



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

HANATHANYA ROCHA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS NANOTUBOS DE CARBONO NAS PROPRIEDADES
DA LIGA Al-2% Si**

Ananindeua,
2022

HANATHANYA ROCHA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS NANOTUBOS DE CARBONO NAS PROPRIEDADES
DA LIGA Al-2% Si**

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. Me. Emerson Rodrigues Prazeres

Ananindeua,
2022

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

S586a Silva, Hanathanya Rocha da.
Avaliação da influência dos nanotubos de carbono nas propriedades da liga Al - 2 % Si. / Hanathanya Rocha da Silva. — 2022.
62 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof. Me. Emerson Rodrigues Prazeres
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Ciência e Tecnologia, Ananindeua, 2022.

1. Nanotubos de carbono,. 2. termorresistência,. 3. condutividade elétrica.. I. Título.

CDD 620.11

HANATHANYA ROCHA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS NANOTUBOS DE CARBONO NAS PROPRIEDADES
DA LIGA Al 2% Si**

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

Data da Avaliação: 03 / 11 / 2022.

Conceito: Exceleste

BANCA EXAMINADORA:

Deibson Silva Costa

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

Emerson Rodrigues Prazeres

Prof. Me. Emerson Rodrigues Prazeres
(FEM – ITEC – UFPA – Coorientador)

Alacid do Socorro Siqueira Neves

Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMat – CAMPANIN – UFPA – Examinador interno)

Mauro Quaresma Lobato

Prof. Me. Mauro Quaresma Lobato
(FACI – Wyden – Belém – Membro Externo)

Ananindeua,
2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade que me deu de ingressar na Universidade Federal do Pará, e ser meu sustento até aqui. Agradeço ao meu esposo Patrick Aires e filha Isabella Aires por me incentivarem todos os dias e me ajudarem nos dias mais exaustivos de estudo; sou grata também, ao meu filho que no final desta etapa da minha vida está sendo gerado dentro de mim e desde muito novo já faz parte deste processo. Agradeço aos meus pais, Nonato Silva e Conceição Silva por todo o apoio e base que me forneceram; e com muito carinho minhas avós Raimunda Rocha e Margarida Silva que sempre torceram e oraram por mim.

Sou grata também à vida dos amigos que formei na universidade, os que muito me auxiliaram durante todo o curso e aos que se estenderam à vida em especial a Silmara da Conceição, Sthefanny da Conceição, Dayse Coelho, Carlos Cícero e Luane Marques que formaram meu grupo de estudos durante o curso.

Quero agradecer com carinho, aos alunos que compõem o grupo de pesquisas de engenharia de materiais (GPEMAT), os quais sempre de boa vontade me ajudaram quando precisei. O meu agradecimento ao corpo docente do curso de Engenharia de Materiais, juntamente com os meus orientadores, Prof. Dr. Deibson Silva da Costa e ao Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres por agregarem conhecimentos e valores à minha formação acadêmica e futuramente profissional.

RESUMO

Devido à tendência no aumento do consumo energético, seguido de deteriorações frequente dos cabos e linhas de transmissão elétrica é que pesquisas estão sendo feitas sobre elementos que aumente a resistência nas ligas condutoras de eletricidade. Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência dos Nanotubos de Carbono (CNT) na liga de Al-2 % Si. A princípio realizou-se a espectroscopia Raman no pó de NTC funcionalizado para iniciar o processo de fundição da liga em molde cilíndrico; Após a solidificação da peça, cortou-a e dividiu-se parte para laminação, a qual se verificou a macroestrutura e realizaram-se testes de microdureza, condutividade elétrica, tração e MEV da fratura; a parte não laminada se verificou também a macroestrutura e microdureza, e então se comparou os resultados, além de observar o efeito do tratamento térmico (TT). A espectroscopia Raman dos NTC mostraram uma proximidade das bandas D e G demonstrando que há presença de carbonos amorfos, já na sua razão de ID/IG foi revelado um grau de desordem aceitável; nas macroestruturas, identificou-se um maior refinamento de grãos para a liga Al-2 % Si-NTC; já na microdureza, os Nanotubos presente foram responsáveis pelo aumento dessa propriedade; na condutividade elétrica todas as ligas ultrapassaram de 54,71 % exigido pela IACS (International Annealed Copper Standard) para 3 mm de diâmetro final para serem consideradas ligas condutoras de eletricidade; na tração as ligas contendo NTC também elevaram seus valores; no MEV da região fraturada das ligas com o NTC foram encontradas microcavidades (dimples) do tipo mais rasas e menor ductilidade em relação as ligas não tratadas; o tratamento térmico se mostrou mais evidentes nas ligas sem os NTC. Todos os ensaios obtiveram ganhos em suas propriedades em relação às ligas sem tratamentos térmicos (STT) quando submetidas ao teste de termorresistividade (230 °C e 280 °C), com exceção do limite de resistência à tração (LRT), sendo apenas a liga Al-2 % Si a 230 °C apta, de acordo com o protocolo COPEL. Por fim, o NTC conferiu a liga maior resistência mecânica e melhor condutividade elétrica, porém uma diminuição na ductilidade, possibilitando a liga ser utilizada dentro da indústria elétrica, já que essas foram consideradas condutoras.

Palavras-chave: NTC; Ligas Termorresistentes; condutividade elétrica.

ABSTRACT

Due to the trend towards increased energy consumption, followed by frequent deterioration of cables and electrical transmission lines, research is being carried out on elements that increase resistance in electrically conductive alloys. The general objective of this work is to evaluate the influence of Carbon Nanotubes (CNT) on the Al-2% Si alloy. At first, Raman spectroscopy was performed on the functionalized NTC powder to start the alloy casting process in a cylindrical mold; After the solidification of the piece, it was cut and divided for lamination, which verified the macrostructure and microhardness tests, electrical conductivity, traction and SEM of the fracture were carried out; the unlaminated part was also checked for macrostructure and microhardness, and then the results were compared, in addition to observing the effect of heat treatment (TT). The Raman spectroscopy of the CNTs showed a proximity of the D and G bands, demonstrating the presence of amorphous carbons, in their ID/IG ratio an acceptable degree of disorder was revealed; in the macrostructures, a greater grain refinement was identified for the Al-2 % Si-NTC alloy; already in the microhardness, the Nanotubes present were responsible for the increase of this property; in terms of electrical conductivity, all alloys exceeded the 54.71% required by the IACS (International Annealed Copper Standard) for a final diameter of 3 mm to be considered electrically conductive alloys; in traction, alloys containing NTC also increased their values; in the SEM of the fractured region of the alloys with NTC, microcavities (dimples) of the shallower type and less ductility were found in relation to the untreated alloys; heat treatment was more evident in alloys without CNTs. All tests obtained gains in their properties in relation to alloys without heat treatments (STT) when subjected to the thermoresistivity test (230 °C and 280 °C), with the exception of the tensile strength limit (TRL), where only the alloy Al-2 % Si at 230 °C suitable according to the COPEL protocol. Finally, NTC gave the alloy greater mechanical strength and better electrical conductivity, but a decrease in ductility, allowing the alloy to be used within the electrical industry, since these were considered conductive.

Keywords: NTC; Heat resistant alloys; Electricity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio do sistema Al-Si.....	18
Figura 2 - Esquema representativo dos principais defeitos cristalinos.	20
Figura 3 – Orbitais S e P e suas respectivas hibridizações sp (a), sp ² (b) e sp ³ (c).	23
Figura 4 - Formas alotrópicas do carbono: a) grafite, b) diamante, c) fulereno e d) nanotubos de carbono.....	24
Figura 5 - Representação de um NTC de parede simples e de paredes múltiplas.....	25
Figura 6 - Representação esquemática do mecanismo de Espalhamento Raman.	27
Figura 7 - Espectros obtidos a partir da técnica de espalhamento Raman: Espectro Raman Padrão de Silício (a), Espectro Raman de Grafite (b), Espectro Raman de Material carbonoso (c).....	27
Figura 8 - Micrografias em MEV das ligas Ti42%Nb-DF em (a) e Ti42%Nb-E em (b).....	29
Figura 9 - Fluxograma geral das ligas.	31
Figura 10 - Beckers com pó de NTCs e Sí (a); Aparelho ultrassônico (b).....	33
Figura 11 - Espectro Raman.	34
Figura 12 - Estufa (a); Forno, tipo Mufla (b); Remoção da escória com a peça metálica (c).	34
Figura 13 - Metal vazado a 720 °C em molde cilíndrico.	35
Figura 14 - Lixadeira e politriz.....	36
Figura 15 - Laminadores utilizados na deformação plástica a frio da liga.....	36
Figura 16 - Microdurômetro.....	37
Figura 17 - Microhomímetro utilizado para verificação da condutividade do fio.	38
Figura 18 - Máquina SERVAPULSER, utilizada no ensaio de Tração.	40
Figura 19 - Medições de Dimples em MEV das ligas com NTC.....	41
Figura 20 - Espectro Raman do Nanotubo de Carbono (NTC) (a); Espectro Raman de grafite (b); Espectro de material carbonoso (c).....	43
Figura 21 - Macroestruturas das ligas não deformadas: Al – 2% Si (a); Al – 2% Si+NTC (b).	44
Figura 22 - Comparação da macroestrutura das ligas Al-2% Si (a) e Al-2% Si-NTC (b) sem Tratamento Térmico antes e após o processo de deformação.	45
Figura 23 - valores de Microdureza (HV) antes e após o processo de laminação, sem tratamento térmico.....	46
Figura 24 - Gráfico de Microdureza da liga Al-2% Si, após o processo de Laminação submetido aos Tratamentos Térmicos.	47
Figura 25 - Microdureza da liga Al-2% Si-NTC, após o processo de laminação e submetidas a Tratamentos Térmicos.	48
Figura 26 - Gráfico de ganhos e perdas das microdurezas.	49
Figura 27 - Condutividade Elétrica da liga Al-2% Si submetidas ao ensaio de Termorresistividade.....	49
Figura 28 - Condutividade Elétrica da liga Al-2% Si-NTC, submetidas ao ensaio de Termorresistividade.....	50
Figura 29 - Gráficos de perdas e ganhos da Condutividade elétrica.....	51
Figura 30 - Gráfico de Tração comparando as duas ligas sem o Tratamento Térmico.....	52
Figura 31 - Gráfico de perdas e ganhos de LRT.	52

