência linear em função da temperatura.

4.4. Limite de resistência a tração

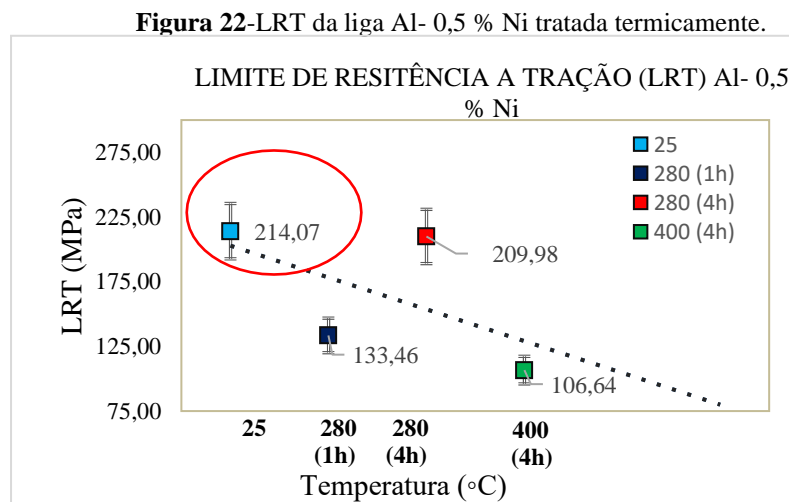
A Tabela 2 a seguir, mostram os valores experimentais obtidos na determinação do limite de resistência a tração (LRT) das ligas estudadas em função da temperatura de análise.

Tabela 2-Limite de Resistência a Tração das ligas Al- 0,5 e 1,5%Ni tratadas termicamente.

LIGAS	LIMITE DE RESISTÊNCIA TRAÇÃO (MPa) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (°C) E DO TEMPO (H)							
	25 °C (STT)	Desvio Padrão	280 °C (1h)	Desvio Padrão	280 °C (4h)	Desvio Padrão	400 °C (4h)	Desvio Padrão
Al- 05% Ni	214,07	± 0,868	133,46	± 12,530	209,98	± 7,947	106,64	± 7,771
Al- 1,5%Ni	234,05	± 5,207	143,60	± 5,296	107,66	± 4,639	110,16	±1,969

Fonte: Autora, 2023.

Na Figura 22 e 24, observa-se a correlação dos valores demonstrados na tabela acima, das ligas com diferentes teores de níquel e seus respectivos limites de resistência a tração (LRT), em função da evolução da temperatura em diferentes tempos.



Fonte: Autora, 2023.

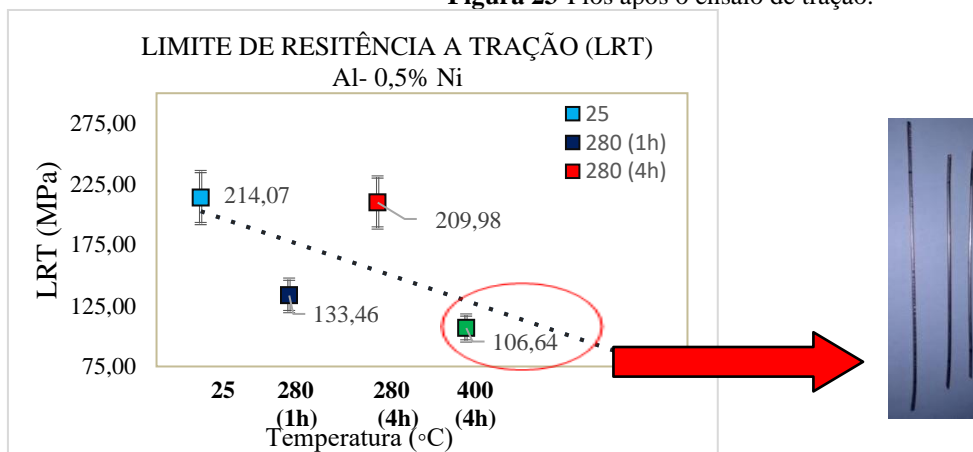
Em conformidade com Bubani (2008), a elevação da temperatura provocou reduções sucessivas no limite de resistência a tração da liga. O fato de a liga ferrítica apresentar valores mais altos que as austeníticas, nas duas condições de ensaio (a Temperatura ambiente a 350 °C), pode ser associado à sua estrutura cristalina, uma vez que materiais com estrutura cúbica de corpo centrado, como a ferrita, oferecem maior resistência ao deslizamento de planos cristalinos do que a austenita, que tem estrutura cúbica de face centrada. Desta maneira, ao analisar os dados da Figura 22, o limite de resistência a tração, a liga Al- 0,5% Ni atingiu o valor do máximo de 214, 07 MPa, em 25 °C, nota -se que a partir do aumento da temperatura ocorre uma diminuição no LRT da liga demonstrada pela curva de tendência, com o menor valor de 106, 64 MPa uma diminuição de aproximadamente 49 %.

Segundo Dieter (1986), como a instabilidade plástica leva à estricção e à fratura começa quando a taxa de encruamento se iguala à taxa de aumento de tensão, quanto maior a taxa de encruamento, a condição de instabilidade plástica ocorrerá com maiores valores de tensão e deformação, esse fenômeno é observado no resultado do tratamento térmico de 280 °C por 4 horas, onde obtém-se o valor de 209,98 MPa, com a diferença de aproximado de 2 %, verificando que houve altas taxas de instabilidade entre a temperatura ambiente (25 °C) e o tratamento térmico de 280 °C por 4 horas.