Figura 32 - Gráfico de Tensão Real x Deformação Real para as ligas Al-2% Si (a) e Al-2% Si-NTC (b).....	53
Figura 33 - Imagens da fratura da liga Al-2% Si-NTC, obtidas através de MEV: STT (a), 230 °C (a), 280 °C (c).....	54
Figura 34 - Razão de microcavidades (a) com gráfico de LRT (b) das ligas com NTC.....	55
Tabela 1 - Valores de microdureza, condutividade elétrica e tração para a liga Al - 2 % Si. .	42
Tabela 2 - Valores de microdureza, condutividade elétrica e tração para a liga Al - 2 %Si+NTC.	42
Quadro 1 - Largura e razão das intensidades.	28
Quadro 2 - Especificações da técnica de Espectroscopia Raman.	33
Quadro 3 - Quantidade (em %) das ligas Al-2 % Si / Al-2 % Si-NTC.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

American Society for Testing and Materials (ASTM)
Associação brasileira de alumínio (ABAL)
Companhia paranaense de energia (COPEL)
Corpos de provas (CPs)
Grupo de pesquisas de engenharia de materiais (GPEMAT)
International Annealed Copper Standard (IACS)
Microcavidades (DIMPLES)
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
Nanotubos de carbono (NTC)
Nanotubos de paredes múltiplas (MWNT)
Norma brasileira (NBR)
Sem tratamento térmico (STT)
Tratamento térmico (TT)
Universidade federal do Pará (UFPA)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 Composição do trabalho	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Materiais e ligas metálicas	15
2.2 Alumínios: características gerais	15
2.2.1 Indústria do alumínio.....	16
2.3 Ligas de Al – Si (série 4xxx).....	17
2.3.1Influência da composição microestrutural nas propriedades.....	18
2.3.2 Regra de Hume-Hothery.....	19
2.3.3 Imperfeições cristalográficas	19
2.3.4 Influência de elementos de liga	21
2.4 Compósito de matriz metálica (cmm).....	21
2.5 Fundição e solidificação em molde cilíndrico	22
2.6 Nanotubos de carbonos (NTCs)	23
2.6.1 Características próprias.....	24
2.6.2 Funcionalização	25
2.6.3 Efeito dos NTCs como reforços de uma liga.....	25
2.7 Espectroscopia Raman	26
2.8 Dimples	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Considerações iniciais	31
3.2 Funcionalização	32

3.3 Espectroscopia Raman	33
3.4 Fabricação das ligas com inserção de NTC	34
3.5 Ensaio metalográfico	35
3.6 Laminação	36
3.7 Ensaio de Microdureza	37
3.8 Tratamento de Termoresistividade	37
3.8.1 Teste e cálculo da condutividade elétrica	38
3.9 Ensaio de Tração	40
3.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da fratura	40
3.10.1 Medição dos Dimples	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Espectroscopia Raman	42
4.2 Metalografia	44
4.3 Laminação	45
4.4 Microdureza (HV)	45
4.5 Condutividade Elétrica do fio	49
4.6 Ensaio de Tração	51
4.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fratura	54
5 CONCLUSÃO	56
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o mundo tem vivenciado uma crescente demanda energética, como relata o EPE (2021) que se trata da Empresa de pesquisas Energéticas vinculada ao ministério de minas e energia do país. Essa estimativa é realizada pelo BEN (Balanço Energético Nacional) que destaca o setor industrial e doméstico de forma mais acelerada nesse consumo.

Devido a este crescimento surgem problemas como a elevação de temperaturas de cabos e linhas de transmissão que tem como uma das principais consequências à deterioração das características mecânicas e baixa qualidade de condução elétrica. Com isso, a comunidade científica está realizando pesquisas para o desenvolvimento e aprimoramento de ligas com melhores potenciais mecânicos e elétricos. As de alumínio, já são consolidadas no mercado para esses fins, devido a sua boa propriedade mecânica, juntamente a alta condutividade elétrica e peso reduzido desses cabos. As ligas de alumínio-silício são uma dessas, são comercializadas como alternativa de ligas para condução elétrica.

Entretanto, de acordo com Kaspar *et al.* (2015), a procura de materiais mais leves e mais resistentes continua sendo um tópico importante para uma sociedade futura promissora. Aeroespacial, eletrônica, energia renovável e transporte alternativo são apenas alguns campos em que as vantagens de usar materiais mais leves e mais fortes são evidentes.

Neste contexto, a nanotecnologia, a qual se refere à pesquisa de inovação atrelada para condições especiais do material quando organizadas a partir de estruturas de dimensões nanométricas (MARTINS, 2009), torna-se uma alternativa interessante. Segundo a ASTM estas medidas, variam entre 1 e 100 nanômetros (nm) para serem considerados materiais nanométricos. Além disso, foi com a introdução desses materiais que o meio científico avançou em diversas análises para obtenção de novos materiais; como os compósitos metálicos em matriz de alumínio com introdução de nanotubos de carbonos como reforços nas ligas.

Os nanotubos de carbonos (NTCs) são um desses materiais mais representativos atualmente, apresentando estruturas cilíndricas de dimensões nanométricas, idealizada a partir do enrolamento de uma folha de grafeno, que devido suas propriedades físico-químicas, eletrônicas e biológicas estão permitindo serem utilizados em diversas áreas da ciência. Zarkin (2013), mostra em seu trabalho que os NTCs podem ser classificados em dois tipos: NTC de parede simples (NTCPS) e os NTC de parede múltipla (NTCPM), formados por capas concêntricas.

Desta forma, é atraente à comunidade científica a junção de ligas metálicas como alumínio-silício reforçadas com NTCs dentro da área do setor energético, visando agregar suas propriedades específicas, sobretudo de resistência e leveza em cabos e linhas de transmissão elétrica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos nanotubos de carbono nas propriedades da liga Al 2% Si.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência de NTCs nas propriedades mecânicas e elétricas da liga Al – 2 % Si;
- Observar o efeito dos tratamentos térmicos a 230 °C e 280 °C nas ligas;
- Verificar a microestrutura das ligas com NTC na região fraturada, após o ensaio de tração para analisar seus dimples;
- Averiguar possível aplicação para a liga trabalhada.

1.2 Composição do trabalho

Na Seção 1 foi feita a abordagem de uma problemática atual na área de cabos e linhas de transmissão elétrica, bem como uma possível solução para amenizar esse cenário a partir de considerações gerais sobre o alumínio e suas ligas reforçadas com Nanotubos de carbono, além da exposição do objetivo geral e objetivos específicos do trabalho.

Na Seção 2, realizou-se o estudo bibliográfico sobre o alumínio e a liga Al-Si reforçada com NTCs, assim como as propriedades específicas destes, além das técnicas fundamentais para a realização deste trabalho como o processo de fundição, a funcionalização dos NTCs, Espectroscopia Raman e a análise de dimples.

Em seguida, a Seção 3, apresenta a metodologia aplicada no trabalho com os métodos adotados, equipamentos e softwares usados para fabricação das ligas e a realização dos testes e ensaios.

Já na Seção 4, foram demonstrados os resultados obtidos e as discussões embasadas na literatura.

Por último, na Seção 5, conclui-se sobre o presente trabalho comparando com os objetivos e com a literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais e ligas metálicas

Os materiais metálicos ainda representam o tipo de material mais utilizado na sociedade devido suas múltiplas propriedades. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada e as propriedades mecânicas mais importantes para o projeto são a rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade. Entretanto, de acordo com Callister (2020), há certa dificuldade em identificar duas ou mais dessas propriedades em um único metal, e com isso recorre-se às ligas metálicas que são a junção dos metais com objetivo de conseguir propriedades não vistas nos mesmos individualmente, além disso, a facilidade pela quais essas podem ser conformadas ou fabricadas em componentes úteis é um ponto muito relevante à seleção de materiais.

2.2 Alumínios: características gerais

Segundo a Abal (2021) as reservas brasileiras de bauxita, matéria prima de onde é extraído o alumínio, além de ótima qualidade, também estão entre as maiores do mundo, o que é muito significativo ao país, pois é responsável de grande parte dos utensílios que a sociedade consome. Um dos motivos para isso são vantagens muito importantes que o alumínio apresenta, como a facilidade deste metal ser transformado e usinado, além de outras propriedades como boa condutividade elétrica, alta resistência/ peso, baixo ponto de fusão, resistência à corrosão e condutividade elétrica. Entre as diversas aplicações do metal, se destaca a produção de cabos elétricos.

O alumínio possui um ponto de fusão de 660 °C, considerado relativamente baixo se comparado ao aço que é de 1570 °C. É um metal leve, com peso específico cerca de 2,70 g/cm³, maleável e resistente, além de possuir uma fina camada de óxidos adquirida quando exposto ao ar, que serve para protegê-lo de oxidações. O alumínio não é reativo quando próximo a substâncias inflamáveis ou explosivas. O metal puro possui condutividade elétrica de 62 % segundo a IACS (International Annealed Copper Standard), o que ganha muita relevância se analisada junto com sua baixa densidade, pois se torna um condutor tão eficaz quanto o cobre, porém mais leve e mais econômico, além de apresentar condutibilidade

térmica 4,5 vezes maior que a do aço. Heber Otomar, consultor técnico de desenvolvimento e inovação da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), publicou na revista Alumínio (2021) que o alumínio puro recozido embora com limite de resistência à tração de 48 MPa, muito inferior ao do aço (425 MPa) que é possível elevar este através de ligas com tratamentos térmicos e trabalhos a frios.

2.2.1 Indústria do alumínio

Ainda segundo a ABAL (2021) é possível afirmar que a sociedade adaptou-se em um cotidiano em que o alumínio ganha destaque pela sua múltipla eficiência, isso devido às suas propriedades naturais, como leveza, resistência à corrosão e alta condutividade térmica.

Com isso, surge um número considerado de pesquisas relacionadas a este metal, segundo Henriques (2013) estas visam amenizar os impactos da produção do alumínio em relação ao meio ambiente, já que este processo também pode acarretar impactos ambientais, nas etapas do processo, passando pela extração da bauxita, o grande consumo de energia necessário durante sua cadeia produtiva, e por fim nas emissões de gases de efeito estufa.