Em consonância com Bubani (2008), os valores do limite de escoamento diminuem à medida que aumenta a temperatura de ensaio; esse comportamento é esperado, uma vez que o

aumento da temperatura facilita o deslizamento de planos atômicos. Tal fenômeno foi observado quando os corpos de prova tratados termicamente a 400 °C por 4 horas, que foram submetidos ao ensaio de tração, não ocorrendo grandes instabilidades plásticas nos fios, que não sofreram estricção ao atingiram o limite de 30 newtons (N), Figura 23.

Figura 23-Fios após o ensaio de tração.

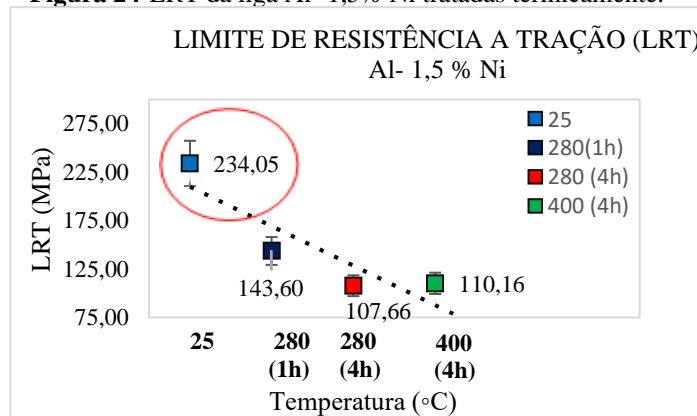


Fonte: Autora, 2023.

Na Figura 23 para liga Al- 0,5% Ni, observa-se que durante o ensaio de tração foi constatado que a liga tratada a 400 °C por 4 h tem um limite de resistência menor, constata-se que quanto maior a temperatura de recozimento e o tempo, mais dúctil e o material. De acordo com Bubani (2008) em temperatura ambiente, as ligas de Al- 10Ni apresentam as melhores propriedades mecânicas, pois, ao mesmo tempo, possui a maior ductilidade, a maior tenacidade e a maior resistência à tração.

Na Figura 24, verifica -se que o maior valor obtido para a liga Al- 1,5% Ni foi de 234,05 MPa, em 25 °C, onde observa-se um decréscimo em função do aumento de temperatura, pois o menor obtido foi de 110,16 MPa, após o tratamento de 400 °C por 4 horas, aproximadamente 46% menor que o valor máximo.

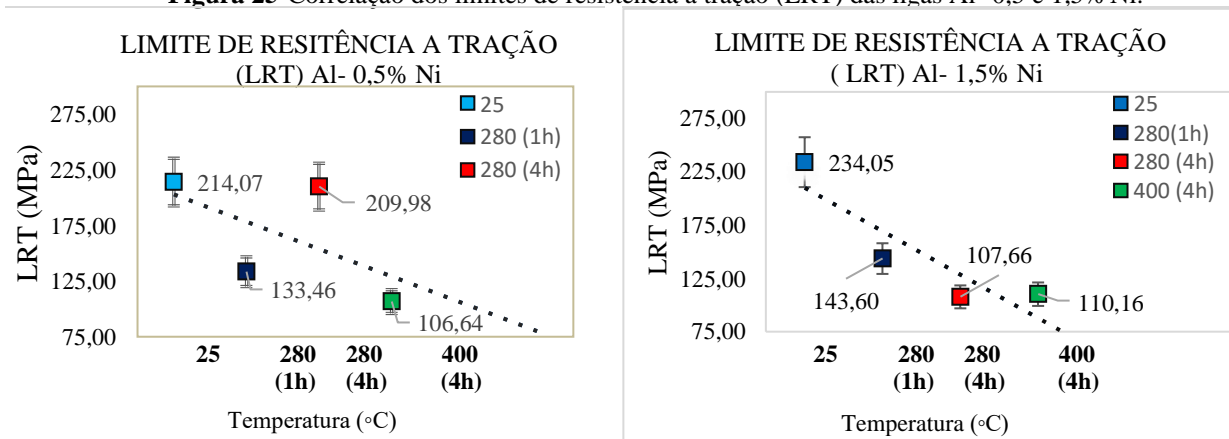
Figura 24-LRT da liga Al- 1,5% Ni tratadas termicamente.



Fonte: Autora, 2023.

A avaliação dos resultados está em concordância com o autor Prazeres (2016), onde à caracterização mecânica para o teste de termorresistividade resultou em perdas de limite de resistência a tração, entretanto, para o tratamento térmico na temperatura de 230°C as perdas de LRT foram inferiores a 10%, são caracterizados como ligas termorresistente segundo o protocolo COPEL. Kamizono (2014) sugere que o tratamento térmico causa um aumento na concentração de Ni nas partículas de segunda fase, e isto reflete na diminuição das perdas de propriedades mecânicas após os testes de termorresistividade. Isso explica o motivo da diminuição do LRT das duas ligas, observados na Figura 25. Com a queda do limite de resistência atração, nota-se o aumento da ductilidade do material.

Figura 25-Correlação dos limites de resistência a tração (LRT) das ligas Al- 0,5 e 1,5% Ni.