Essas questões ambientais ganham força, a partir do consumo acelerado do produto, e paralelo à sua indispensabilidade na sociedade surgem pesquisas como a de Brough (2020) que explana em seu trabalho a tentativa de redução do uso de combustíveis e da eletricidade na produção do alumínio, recuperando o calor residual para reutilizar no processo. Porém, o número mais expressivo de pesquisas esta direcionado à sua alta capacidade de interação com outros elementos, proporcionando a fabricação de ligas com diferentes composições e aplicações tecnológicas, alcançando várias áreas da ciência.

Em seu estudo Zhang (2018) propôs melhorar a propriedade anticorrosiva do alumínio inserindo OZn a partir de um revestimento com infusão de lubrificante e conseguiu bons resultados, sobretudo para superfícies escorregadias. Assadiki (2018) afirma que esses elementos químicos na microestrutura são responsáveis por encontrar uma infinidade de tentativas de aperfeiçoar ligas de alumínio fundido e são mais conhecidos como elementos de liga

A revista Alumínio (2019) anunciou que a indústria do alumínio foi adicionada a lista de atividades essenciais pelo governo federal, após o pleito apresentado pela Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), e apesar de um recolhimento das empresas de alumínio, devido à nova realidade mundial, a entidade explicou que estão trabalhando para dar suporte as empresas, além de ser intermédio de discussão das problemáticas e soluções com o

governo. Além das suas etapas convencionais, como mineração, refinaria, redução do alumínio e o caminho extenso (fabricação dos lingotes, tarugos, etc) há também a etapa de reciclagem, fundamental para conectar diretamente essa indústria à sociedade.

Apesar da sua elevada condutividade elétrica, o Al puro apresenta resistência mecânica à tração muito baixa, e este após passar por algum tratamento térmico para o aumento de sua resistência mecânica pode resultar em um decaimento de sua condutividade elétrica, por isso as ligas Al – Mg – Si (série 6xxx), segundo Valiev (2014) são muito utilizadas como condutores para linhas de energias aéreas, por causa da interessante combinação de resistência e condutividade elétrica.

2.3 Ligas de Al – Si (série 4xxx)

Com o aumento do uso das ligas de alumínio cresce o número de pesquisas relacionadas ao melhoramento das propriedades dessas ligas para atender de maneira mais eficaz as diversas solicitações de serviço (ABAL, 2021). Esse aperfeiçoamento nas propriedades do alumínio pode ser realizado com a utilização de alguns elementos, como zinco, manganês, magnésio, silício. Qiu *et al.*, (2007); Chen *et al.*, (2012) ; Birol, (2013) acreditam que o processo de fundição, resistência à corrosão e soldabilidade são propriedades das ligas de Al-Si que se destacam no meio industrial, arquitetônico, além do automobilístico com revestimentos internos, como a fabricação de blocos de motores.

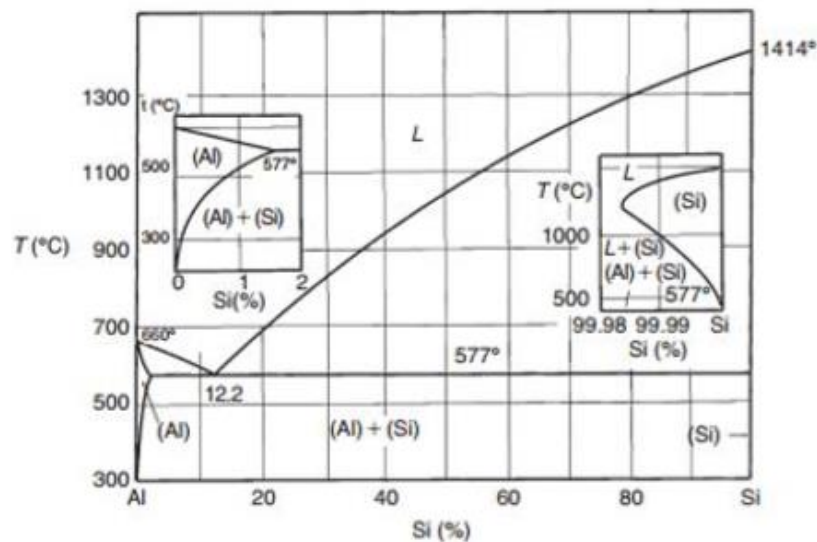
Além de adicionar outras características favoráveis à liga de alumínio com elementos de liga, é possível também obter o refino de grãos da matriz. Um tamanho de grão mais fino melhora o preenchimento do molde, resultando em menos rugosidade e quebras a quente. Segundo, a literatura essa prática pode ser realizada através do aumento da adição de ligas refinadoras; Quadro, Raposo e Sabariz (2016) propuseram uma liga refinadora à base de nióbio, boro e alumínio (Al-3% Nb-1% B) que se mostrou viável.

Barbosa (2014) explica que a liga Al-Si é bastante utilizada na fundição e soldagem devido às propriedades do Si que tem capacidade de melhorar o escoamento do alumínio líquido permitindo que o mesmo flua melhor por meio das cavidades do molde de fundição, permitindo a fabricação de objetos com formatos mais complexos. Além disso, à medida que se resfria reduz a contração, diminui a porosidade nas peças fundidas junto com o coeficiente de expansão térmica e aumenta a soldabilidade.

2.3.1 Influência da composição microestrutural nas propriedades

Nascimento (2015) define o arranjo microestrutural sendo o responsável por conferir ao material uma melhor resistência mecânica, sobretudo à tração, dependendo de como este estiver organizado. Santos (2017), explica que as ligas Al-Si são eutéicas de alta pureza e possuem estrutura lamelar. O silício eutéico ocorre na forma de lamelas finas e bem distribuídas na matriz do alumínio. O refinamento da fase β é função da velocidade de solidificação. Rana *et al*, (2012) afirmam que o sistema binário Al-Si apresenta, uma boa resistência à corrosão e ao desgaste, além do aumento na resistência à abrasão da liga, como mostrada na Figura 1, a partir de precipitados de Si mais rígidos.

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio do sistema Al-Si.



Fonte: Zolotarevsky (2007 apud Moreira, 2017).

Garcia (2005) se aprofunda e diz que muitos aspectos da microestrutura dependem fortemente das condições de solidificação. A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final, nas peças fundidas, as quais já apresentam sua forma definitiva, e também nos produtos que serão preparados para a fabricação de objetos com formatos diversos. As propriedades mecânicas desses materiais dependem de algumas variáveis: espaçamentos dendríticos, tamanho de grão, espaçamentos lamelares ou fibrosos, das diferenças de composição química, do tamanho, formato e distribuição das inclusões, de porosidade formada, entre outras.

2.3.2 Regra de Hume-Rothery

Para análise de ligas, composta de dois ou mais átomos misturados na rede cristalográfica, existem regras que determinam se é possível a formação de solução sólida substitucional, e entre elas uma muito utilizada em ligas metálicas é as regras de Hume-Rothery, que se baseiam nos seguintes critérios:

Tamanho atômico: Se a diferença em tamanho entre os átomos de soluto e solvente for maior do que $\pm 15\%$, as distorções da rede serão tão grandes que a solução sólida não será favorecida, limitada e usualmente a rede só irá aceitar uma fração menor do que 1% de átomos estrangeiros, como mostra na Equação 1. Em compostos iônicos este é o fator mais importante (MIZUTANI, 2010).

$$DR \% = \frac{r_{\text{soluto}} - r_{\text{solvente}}}{r_{\text{solvente}}} \times 100 \% \quad (1)$$

Valência: se o íon inserido possuir uma valência diferente à do íon da matriz, a solubilidade é limitada. A substituição pode acontecer, mas mudanças na estrutura também devem acontecer para manter a eletroneutralidade da carga (MIZUTANI, 2010).

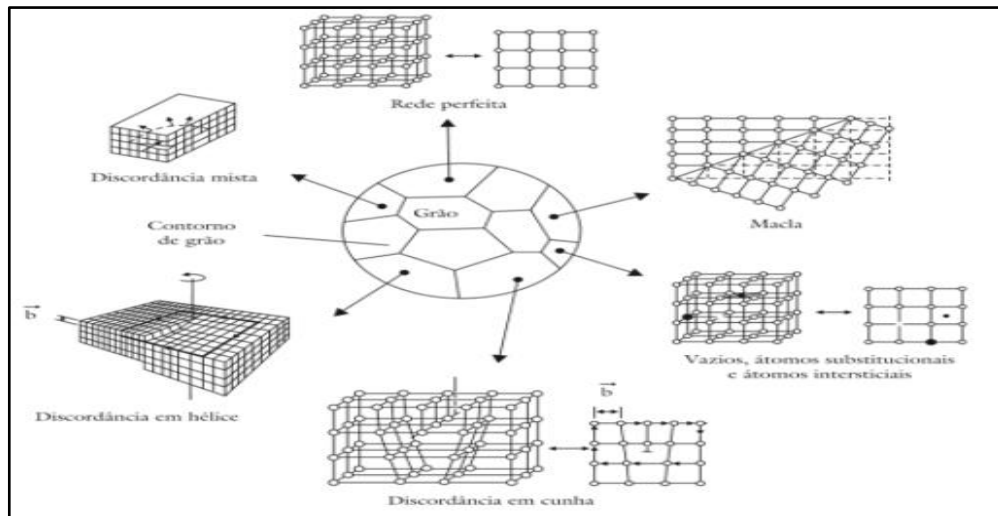
Eletronegatividade: as eletronegatividades devem ser praticamente iguais; quanto mais eletropositivo for um componente e mais eletronegativo o outro, maior será a tendência ao aparecimento de compostos entre eles e menor será a solubilidade (MIZUTANI, 2010).

Estrutura: Para uma boa solubilidade, as estruturas dos cristais dos metais devem ser as mesmas. Porém, isto não restringe a formação da solução sólida (MIZUTANI, 2010).

2.3.3 Imperfeições cristalográficas

Santos (2017) abordaram em seu livro que, apesar da teoria de uma perfeita regularidade no arranjo espacial dos átomos, em sólidos cristalinos, na prática estes apresentam comumente irregularidades, que também são conhecidas como imperfeições ou defeitos cristalinos, determinantes análise do comportamento e propriedades do material. Estas podem ser classificadas, como: imperfeições pontuais, lineares ou discordâncias, e superficiais; a Figura 2 representa representam elas.

Figura 2 - Esquema representativo dos principais defeitos cristalinos.



Fonte: Santos (2017).

Os chamados defeitos pontuais são um dos que mais é identificado em estudos sobre a rede cristalina atômica. Ele se apresenta na forma de pontos na própria rede está associado a vazios, átomos intersticiais e substitucionais.

Os vazios são caracterizados por falta de átomos em posições normais de rede e exercem um papel importante nos movimentos atômicos necessários para as transformações de fases acontecerem no estado sólido. Já os intersticiais e substitucionais, estão relacionados a átomos estranhos a rede, os quais podem ser impurezas ou elementos de ligas. Santos (2017) explica, se, o raio desses átomos for bem menor do que o dos átomos presentes na rede, eles provavelmente irão ocupar interstícios da rede, dando origem aos átomos intersticiais, porém se apresentarem raios próximos tende a substituir alguns átomos existentes na rede, logo serão chamados de átomos substitucionais.

Na liga Al-Si a sua rede cristalográfica é composta por átomos intersticiais, onde a matriz é o Alumínio (rede cristalográfica) e os átomos de Silício são estrangeiros, migrando aos interstícios da rede, formando uma irregularidade/imperfeição pontual. Callister (2020) afirma que essas impurezas são adicionadas intencionalmente com a finalidade de melhorar as propriedades elétricas, mecânicas e corrosivas da liga.

2.3.4 Influência de elementos de liga

O efeito dos elementos de liga é diverso no material, sejam eles nas propriedades mecânicas, elétricas, térmicas e entre outras; cada elemento possui sua característica específica, que inseridas ao metal base podem alcançar propriedades superiores. Segundo Zolotarevsky (2007) as ligas binárias de Al-Si não apresentam benefícios quando são tratadas termicamente, mesmo que a solubilidade do Si no Al varie com a temperatura. Para que o tratamento térmico seja eficaz, é necessária a adição de elementos de liga, tornando com isso a liga suscetível à têmpera e envelhecimento, aumentando o desempenho da liga.

Outro benefício da adição de elementos à liga base, de acordo com Haj, Bouayad, Alami (2020) é que apenas um único elemento, em muitos casos é suficiente para modificar propriedades como o refinamento de grão, diminuição na fase eutética, bem como o tempo de solidificação, com a inserção do Ti na liga Al-Si, a qual é o estudo dos autores supracitados. Kaya, Aker (2016) concluem, experimentalmente que a adição de outros elementos (Sb, Ni, Bi, Cu, Co) na liga eutética Al-Si alteram sua microestrutura, os valores de microdureza aumentam com o aumento da taxa de crescimento dos elementos e a resistência a tração é elevada de acordo com o elemento escolhido.

2.4 Compósito de matriz metálica (cmm)

Nascimento (2015) associa o termo compósito de matriz metálica a uma nova classe da engenharia, que relaciona combinação química e estrutural de diferentes materiais. Desde os anos 70 e 80 os compósitos mais estudadas foram o de matriz polimérica, porém essa ideia se estendeu para matrizes cerâmicas e metálicas, por possuírem grande potencial em altas temperaturas. Há dois processos principais para fabricação dos CMM com alumínio, que é através da Metalurgia do pó e pela Fundição convencional.

De acordo com a Britannica Academic, a metalurgia do pó é a fabricação de objetos de metal a partir de um pó, em vez de fundição do metal líquido ou forjamento a temperaturas amolecidas; tal técnica é seguida de compactação na forma desejada, e depois aquecida (sinterização) a temperatura abaixo do ponto de fusão do metal. Ainda ressalta, que os pós-metálicos são produzidos por meios químicos ou mecânicos. Chiaverini (1992) direciona a técnica para fabricação de peças com formatos complexos e geralmente definitivos, sem necessidade de acabamento posterior, com excelente nível de aproveitamento do material, alta precisão dimensional, grandes lotes de produção, distinguindo-se dos processos

convencionais pela ausência de fase líquida ou presença apenas parcial de fase líquida durante o processamento.

Já na fundição convencional, Soares (2000) explica o metal líquido é vazado num molde, cuja cavidade corresponde ao negativo da peça que se deseja obter. Após vazamento e solidificação, a peça é retirada do molde e feita o acabamento que segue com o corte de canais; rebarbação; usinagem; tratamento térmico e em alguns casos a soldagem, o controle da qualidade final do produto e por último a expedição. Destaca também, que a fundição pode ser obtida a partir de vários processos diferentes, e estes escolhidos de acordo com a necessidade do cliente.

2.5 Fundição e solidificação em molde cilíndrico

A fundição é um processo exclusivo dos metais e básico para as mais diversas ligas atualmente existentes. Callister (2020) define o processo como a fabricação do metal através deste em estado líquido (fundido), sendo derramado na cavidade de um molde que apresente a forma desejada; com a solidificação, o metal assume a forma do molde, sofrendo certa contração (rechupe). Explica também, as situações em que a fundição é empregada que são: Forma acaba grande e complexa, liga específica com baixa ductilidade (dificuldade na conformação a quente e a frio) e é um processo mais econômico, comparado aos demais.

Já a solidificação é o processo final da etapa de fundição, onde o metal líquido já está na fase sólida, ou seja, é a transformação da fase líquida para a sólida, que segundo Garcia (2007), afirma ser o molde o principal meio de extração de calor do metal para garantir essa transformação, e a velocidade com que ocorre a extração vai depender da capacidade de absorção de calor pelo molde, influenciando diretamente nas taxas de resfriamento, vale ressaltar a temperatura de vazamento do metal líquido, como uma variável de grande importância, assim como a intensidade das correntes convectivas durante o preenchimento do molde.

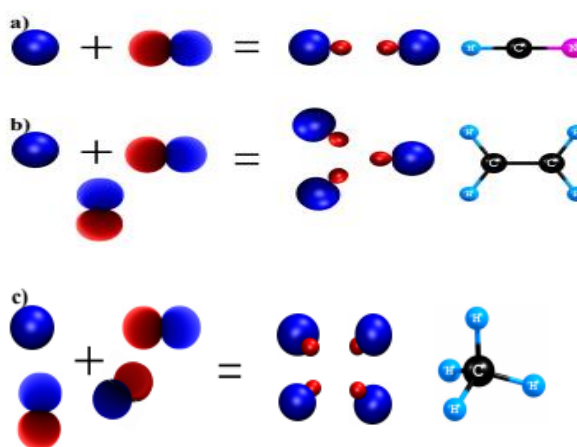
As propriedades mecânicas da liga ou metal bruto solidificado irão depender da microestrutura final, como tamanho de grão, espaçamentos dentrícos ou celulares, porosidade formadas, forma e distribuição de inclusões, etc. Esses microconstituintes, resultantes da solidificação estão ligados à forma como a interface sólido-líquido se apresenta, segundo Dias (2016), em condições padrões essa interface deveria ser plana, entretanto alterações nos parâmetros constitucionais e térmicos do sistema metal/molde durante a solidificação ocorrem instabilidades dessa região (S/L), ocasionando microestruturas

morfológicas divergentes. Outra variável que microscopicamente que não é uniforme, segundo Ohno (1994) é a condutividade térmica, na prede do molde, e com isso a nucleação cresce local e preferencialmente onde a condutividade é alta.

2.6 Nanotubos de carbonos (NTCs)

O carbono é um dos elementos mais antigos e abundantes no mundo. Pertencente do grupo dos não metais da tabela periódica, o carbono faz quatro ligações em sua camada de valência (tetravalente). Além disso, Nascimento (2015), explica que para gerar compostos com estruturas e propriedades diferentes, basta que ocorra ligações de átomos de carbono entre si, o que irá depender da natureza da ligação entre os dois átomos adjacentes. Tal diversidade de estrutura deste elemento deve-se às três hibridizações em que ele pode se configurar: sp^3 , sp^2 e sp , como podem ser visto a seguir na Figura 3 em uma molécula de metano CH_4 .

Figura 3 – Orbitais S e P e suas respectivas hibridizações sp (a), sp^2 (b) e sp^3 (c).

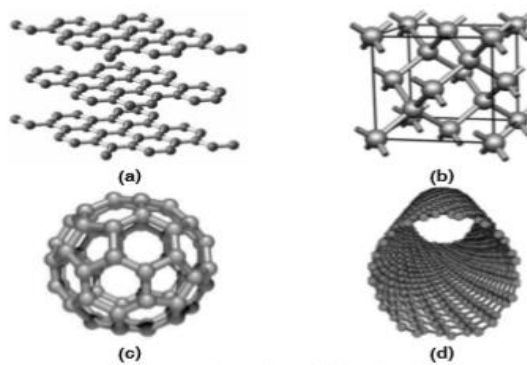


Fonte: Ferreira (2018).

Essas hibridizações geram outras formas de carbonos conhecidos como alótropos de carbonos, e entre eles estão o diamante, o grafite, o fullereno e os nanotubos de carbono (NTCs), ilustrado na Figura 4. Martín (2011), diz que os fullerenos emergem de um nanotubo de carbono, semelhante a um casulo em um caule; ainda explicam que a partir deste alótropo surgem os grafenos, sendo estes uma folha monoatômica de grafite, materiais esses que estão recebendo grande atenção da comunidade científica internacional. Já os Nanotubos de Carbono, tanto os de paredes simples quanto os de múltiplas, são tubos cilíndricos com

paredes feitas de folhas de grafeno, e segundo Harris (2009), há alguns tipos NTCs, que irá depender do arranjo dos hexágonos em torno da circunferência, alguns deles são o Zig Zag e Armchair.

Figura 4 - Formas alotrópicas do carbono: a) grafite, b) diamante, c) fulereno e d) nanotubos de carbono.



Fonte: Fonseca, Trindade (2011).

2.6.1 Características próprias

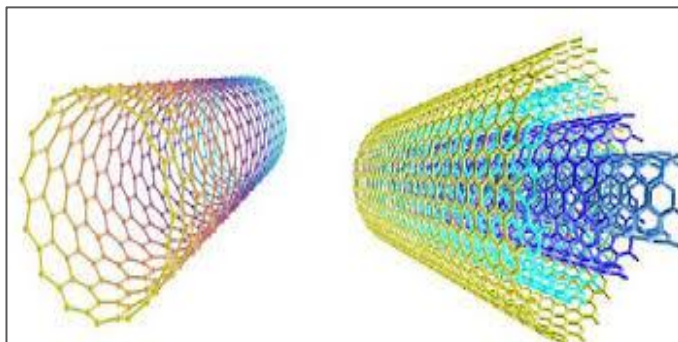
Harris (2009), mostra em sua literatura que as características dos NTCs são as mais diversas e surpreendentes possíveis. Os Nanotubos de carbono podem ser tanto metal igual ao cobre, como semicondutores iguais ao silício, o que está relacionado à sua estrutura.