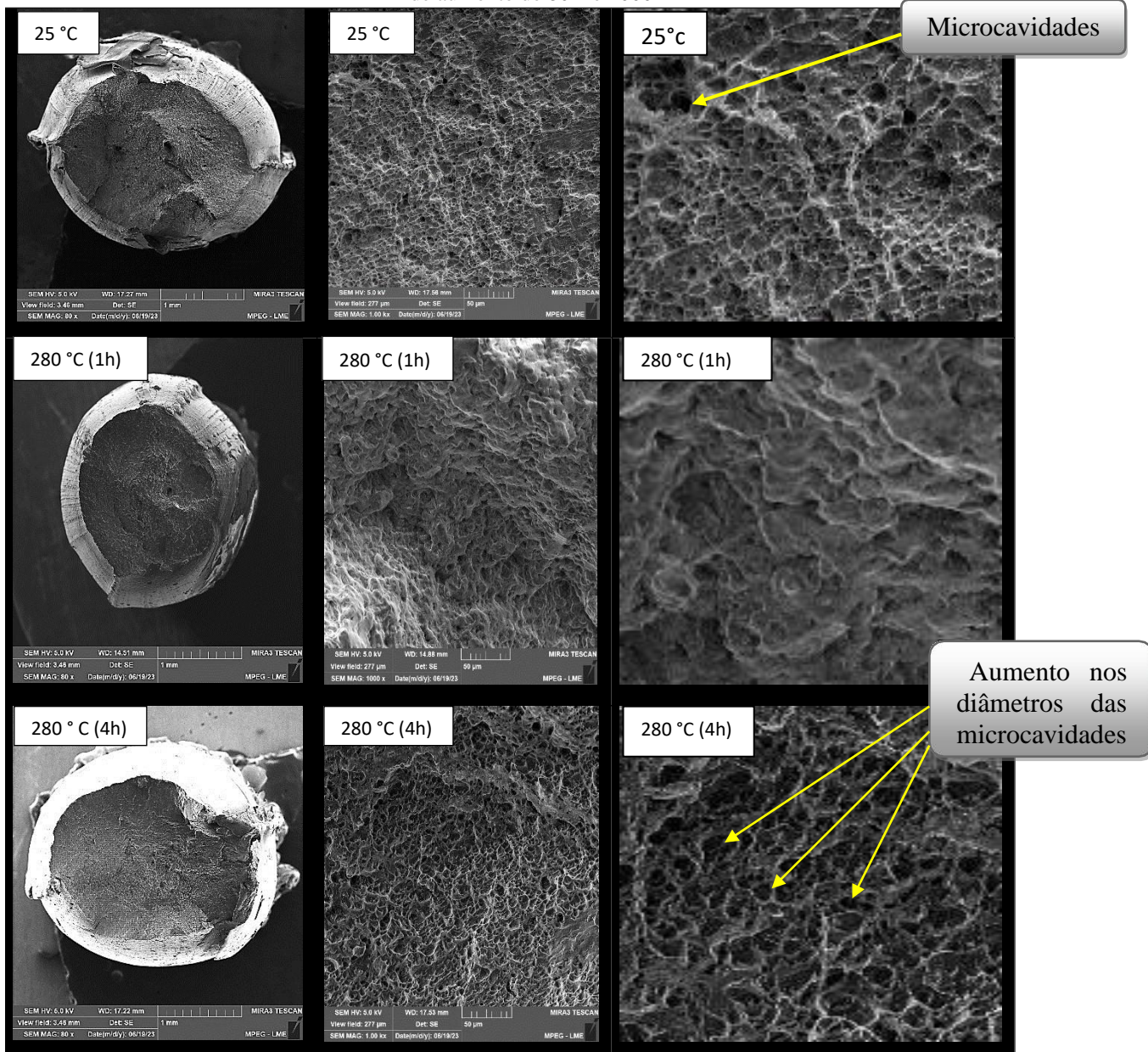
Fonte: Autora, 2023.

4.4.1. Análise das fraturas após o ensaio de tração

Na Figura 26 e 27, observa-se as imagens das fraturas após o ensaio de tração, realizados nos fios sem e com tratamento térmico, obtidas através de microscopia Eletrônica

de Varredura (MEV), para avaliação das microcavidades oriundas do processo de encruamento do material após a conformação.

Figura 26-As superfícies da fratura observada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do corpo de prova Al- 0,5%Ni não tratadas e tratadas termicamente a 280 ° C nos intervalos de 1h e 4 h, observadas em lente de aumento de 80X e 1000



Fonte: Autora, 2023.

De acordo com Prazeres (2016), à medida que ocorre um aumento da temperatura de tratamento térmico, resulta em um aumento na razão de microcavidades. Este fenômeno pode ser observado na Figura 26, pois à medida que ocorre o aumento na temperatura de tratamento

térmico ocorre maior aparecimento das microcavidades, ficando mais visível seu formato esférico.