Algumas propriedades e características, como explica Ferreira (2018) como resistência mecânica, condutividade elétrica e térmica, ponto de ebulição e fusão, além da força de ligação estão associadas ao tipo de hibridação que os carbonos de um material apresentam na sua estrutura, juntamente com o formato da cadeia. Os NTCs apresentam uma estrutura eletrônica do tipo sp^2 , os quais formam uma grande rede compacta de diversos ciclos compostos por seis átomos de carbono, onde as ligações sigma na estrutura hexagonal são reforçadas por ligações π ressonantes, mesmas encontradas em um anel aromático. Essa característica torna o NTC um dos materiais mais resistentes que existem, apesar de ser feito apenas de átomos de carbono e ter dimensões nanométricas.

Dresselhaus (2001) também afirmam que as propriedades dos NTCs são relacionadas por vários fatores, como a formação de suas paredes (simples ou múltiplas), visto na Figura 5, o número de camadas concêntricas (paredes múltiplas), o seu diâmetro e pela maneira como a folha de grafeno se estrutura em volta do eixo de simetria até formar os NTC, e essas características próprias são, por exemplo, são capazes de conduzir corrente elétrica com

intensidade em média mil vezes ao cobre, apresentam uma resistência à tensão vinte vezes mais elevada que o melhor aço, transmite o dobro do calor do diamante puro, possuem uma estrutura estável até os 3000 °C, entre outras.

Figura 5 - Representação de um NTC de parede simples e de paredes múltiplas.



Fonte: Tjong (2009 Apud Rodrigues, 2015).

2.6.2 Funcionalização

A funcionalização é um processo que é realizado nas paredes, pontas ou por encapsulamento do nanotubo e consiste em alterar as propriedades originais dos nanotubos através da adsorção ou ligação de átomos ou moléculas a esse, com o objetivo de aumentar seu potencial e com isso facilitar as interações com outras moléculas, orgânicas e biológicas; explica Filho e Fagan (2007). Fonseca e Trindade (2011), falam sobre a funcionalização dos NTC como algo essencial a essa estrutura. Os nanotubos de carbonos são suscetíveis à ocorrência de vacâncias, esses defeitos estruturais, por sua vez alteram a reatividade química da estrutura de carbono, deixando-os reativos. Embora, tal característica seja benéfica em muitas situações, os carbonos que se encontram nesses “vazios” realizam ligações distorcidas, e com isso há necessidade de corrigir estas nas superfícies dos NTC e de completar as ligações químicas através de adsorções atômicas e funcionalização.

2.6.3 Efeito dos NTCs como reforços de uma liga

Zhou *et al* (2019), comprovaram em um estudo que realizaram com um composto híbrido de NTCs e SiC em uma liga de Az61(liga de magnésio recristalizada) a fim de obter ganhos de resistência , que os reforços híbridos refinam efetivamente o tamanho dos grãos da matriz, através da nucleação simulada por partículas e os efeitos heterogêneos de nucleação e fixação de grãos são causados pelos NTCs. Brito (2021) também concorda que há muita

possibilidade para o destino dos NTCs, como reforços de ligas, sobretudo nas de alumínio por processos como o de solubilização, que afirma tratar-se de uma técnica viável e eficaz na melhora da durabilidade da área superficial do alumínio.

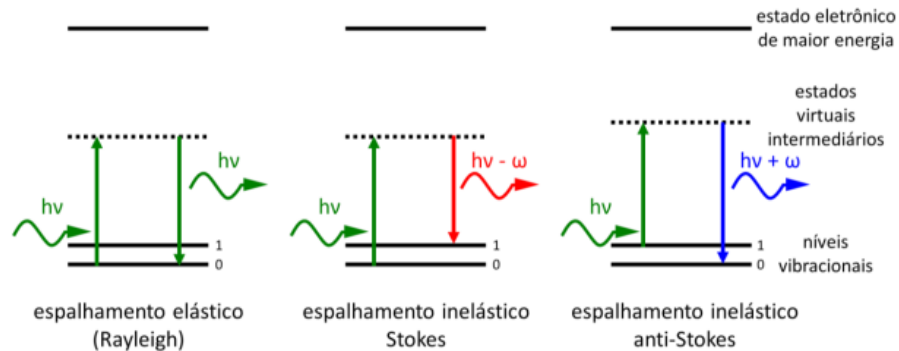
Para Raus, *et al*, (2014) os Nanotubos de Carbonos ganham destaque na sua capacidade de transporte de corrente excedendo os supercondutores isso devido às suas propriedades elétricas ajustáveis, aliado a sua resistência mecânica, condutividade térmica, excedendo o diamante; com isso torna-se interessante a aplicação deste material na fiação elétrica, pois os fios feitos de cobre e alumínio (convencionais) sofrem de alguns problemas como peso resistência mecânica, o que retarda seu uso em telecomunicações modernas, desempenho mecânico e eletro migração. Ainda ressalta que a crescente demanda por esses condutores de metal convencionais paralelo a seus preços crescentes sugere que um material de baixo custo que pode superar os condutores convencionais seria altamente desejável.

2.7 Espectroscopia Raman

A Espectroscopia Raman é uma das técnicas mais utilizadas em materiais com Nanotubos de Carbonos à identificação de substâncias desconhecidas, Uma das grandes vantagens dessa técnica é a possibilidade de a maioria das amostras poderem ser estudadas em qualquer estado físico. Segundo Haack (2015) essas amostras podem ser analisadas em líquidos, soluções, pastas, pós, fibras, gases e superfícies e aplicadas às mais diversas áreas, a exemplo da mineralogia, semicondutores, corrosão e análise de formas de estruturas alotrópicas do carbono, como os Nanotubos de Carbono.

Santos, *et al* (2019) diz é possível a análise da espectroscopia Raman, devido a deslocamentos de frequência, que ocorre devido a uma perturbação das moléculas de forma vibracional do material, quando incididos com uma radiação monocromática na superfície, originando o fenômeno de Espalhamento Raman (Espalhamento Inelástico), que se divide em três momentos: Frequência da radiação igual a da incidente, na zona elástica (Espalhamento Rayleigh), frequência com deslocamentos menores que a radiação incidente, na zona inelástica (Espalhamento Stokes) e frequência com deslocamentos maiores à radiação incidente (Espalhamento Anti-Stokes), como ilustrado na Figura 6.

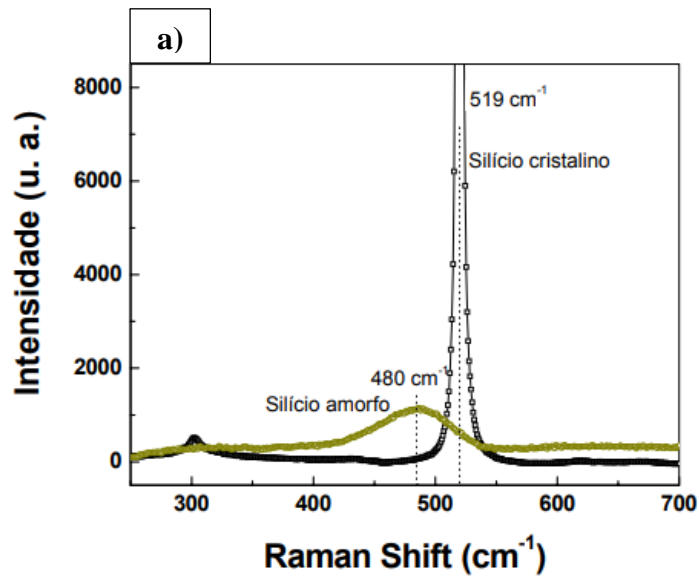
Figura 6 - Representação esquemática do mecanismo de Espalhamento Raman.



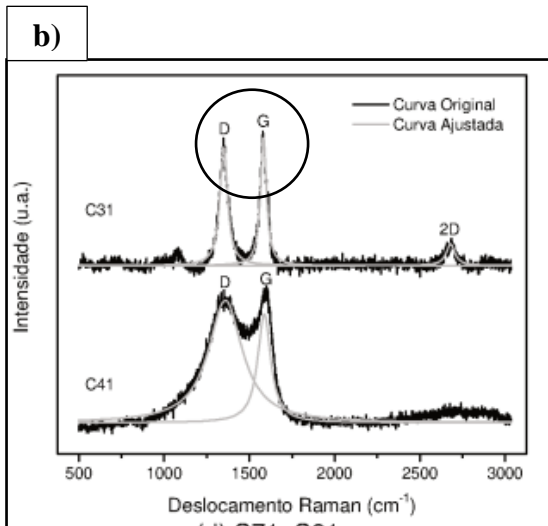
Fonte: Silva (2021).

São nos Espalhamentos Stokes e Anti-Stokes que é possível observar a diferença entre as energias de radiação incidente e espalhada, que Wiley (2002, apud Silva, 2021) afirma estarem relacionadas às diversas propriedades vibracionais de cada material. Isso acontece, quando a energia do fóton incide no elétron no seu estado fundamental (Stokes), na parte em Vermelho da Ilustração e depois atinge a molécula já em um nível excitado (Anti-Stokes), parte em Azul. O espectro da Figura 7 mostra alguns espectros obtidos a partir da técnica de espalhamento Raman e algumas informações técnicas estão exibidas no Quadro 1.