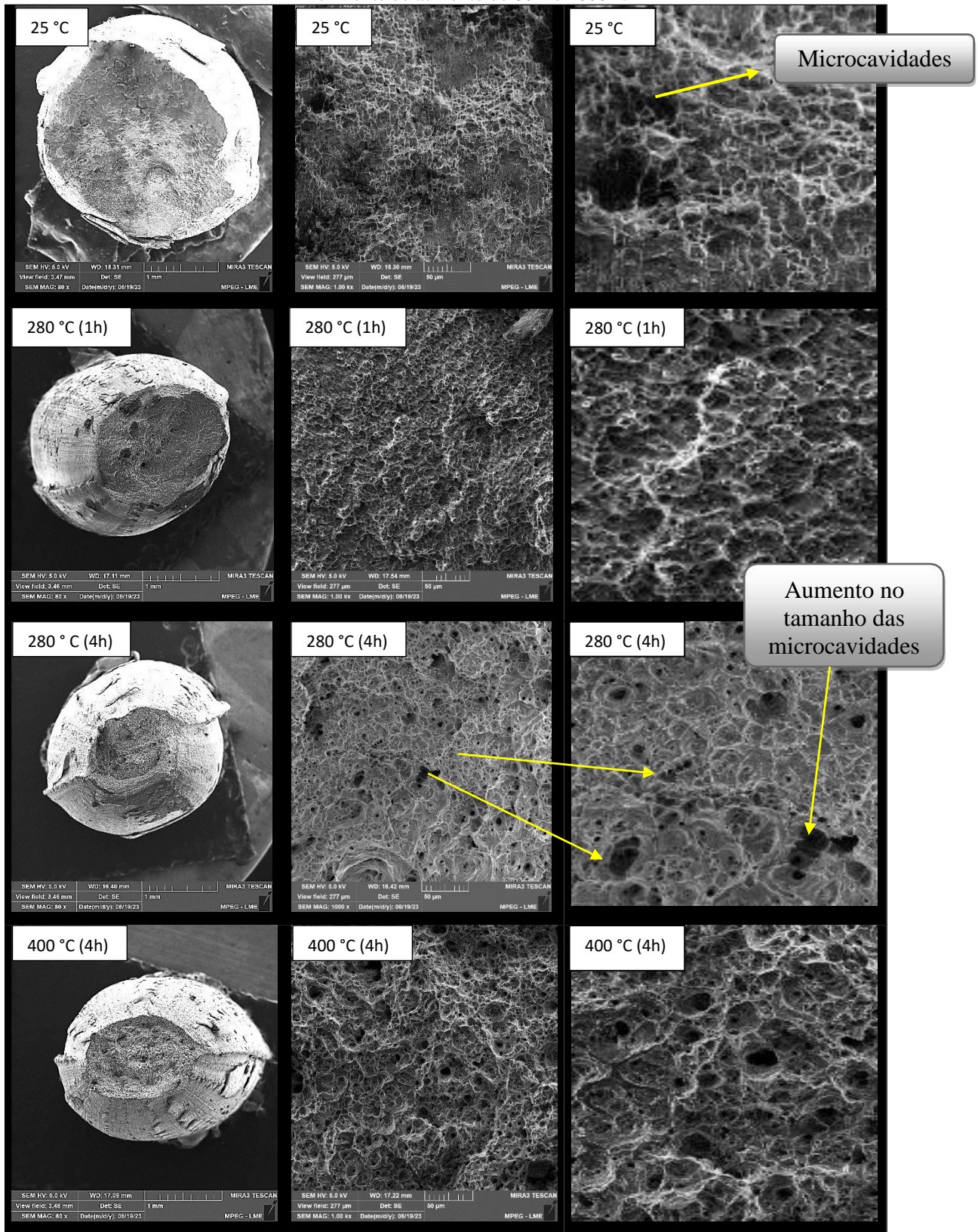
Desta maneira observa-se na Figura 26, as imagens com aumento de 80x e 1000x na fratura, após o ensaio de tração, a microestrutura obtida a 25 °C nota-se a presença de algumas microcavidades, possivelmente pela presença significativa de partículas de segunda fase que favorecem o aparecimento dos dimples na rede cristalina. Posteriormente, após o tratamento de 280 °C por 1 hora, verifica-se que ocorre um amolecimento nos emaranhados estruturais, e ocorrendo uma diminuição na quantidade de microcavidades, em função do aumento do tempo para 4 horas, nota-se a reaparecer os dimples com o diâmetro bem maior e visíveis.

Em anuência com Freitas (2010), a variação nos tamanhos dos “Dimples” é regida pela diminuição da área e aproximação de partículas de segunda fase, movimentação de discordâncias e deslocamentos de contornos de grão. Elementos que promovem a nucleação, crescimento e a coalescência dos “Dimples”. Inibindo a movimentação de discordância, dificultando seu deslizamento ao longo da rede cristalina, diminuindo o LRT da liga, favorecendo a condutividade elétrica pois não há tantas barreiras para a propagação da corrente elétrica na rede.

É provável que o aumento de temperatura na liga com 0,5% níquel, contribui para dissolução do soluto na matriz de alumínio, possivelmente favorecendo a nucleação das microcavidades na microestrutura, auxiliando na recuperação dinâmica do material.

Reforçando o afirmado por Freitas (2010), o fenômeno da “Recuperação Dinâmica” que tende a “suavizar” a intensidade do emaranhamento das discordâncias provocados pelo processo de conformação plástica à frio. Tornando o material tratado mais dúctil, podendo explicar o comportamento do material quando foi submetido, ao tratamento térmico de 400 °C por 4 h, onde não houve rompimento do fio.

Figura 27-As superfícies da fratura observada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do corpo de prova Al- 1,5%Ni não tratadas e tratadas termicamente a 280 °C e 400 °C nos intervalos de 1h e 4h, observadas em lente de aumento de 80X e 1000X.



Fonte: Autora, 2023

Ao analisar a Figura 27, nota-se que a liga Al-1,5%Ni, na temperatura ambiente possui uma microestrutura com microcavidades, proporcionando maior resistência ao material, pois como citado anteriormente, quanto maior sua presença maior sua resistência.

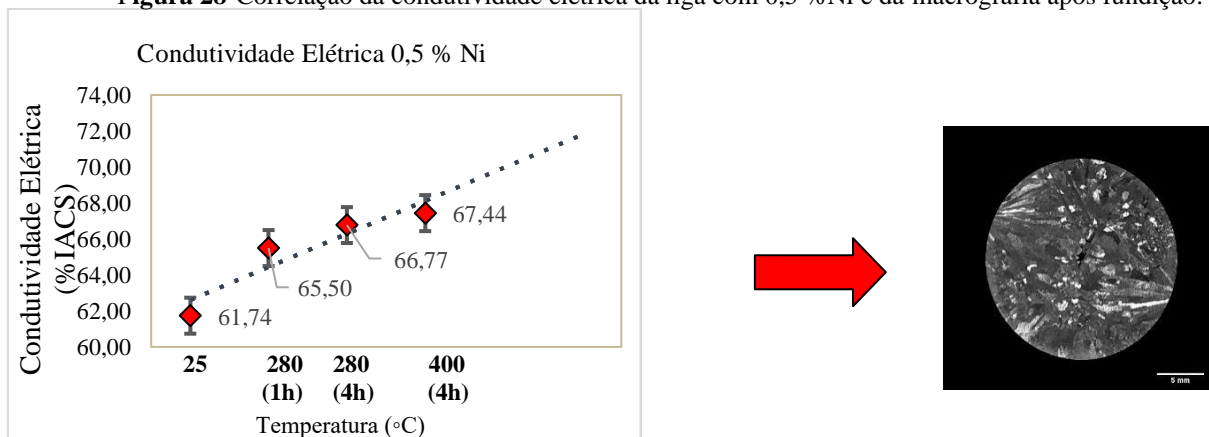
Em consonância com Freitas (2010), são observadas mudanças significativas na estrutura da liga como variações nos tamanhos dos “Dimples” e nos tamanhos dos precipitados, que podem ser atribuídas ao maior teor de soluto. Desta maneira, observa-se que a liga com 1,5 %Ni, apresenta quantidades de microcavidades, após o tratamento térmico de 280 °C por 4 horas, corroborando com o menor LRT obtido para essa liga.

Desta maneira, devido ao aumento no tamanho microcavidades até a cavidade vizinha, ocasionando a quebra de seus contornos, inibindo a movimentação, desta forma constata-se que o tratamento térmico de recozimento, favorece a concentração de partículas de segunda fase e proporciona aumento no número de defeitos pontuais que impedem o deslizamento na malha e diminuem a resistência do material, aumentando a ductilidade.

4.5. Comparação das macrografias com a condutividade elétrica das ligas

Com os dados da condutividade elétrica das ligas Al- 0, 5 e 1,5 % Ni apresentados anteriormente, é possível comparar com as macrografias obtidas das ligas, com os testes termorresistividades fios em função do aumento de soluto na morfologia dos grãos, nas Figuras 28 e 29.

Figura 28-Correlação da condutividade elétrica da liga com 0,5 %Ni e da macrografia após fundição.



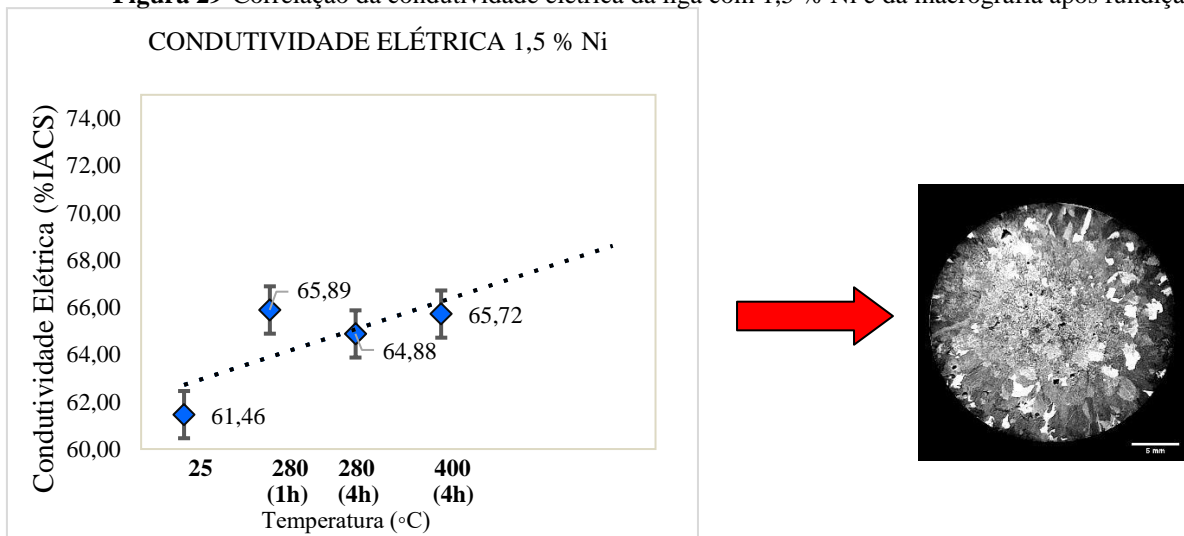
Fonte: Autora, 2023.

A Figura 28, apresenta a macrografia obtida após o processo de solidificação da liga com 0,5 %Ni, onde observa-se heterogeneidade granular, com a presença de grãos colunares que devido a sua geometria alongada, proporcionam a condução de corrente elétrica ao longo

do material. De acordo com Freitas (2010) O comportamento observado para o diâmetro de 3m m pode ser atribuído ao fenômeno de recuperação dinâmica a frio que ocorre no alumínio com baixas quantidades de soluto. Isso explica por que os melhores resultados são para liga contendo 0,5 %Ni.