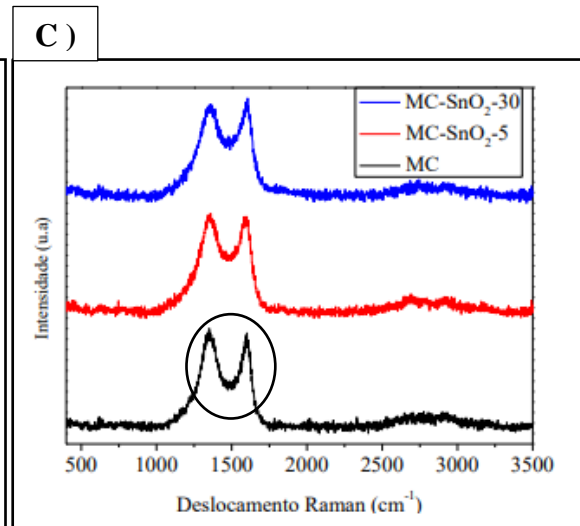
Figura 7 - Espectros obtidos a partir da técnica de espalhamento Raman: Espectro Raman Padrão de Silício (a), Espectro Raman de Grafite (b), Espectro Raman de Material carbonoso (c).



Fonte: Ribeiro (2009).



Fonte: Wesling (2020).



Fonte: Adaptado de Fonseca et al. (2020).

Quadro 1 - Largura e razão das intensidades.

Materiais	FWHM D (cm ⁻¹)	FWHM G (cm ⁻¹)	ID/IG
Grafítico (C31)	54,4	42,9	0,92
Carbonoso poroso (MC)	161,61	82,48	1,13

Fonte: Adaptado de Fonseca et al.(2020); Wesling (2020).

Os Espectros acima pertencem ao podem mostrar comportamentos específicos de cada material através da interpretação de suas bandas e picos. A Figura 7a exibe um espectro típico de Silício cristalino, onde se observam as ligações de Si-Si com um pico centrado de 519 cm⁻¹, e para a banda ao lado de filme de Silício amorfo notam-se as ligações Si-Si dispersas na rede amorfa com deslocamento centrado em 480 cm⁻¹.

Já em espectros Raman envolvendo Carbono, como nas Figuras 7b e 7c, é através da correlação entre as bandas **D** que representa o grau de desordem/defeitos estruturais e **G** que representa o ordenamento estrutural da rede que é possível se identificar as formas alotrópicas do carbono e se o Carbono presente irá conceder ao material característica amorfa ou cristalina. Materiais amorfos são considerados metaestáveis, ou seja, não há formação da estrutura cristalina, caracterizando uma estrutura atômica sem ordenamento, além disso, esse tipo de estrutura pode oferecer ao material propriedade como, elevada resistência mecânica e alta resiliência, com elevado módulo de elasticidade e também de dureza.

Jorio *et al.* (2003) diz que para carbonos cristalinos a largura das bandas deve está entre 30-60 cm⁻¹, e para carbonos amorfos superiores a 100 cm⁻¹.

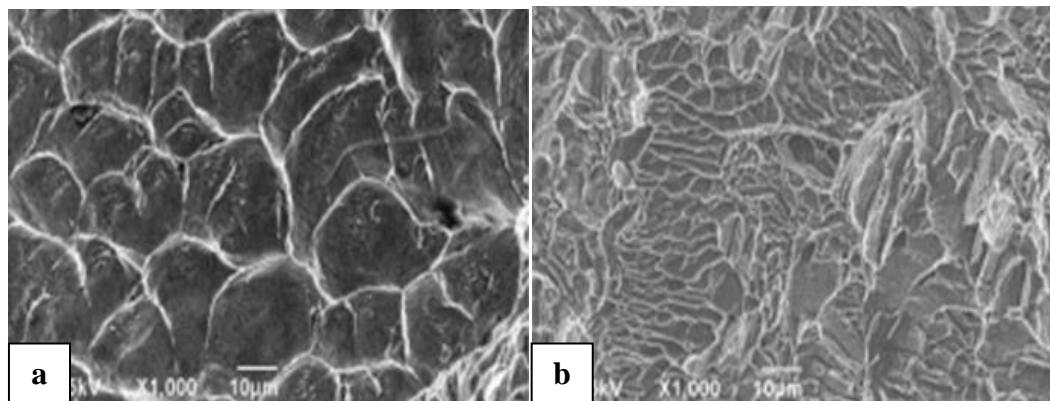
Essa largura é determinada a partir da equação da “largura a meia altura”, simplificada pelas siglas FWHM, originada do inglês *full width at half maximum*, a qual pode

ser obtida através do software Origin. Outro parâmetro importante é a relação das intensidades através da razão de ID/IG, que quanto maior for o valor, maior será o grau de desordem presente na estrutura da amostra. Nas Figuras 7b e 7c, se comparadas é perceptível um comportamento mais amorfo da parte do Material carbonoso e uma cristalinidade maior na amostra de Grafite.

2.8 Dimples

Outra maneira de entender o comportamento mecânico de uma liga é através da análise de seus dimples, que traduzido para o português significa 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. Vydehi (2006, apud Azevedo, 2017) foi mais específico afirmando que um material com maior ductilidade apresenta em sua microestrutura microcavidades do tipo cônica e profundas e acrescenta dizendo que o formato e a profundidade dessas microcavidades também podem estar relacionados, sobretudo com o modo da tensão aplicada, seja tração, cisalhamento ou torção, influenciando na tenacidade das ligas, visto nas Figuras 8a e 8b. Azevedo (2017) continua, dizendo que o coalescimento desses dimples ocorre em interface da matriz com partículas de segunda fase, contornos de grãos, imperfeições e microporosidades, mas que podem ocasionar falha de serviço e fratura da liga, se submetidas estas a cargas crescentes.

Figura 8 - Micrografias em MEV das ligas Ti42%Nb-DF em (a) e Ti42%Nb-E em (b).



Fonte: Azevedo (2017).

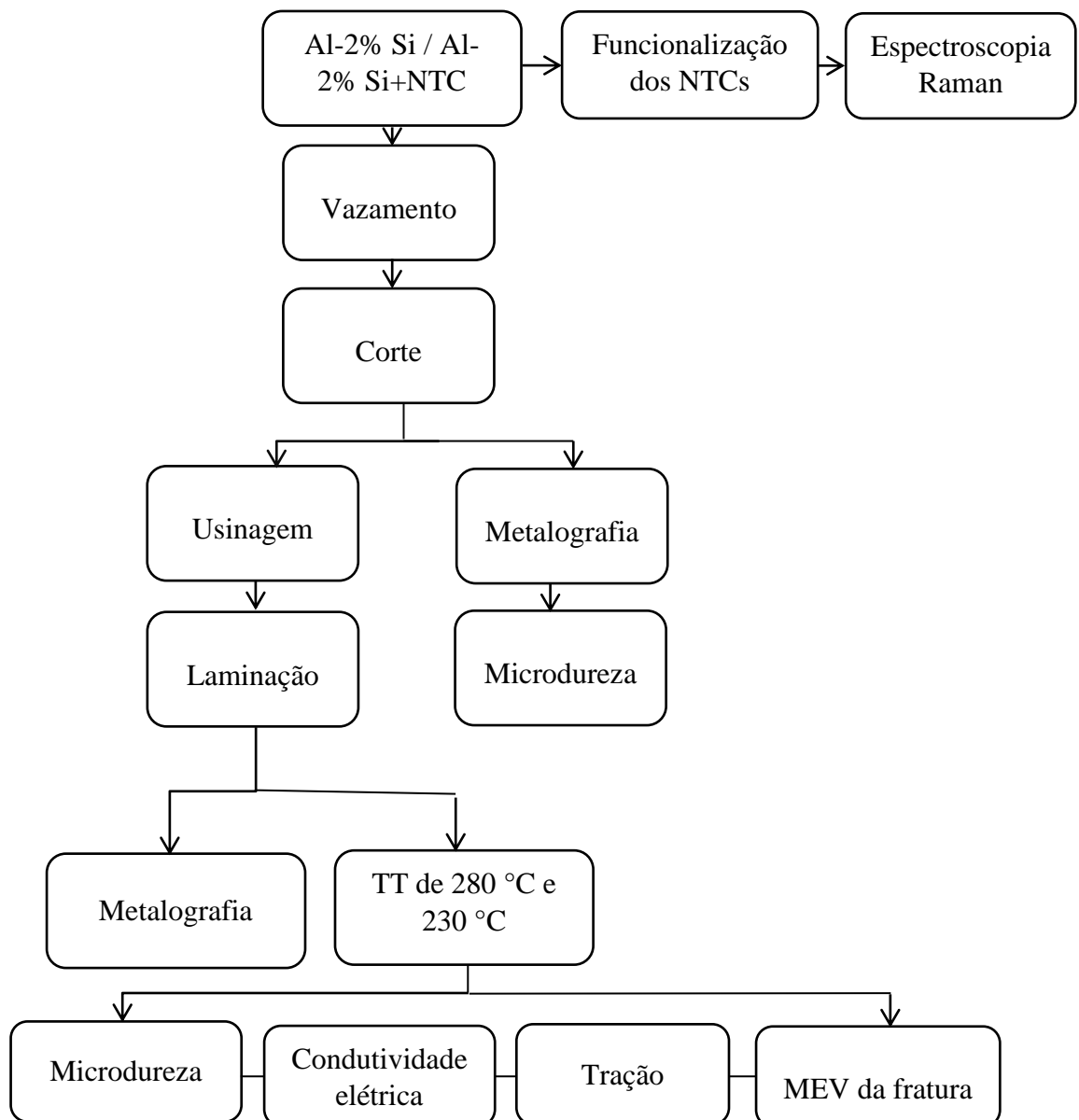
Dieter (1991, apud Pinho, 2021) explica melhor, dizendo que com a união desses dimples também é possível a geração de trincas que se propagam rapidamente por meio de esforços cisalhantes, por todo o material, seguindo em direção à superfície, que termina ocasionando a fratura final. Trabalhos como o de Cavalcante (2016) utilizando ligas de alumínio submetidas a tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial mostrou que a superfície de fratura mais plana e menos rugosa tiveram maior dureza e menor tenacidade, já as com superfície mais rugosa e com grande quantidade de dimples apresentaram maior ductilidade. Para melhor prever se a liga irá deformar suficiente quando solicitada em serviço é que vários meios de medir o tamanho das microcavidades, microvazios e grão foram desenvolvidos e um desses é o cálculo da média da relação entre largura e altura dos dimples, que podem ser auxiliados com softwares.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações iniciais

Para fabricar o material pesquisado nesse trabalho, usou-se alumínio comercialmente puro, lingote doado pela empresa Albras S.A, Barcarena-PA, com aproximadamente 99,73 % de pureza. O Nanotubo de Carbono foi adquirido pelo grupo de pesquisa Engenharia de Materiais GPEMAT- UFPA, sendo esse o nanotubo de paredes múltiplas. A metodologia para o desenvolvimento do presente trabalho seguiu o fluxograma da Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma geral das ligas.