De acordo com Garcia (2005), a estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto, não somente no caso de peças fundidas, que já apresentam essencialmente a forma definitiva, mas também naqueles produtos que serão trabalhados para a produção de chapas, fios ou forjados. Desta maneira a medida que se adiciona o níquel na liga observa-se a diminuição da zona colunar, tornando os grãos refinados e equiaxiais, com mais contornos de grãos que aumentam a resistência do material, podendo ser observado na Figura 29. Porém, como a condutividade é inversamente proporcional a resistência, o refinamento dos grãos diminui a condutividade, pois a corrente elétrica encontra mais barreiras que dificultam sua propagação ao longo do material.

Figura 29-Correlação da condutividade elétrica da liga com 1,5 % Ni e da macrografia após fundição.



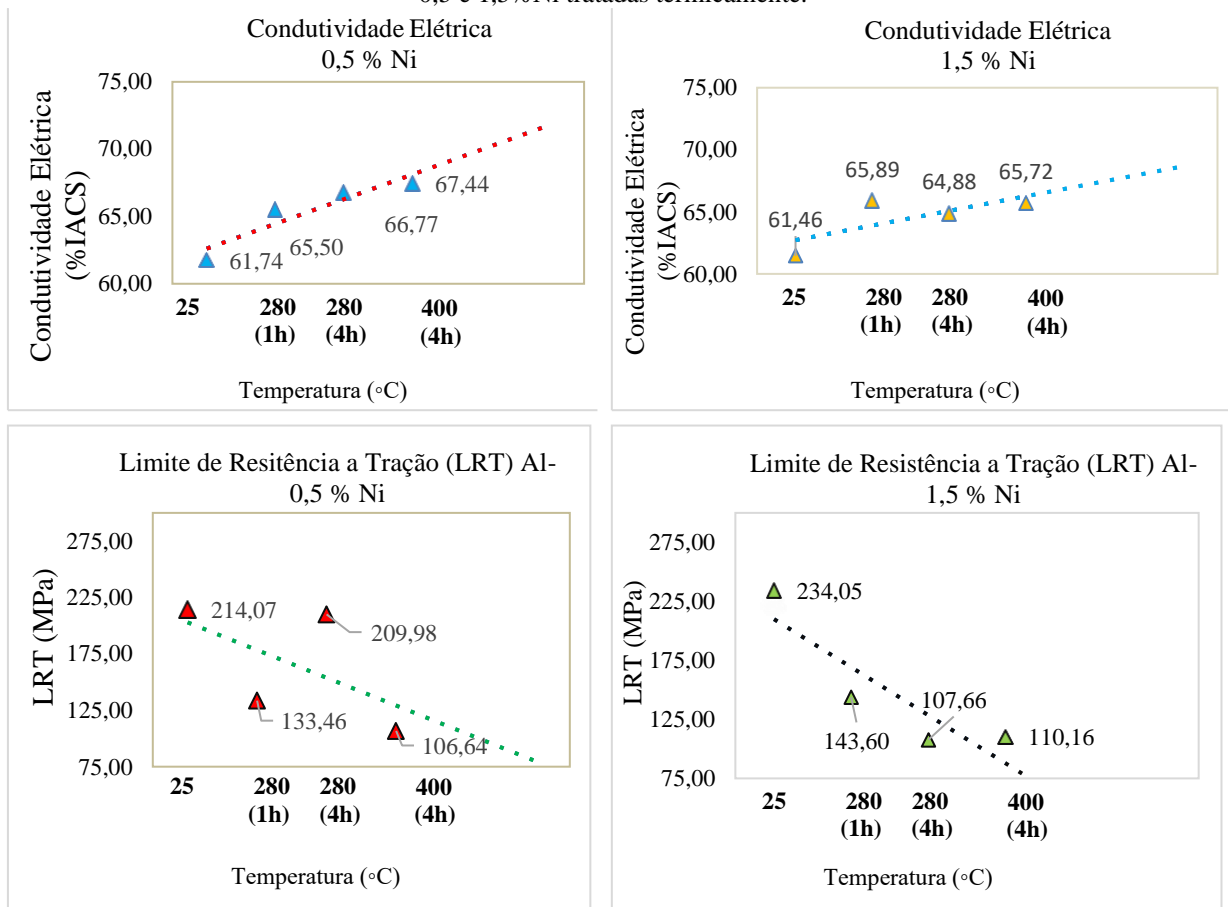
Fonte: Autora, 2023.

4.6. Comparação a condutividade elétrica e limite de resistência a tração (LRT) em função do tratamento térmico

Ao avaliar os dados para os ensaios de condutividade elétrica das ligas em estudo foi possível identificar que o tratamento térmico foi eficaz e sua resistividade elétrica aumenta

proporcionalmente em função da temperatura e do tempo, Figura 30. Esse fenômeno é citado por Freitas (2010) onde afirma que esta peculiaridade pode ser associada ao fenômeno de recuperação dinâmica que o material pode sofrer durante o processo de deformação plástica, uma vez que ao contrário do que se esperava, a condutividade elétrica aumenta à medida que o diâmetro do fio diminui.

Figura 30-Correlação das condutividades elétricas com os limites de Resistência a tração das ligas Al-0,5 e 1,5%Ni tratadas termicamente.



Fonte: Autora, 2023.

Entretanto ao verifica que os resultados para o ensaio de tração, houve um decréscimo considerável no LRT das ligas, Figura 30. Observa-se que o tratamento térmico não foi eficaz pois à medida que se aumento a temperatura a resistência do material diminuí, ou seja, tem se um fio mais dúctil e fora dos padrões exigidos para uma liga ideal, obtendo-se propriedades inversamente proporcionais.

5. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos através dos processos realizados para caracterização das ligas Al- 0,5 e 1,5% Ni, conclui-se que:

Análise química das amostras após o processo de solidificação das ligas.

- Ao avaliar a composição obtida, os resultados foram próximos ao esperado, para as duas porcentagens de níquel. Apesar da variação relativa para liga contendo 0,5% Ni ser maior, quando comparada com 1,5% Ni, seus resultados são mais relevantes.

Comparação macroestrutural das ligas em relação a variação do soluto, originárias da solidificação da liga em molde “U”.

- Com base nas análises feitas, observa-se que a liga com 0,5 % Ni possui uma morfologia mista, com alguns coquilhados na interface metal/molde e com grãos colunares e equiaxiais distribuídos aleatoriamente ao longo da amostra. Diferentemente da liga com 1,5% Ni que demonstrou uma macroestrutura predominante equiaxial. Desta maneira conclui-se que quanto maior o teor do níquel mais refinado se torna o grão, possuindo mais contornos em sua estrutura.

Correlação o desempenho elétrico (%IACS), das ligas com 0,5 e 1,5% de níquel, tratada termicamente nas temperaturas de 280 °C a 400 °C, sob as variações de 1 a 4 horas.

- A concentração de soluto juntamente com o tratamento de recozimento aplicado, influenciaram diretamente na condução de corrente elétrica dos fios, pois os dados mostraram um crescimento expressivo na sua condutividade em função da temperatura pelo tempo. Porém, destaca-se a liga Al-0,5 % Ni, que teve os melhores valores, com tendência a crescimento exponencial em função do aumento de temperatura pelo tempo.

Comparação do LRT (MPa) das ligas com 0,5% e 1,5% níquel tratadas termicamente a 280 °C e 400 °C, durante 1 e 4 horas.

- Ao comparar os resultados obtidos, o tratamento térmico não foi eficaz, pois ocorreu uma diminuição considerável no LRT das duas ligas. Desta maneira observa-se que quanto maior a temperatura, menor a resistência. Em conformidade com isso observou-se que para liga contendo 0,5 % Ni, o tratamento a 400 °C por 4 horas, apresentou o menor valor, sendo

que esse foi estimado pois devido alta temperatura a liga mostrou elevada capacidade de alongamento, não ocorrendo o rompimento dos fios, configurando amostras altamente dúcteis. Os melhores valores obtidos para as ligas Al- 0,5 e 1,5% Ni, foram dos corpos de prova após a conformação plástica sem tratamento térmico.

Análise da região da fratura após o ensaio de tração, através do microscópio eletrônico de varredura (MEV)

- Ao avaliar as fraturas obtidas após o ensaio de tração, verificou-se que as amostras tinham a presença de microcavidade (dimples), que à medida que ocorre o aumento de temperatura, ocorre o aumento vizinha, tornando o material mais dúctil, proporcionando o decréscimo do LRT nas amostras, sendo associado possivelmente a maior presença de partículas de segunda fase presentes na estrutura do material.

Por fim, o tratamento térmico alcançou seu objetivo de proporcionar alívio de tensões internas no material, promovendo estabilidade dimensional e tornando os fios mais dúcteis e mais maleáveis, sendo mais eficazes na condutividade elétrica do material que apresentou crescimento em função da temperatura pelo tempo.

Conclui-se que dentre as ligas estudadas após o tratamento térmico, a mais adequada para a possível produção de cabos de transmissão de energia, seria a liga Al-0,5%Ni tratada a 280 °C por 4 horas que apresentou LRT de 209 MPa, pois está acima do LRT mínimo aceito para o AL-EC (160 MPa).

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

- Avaliar se a variação de soluto teve grandes influência nas propriedades da liga Al-0,5% Ni.
- Analisar a microdureza das ligas após o processo de solidificação.
- Correlacionar a microestrutura das ligas após o processo de solidificação com as microdureza do material proposto no estudo.
- Comparar o espaçamento dendrítico oriundo da solidificação com os resultados após o processo de conformação plástica das ligas Al-0,5 e 1,5% Ni.
- Correlacionar microdureza dos fios sem e com tratamento térmico para as temperaturas proposta neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO–ABAL.

<<http://www.abal.org.br//aluminio/temperas.asp>> Disponível em: Acesso em: 10 jan.2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 5118). **Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos.** Rio de Janeiro, ago. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6810). **Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos.** Rio de Janeiro, ago. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6814). **Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica.** Rio de Janeiro, mar. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6815). **Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos.** Rio de Janeiro, ago. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR ISO 6892). **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro, nov. 2002.

ASKERLAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais.** São Paulo: Cengage Learning, 2008, 594p.

BATALU, D.; GEORGETA, C.; ANGEL, A. **Critical analysis of Al-Ni phase diagrams.** *Metallurgia International*, v. 11, n. 8, p. 36-45, 2006.

BESKOW, A. B. **Estudo da solidificação unidirecional ascendente para obtenção de estruturas colunares grosseiras.** 25 mar. 2008.

BUBANI, F. C. **Influência do teor de níquel e da temperatura nas propriedades mecânicas e na microestrutura da liga Fe-18Cr-Ni.** 2008. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

BRESCIANI FILHO, E. et al. **Conformação plástica dos metais.** 4. ed. Campinas: Unicamp, 1997.

CAVALCANTE, F.F. **Comportamento mecânico e tenacidade à fratura de ligas de Alumínio 2024 e 7075 submetidas a diferentes tempos de envelhecimento.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2016.

CHIAVERINI, Vincente. **Tratamento Térmicos das Ligas Metálicas.** São Paulo: ABM, 2003, p. 243.