Fonte: Autora (2022).

Antes de iniciar, verificou-se o grau de solubilidade da liga, de acordo com a regra de Hume-Hotery de Al-Si que são base deste estudo.

- Regra 1: $DR \% = \frac{r_{\text{soluto}} - r_{\text{solvente}}}{r_{\text{solvente}}} \times 100 \%$

R Si = 0.117nm e R Al = 0,143nm.

$$DR \% = \frac{r_{0.117} - r_{0.143}}{r_{0.143}} \times 100 \% \sim 18 \%; \text{ Não favorável}$$

- Regra 2: O Si possui estrutura cristalina Cúbica do Diamante e o Al estrutura cristalina, Cúbica de Face Centrada (CFC) , o que é **Não favorável** ✓
- Regra 3: E Si = 1.80 e E Al = 1.5 Assim, DE% = 0,30 = 30 % ~ **favorável** ✓
- Regra 4: Valência do Si = +4 e do Al = +3 ~ **favorável** ✓

A partir dos cálculos da regra de Hume-Hotery é possível confirmar a literatura, mostrando que os átomos de Silício (átomos estrangeiros) exercem função de átomos intersticiais na matriz de alumínio, porém não há restrição de solubilidade na liga de Al-Si.

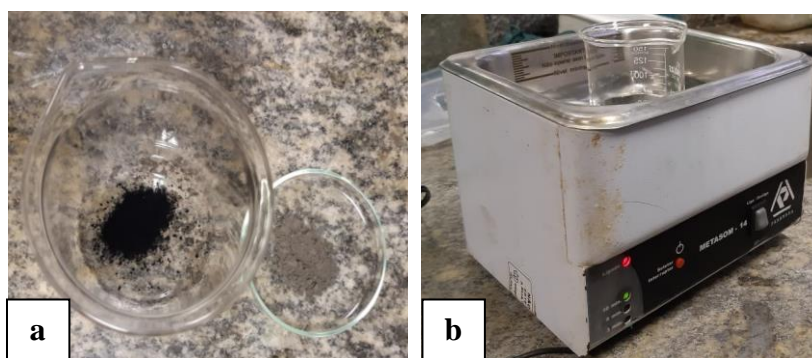
3.2 Funcionalização

Esta etapa tem como objetivo principal aumentar a dispersão e evitar a formação de aglomerados na matriz, diz Negri (2020). Para realização desta etapa, foi utilizado o modelo de funcionalização de Ferreira (2018) como base e adaptado nas proporções do presente trabalho.

Primeiro colocou-se 26 mL de peróxido de Hidrogênio junto com 5 % de NTC no aparelho ultrassônico por 30 minutos, agitando o frasco manualmente a cada 5 minutos, e em seguida a adição de 10 mL de álcool Isopropílico e agora com o pó de silício e novamente a ultrassonicação por mais 30 minutos, em condições de temperatura controladas em banho termostático, e as amostras obtiveram temperaturas constantes de 10 °C. A sequência da funcionalização do NTC e o Si estão apresentados na Figura 10. Quando, se adicionou o peróxido objetivou-se fazer com que as partículas de Alumínio possam interagir melhor com os NTC, visto que a massa específica do Alumínio ser superior e tender a se acumular no fundo do recipiente.

Após esta etapa, iniciou-se o procedimento de secagem, na qual se levou para a estufa as amostras, em um refratário, a 100 °C, por aproximadamente 2 h. Valem ressaltar, que a estufa foi aberta a cada 30 minutos para que os vapores de álcool fossem eliminados do equipamento, e para finalizar o pó metálico foi removido por uma espátula metálica.

Figura 10 - Beckers com pó de NTCs e Sí (a); Aparelho ultrassônico (b).



Fonte: Autora (2022).

3.3 Espectroscopia Raman

Para comprovar a existência dos nanotubos de carbono na matriz metálica foi usado à espectroscopia Raman. Esta técnica é incidida diretamente sobre a amostra, baseia-se na luz, monocromática e de determinada frequência, espalhada ao incidir sobre o material a ser estudado. É uma descrição vibracional através das moléculas. Os espectros Raman foram registrados utilizando um espectrômetro, acoplado a um microscópio, podendo ser visto na Figura 11. A técnica se consolidou através de geometria de retro espalhamento, seguindo as especificações do Quadro 2.

Quadro 2 - Especificações da técnica de Espectroscopia Raman.

Linha de laser	Potência de saída de laser	Tempo de acumulação	Acumulações	Lente	Abertura	Foco	Intervalo espectral medido
532 nm	20 mw	100 s	4	20x	0,35	26,5	100–300 cm^{-1}

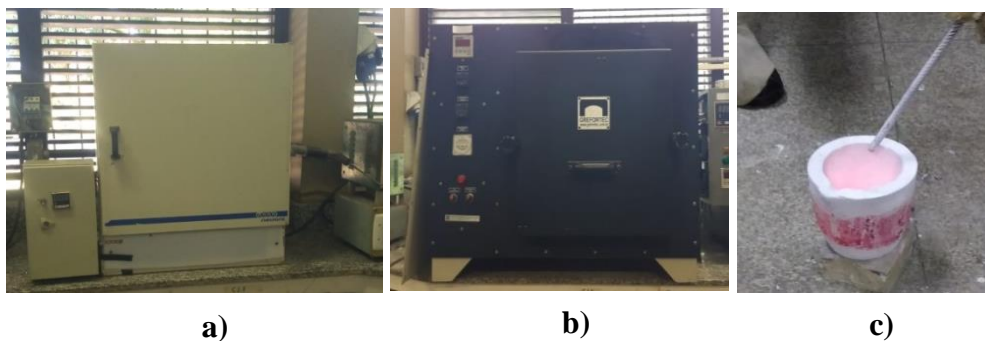
Fonte: Autora (2022).

Figura 11 - Espectro Raman.

Fonte: Autora (2022).

3.4 Fabricação das ligas com inserção de NTC

Primeiramente, levou-se até a estufa o cadinho, recipiente feito de carbetto de silício para retirar qualquer umidade presente nele (Figura 12a), este foi revestido de alumina, com o objetivo de evitar aderência do material às paredes do recipiente e evitar contaminações na mistura, e é utilizado para fundir o material dentro do forno. Com isso, iniciou-se o processo de fundição com o alumínio comercialmente puro, presente no cadinho, levado ao forno tipo Mufla, da marca GREFORTEC (Figura 12b) por 1 h, a 900 °C, como medida de segurança para prosseguir com as etapas posteriores sem haver solidificação antes de finalizar o processo; em seguida, retirou-se do forno e introduziu-se gás argônio (gás inerte) a fim de facilitar a separação da escória com a liga, já que esta tende a ser menos densa do que a mistura metálica, concentrando-se na superfície do cadinho, e para tal é usado uma peça cilíndrica metálica coberta de alumina para realização da mistura, como mostra a Figura 12c.

Figura 12 - Estufa (a); Forno, tipo Mufla (b); Remoção da escória com a peça metálica (c).

Fonte: Autora (2022).

A quantidade de cada material foi verificada através de uma balança de precisão Marca SHIMADSU. Adicionou-se 2 % de Silício + NTC funcionalizado, envolvida em papel alumínio devido sua estrutura ser muito volátil, quando a temperatura do metal líquido caiu para aproximadamente 720 °C, sem retirar o gás argônio do banho metálico, mexendo com a espátula de forma interrupta. Então, o metal foi vazado a 720 °C, em molde cilíndrico como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Metal vazado a 720 °C em molde cilíndrico.



Fonte: Autora (2022).

Um termopar em contato com o banho metálico foi conectado ao computador, o acerto da composição foi realizado para uma Temperatura Liquidus de acordo com o especificado para cada liga (no caso da liga Al- 2 % Si e Al- 2 % Si-NTC). O Quadro 3 mostra a quantidade de cada elemento presente nas ligas.

Quadro 3 - Quantidade (em %) das ligas Al-2 % Si / Al-2 % Si-NTC.

Elementos	Al	Si-NTC	NTC
% Presente de cada elemento	98	2	0,1

Fonte: Autora (2022).

3.5 Ensaio metalográfico

Após a completa solidificação do material, iniciou-se o processo de usinagem, que tem como finalidade melhorar o acabamento da peça e evitar possíveis defeitos na laminação; na usinagem foi feito o cilindramento para o diâmetro de 18,5 mm. Após isto, foram seccionados

uma pequena parte para serem submetidos ao processo de lixamento e polimento. Usaram-se lixas de 80 a 1500 mesh, seguido de polimento, na politriz (Figura 14) e manualmente com a ajuda de uma pequena quantidade de alumina de 0,3 e 0,5 microns. Quando essa já se encontrava apta, a superfície polida foi atacada com 50 mL do reagente Keller e revelada a macroestrutura do material.

Figura 14 - Lixadeira e politriz.



Fonte: Autora (2022).

3.6 Laminação

A parte não seccionada dos lingotes após a usinagem foi destinada a laminação a frio, utilizando-se dois laminadores duo reversível, da marca MENAC, Figura 15; esses laminadores possuem diferentes secções circulares em seus canais de laminação (sendo o diâmetro de interesse neste estudo o de 3 mm).

Figura 15 - Laminadores utilizados na deformação plástica a frio da liga.



Fonte: Autora (2022).

3.7 Ensaio de Microdureza

A microdureza pode revelar valores muito importantes sobre a resistência do material a partir de sua estrutura. Para quantificar essa propriedade, utilizou-se um microdurômetro marca Digital Metallic Vickers Hardness TH-710, mostrada na Figura 16. A peça metálica foi preparada (lixada e polida novamente) e colocada na base de sustentação do microdurômetro, a carga de ensaio selecionada foi de 100 kgf, e o tempo de 11 segundos, e aplicada sobre a área de medição. Após isto, realizaram-se sete endetações em cada corpo de prova em pontos aleatórios da superfície do material. Depois das medições das diagonais, tiraram-se as médias e então os dados foram disposto em uma tabela para análise da resistência dos materiais, seguindo o especificado no ensaio de microdureza, NBR 14155.

Figura 16 - Microdurômetro.



Fonte: Autora (2022).