DANTAS, P. P. **Caracterização de ligas hipereutéticas de Al-Ni solidificadas**

unidirecionalmente. 15 out. 2014.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. Ohio: McGraw-Hill Kogakusche Ltd. International Student Edition. American Society for Metals-ASM, 1976, p. 214.

ESPÍNDOLA, E. E. **Caracterização elétrica e mecânica da liga al - 0,05 % cu - [0,2 - 0,3] % Fe - 0,5 % Si - 0,6 % Mg e solidificada em molde unidirecional horizontal.** 2023. TCC. FEM/UFGA. Belém. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas) –tabela Mercado Mensal 2004-2018: consumo mensal de energia elétrica por classe, Brasil e regiões.** Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 05 jan. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudo de demanda de energia - Demanda de energia 2050.** 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.

FREITAS, E. S. **Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas de fios para Tx e Dx de energia elétrica do Al-EC modificado com teores de silício e zircônio.** 2010. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações.** 2. ed. Campinas: UNICAMP, 2007.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações.** Campinas: UNICAMP, 2001.

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

GOMES, C. H. U. **Efeito de superaquecimento e da direção do crescimento na transição colunar equiaxial da liga Al- 5,5 %Si – 3%Cu solidificação direcionalmente.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal do Pará, Belém- PA, 2015.

HORIKOSHI, T.; KURODA, H.; SHIMIZU, M.; AOYAMA, S.; **Development of aluminum alloy conductor with high electrical conductivity and controlled tensile strength and elongation.** Hitachi Cable Review N° 25 August, Japan, 2006.

J.C. LIPPOLD, **Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Based Alloys**, Willey (2004), ISBN: 111-8-23070-1.

KAMIZONO, K. A. **Caracterização elétrica e mecânica da liga Al-Cu-Fe-Si modificada com diferentes teores de Ni para aplicação na fabricação de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica.** 2014. Dissertação de mestrado –

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2014.

KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **The Influence and Control of Porosity and Inclusions in Aluminum Castings**. In: KAUFFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **Aluminum alloy castings: properties, processes and applications**, Materials Park, ASM International, 2004. pp.: 47-54.

LIMA, J. A. **Análise do comportamento elétrico, mecânico e termorresistente da liga Al0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si modificada com teores de Ti e Zr**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica). 2014. Universidade Federal do Pará, Pará, 2014.

LOBATO, M. Q. **Avaliação da influência da adição de teores de Zr na termoresistividade da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,3%Si, solidificada em molde unidirecional horizontal**. 2016. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2016.

MASSARO, A. G. **Comparação das características de desempenho de um rotor fechado de fluxo radial, aplicado em bomba centrífuga, produzido via fundição convencional e fundição de precisão (investment casting)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MACHADO, P.C. **Análise da influência dos solutos Zr e Ti sobre as propriedades mecânica, elétrica e de termorresistência de uma liga Al-Cu-Fe-Si destinada a tx e a dx de energia elétrica**. Belém: 2012. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

MARQUES, P. R. **Caracterização térmica, mecânica e elétrica da liga Al-0,6%mg-0,8%Si refinada e modificada com diferentes teores de cobre**. 2008. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

MORAES, D. O. **Influência da temperatura interpasse na soldagem de aços microligados e revestidos com ligas de níquel**. 2022. Dissertação (mestrado em engenharia de materiais) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2022.

NOGUEIRA, J. S. A. **Recozimento de homogeneização da liga 6063 na empresa SAPA II Perfis**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia metalúrgica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica de Materiais, Universidade Federal do Porto. Porto, 2012

OHNO, A. **Formation mechanism of the equiaxed chill zone in ingots**. Transactions of the iron and steel institute of japan. v. 10, p. 459, 1976.

OLIVEIRA, G. R. G. D. Dissertação. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn**, Porto, 2012.

PARIS, Aleir Antonio Fontana. **Tecnologia da Fundição**. Santa Maria-RS: Independente, 2008. 185 p.

PEIXOTO, L. C. L. **Micrpestruturas de solidificação e resistências mecânicas e a corrosão de ligas Pb-Sn diluídas**. 2009. Dissertação. 111p. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

PERES, M. D. **Desenvolvimento da macroestrutura e da microestrutura na solidificação unidirecional transitória de ligas Al-Si**. 2005. Tese. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. Tese.

PRAZERES, E. R. **Avaliação da modificação da liga base Al – Cu – Fe – Mg por teores de Ni e Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica, a partir de ligas solidificadas em molde “U”**. 2016. Dissertação de Mestrado – PPGEM/UFPA. Belém. 2016.

PRAZERES, E. R. **Estudo do tratamento térmico e da modificação da liga al-0,05%pcu-[0,24-0,28]%pfe-0,6%pmg com a adição de 0,03%pn**. 2014. TCC – FEM/UFPA. Belém. 2014.

RÉGIS JÚNIOR, Oswaldo et al. **A utilização de condutores de liga de Al termo-resistente na repotencialização de LT de transmissão e sub-transmissão**. In: *Seminário de produção e transmissão de energia*, n.15, 1999, Foz do Iguaçu. Anais, 1999.

SANTOS, R. G. **Transformação de fases em materiais metálicos**. Campinas: Unicamp, 2006.

TOTTEN, G.E. AND MACKENZIE, D.S., Eds. **Handbook of Aluminium: Vol. I: Physical Metallurgy and Processes**. CRC Press, New York, 481-532. 2003.

ZOLOTOREVSKY. V.S; N.A. Belov, and M.V. GLAZOFF, **Casting aluminum alloys**. Vol. 12. Oxford, 2007.