3.8 Tratamento de Termoresistividade

Depois de laminadas, as ligas foram submetidas ao tratamento de termoresistividade elétrica, semelhante ao tratamento de envelhecimento artificial para então passarem por ensaio de condutividade elétrica. Esse tratamento térmico tem como finalidade quantificar a capacidade de resistência elétrica de um corpo de prova, e verificar se o mesmo tem como atuar em redes de energia. O ensaio se baseou nas seguintes normas:

- Companhia Paranaense de Energia – COPEL: Classifica os condutores elétricos como termorresistentes, se os mesmos não apresentarem perda superior a 10 % do seu limite de resistência a tração, quando submetidos à temperatura de 230 °C durante 1 hora.

- ASTM BR941 – 10: Descreve que para considerados termorresistentes, o fio não deve ter perda superior a 10 % de seu limite de resistência à tração , quando submetidos a 280 °C , por 1 hora e resfriado à temperatura ambiente.

Além da avaliação mecânica, a norma também dispõe a leitura da termorresistividade através da resistividade elétrica, a qual após ser submetido à temperatura o material não deve ultrapassar $0,02973 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ a 20 °C, sendo sua condutividade elétrica menor a 60 % IACS.

3.8.1 Teste e cálculo da condutividade elétrica

Após o tratamento térmico, as ligas foram submetidas pelo teste de condutividade elétrica, através do Multiohmímetro (ponte de kelvin) MEGABRÁS modelo MPK-2000, como pode ser visto na Figura 17. Para o teste foram levados 3 CPs de ligas não tratadas, 3 CPs tratadas a 230 °C (COPEL) e 3CPs tratadas a 280 °C (ASTM BR941 – 10); o mesmo foi feito para as duas ligas: Al-2% Si e Al-2 % Si-NTC.

Figura 17 - Microhomímetro utilizado para verificação da condutividade do fio.



Fonte: Autora (2022).

Após o teste atentou-se para confirmar os dados obtidos com as Normas. Para o cálculo da resistência elétrica dos fios, com diâmetro final de 3 mm, utilizou-se a Equação 1 da resistência, a qual é respalda pela norma NBR 6814, mostrada a seguir que corrige a temperatura de verificação para 20 °C (Temperatura padrão recomendada pela norma NBR 5118). Em cada fio, verificou-se a resistência elétrica em três distâncias diferentes e em seguida tirou-se a média com o desvio padrão, inserindo os valores na equação, seguindo o passo a passo:

Passo I

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

onde:

t = temperatura utilizada na medição, obtida em °C;

R_t = resistência a T °C, em Ω;

R₂₀ = resistência alterada para 20 °C, obtida em Ω;

α = coeficiente de variação da resistência relacionado à temperatura em temperatura de 20 °C, exigido pela norma para ligas de alumínio.

Passo II

Após os valores de resistências terem sido corrigidos a 20°C, conseguiu-se a resistividade, através da Equação 2 (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 parte transversal do corpo verificado, obtido em mm².

Passo III

Por último, os valores alcançados serão, inseridos na Equação 3 para serem convertidos em condutividade elétrica, segundo a IACS (“International Annealed Cooper Standard) que trata-se de um padrão internacional de condutividade 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 = condutividade elétrica do fio, obtida em IACS;

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

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

3.9 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é baseado na norma ABNT NBR 6810, tem como intuito caracterizar mecanicamente o material estudado, a partir do limite resistência a tração. Foram cortados 3 CPs de 23 cm cada de um fio laminado. Foi usada para a uma máquina universal Kratos, com 15 mm de distância entre as garras da mesma, durante o ensaio de tração (Figura 18) e os dados captados por um software com resultados revelados para a confecção dos gráficos e análise das propriedades.

Figura 18 - Máquina SERVAPULSER, utilizada no ensaio de Tração.



Fonte: Autora (2022).

3.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da fratura

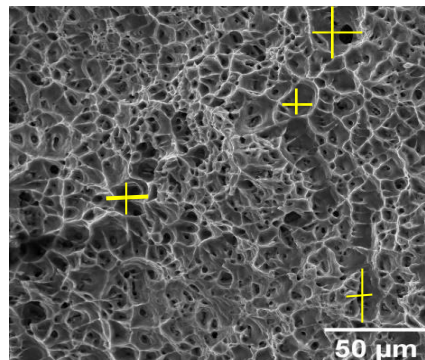
A Microscopia Eletrônica de Varredura é utilizada para se obter a microestrutura dos materiais com alta ampliação e melhor nitidez em torno de 1000 vezes em relação ao microscópio óptico. A caracterização micrográfica da região fraturada foi realizada usando um microscópio eletrônico de varredura TESCAN MIRA3, onde se observou a parte inferior e superior para uma análise mais completa do comportamento microestrutural de cada liga com NTCs tratadas termicamente e comparadas com a que não sofreu efeito dos TT.

3.10.1 Medição dos Dimples

Para um melhor entendimento a respeito do comportamento mecânico da liga Al-2 % Si+NTC a partir da sua microestrutura efetuou-se uma medição dos dimples, baseada na norma da ASTM E 112-96 que se trata da medição do tamanho médio de grãos interceptados que são usados apenas na caracterização das seções de grão bidimensionais revelados pelo plano de seccionamento (grão plano). A literatura mostra vários meios pra determinação desses valores, mas o presente trabalho utilizou uma adaptação da norma, verificado na obra de Narayanasamy et al (2006; 2008 apud LIMA, 2014), exposto na Equação 4 , onde traçou-se uma linha na horizontal (L = largura) e outra na vertical (W = altura), onde ambas se cruzam, tocando cada linha na extremidade e com isso obter a dimensão das microcavidades (ϑ), demonstrado na Figura 19.

$$\vartheta = \frac{L}{W} \quad (4)$$

Figura 19 - Medições de Dimples em MEV das ligas com NTC.



Fonte: Autora (2022).

Para melhorar a estimativa trabalhou-se com 15 medições para cada liga com NTCs, tratadas termicamente, e isso foi possível com o auxílio do software de refinamento de imagens ImageJ que ajudou também na calibração das imagens obtidas por MEV; depois retirou-se a média aritmética das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas a seguir mostram valores da média e desvio padrão dos ensaios de microdureza, condutividade elétrica e tração os quais serão discutidos posteriormente, sendo a Tabela 1 com resultados correspondentes às ligas sem o nanotubo de carbono e a da Tabela 2 contendo nanotubo de carbono.

Tabela 1 - Valores de microdureza, condutividade elétrica e tração para a liga Al - 2 % Si.

Microdureza (HV)	Média	Desvio padrão
STT	44,49	2,7
230 °C	50,51	2,1
280 °C	45,11	1,47
Condutividade elétrica (IACS %)	–	–
STT	57,84	0,003
230 °C	65,84	0,005
280 °C	67,38	0,008
Tração (MPa)	–	–
STT	228,734	5,839
230 °C	236,209	1,446
280 °C	185,362	12,826

Fonte: Autora (2022).

Tabela 2 - Valores de microdureza, condutividade elétrica e tração para a liga Al - 2 % Si+NTC.

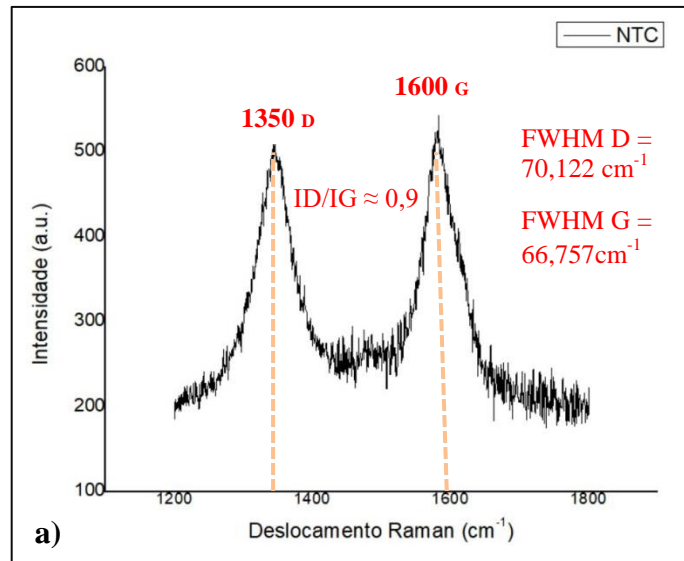
Microdureza (HV)	Média	Desvio padrão
STT	47,93	2,36
230 °C	53,72	1,55
280 °C	49,44	2,17
Condutividade elétrica (IACS %)	–	–
STT	61,05	0,004
230 °C	65,56	0,007
280 °C	65,44	0,007
Tração (MPa)	–	–
STT	235,053	1,957
230 °C	201,407	2,208
280 °C	197,375	16,0025

Fonte: Autora (2022).

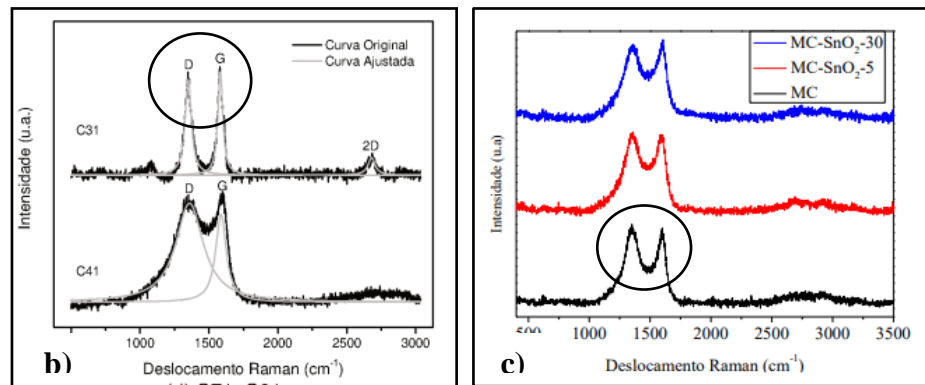
4.1 Espectroscopia Raman

O espectro da Figura 20 trata-se do Espectro do Nanotubo de Carbono para observação dos picos característicos do material e identificação de defeitos na estrutura cristalina do reforço.

Figura 20 - Espectro Raman do Nanotubo de Carbono (NTC) (a); Espectro Raman de grafite (b); Espectro de material carbonoso (c).



Fonte: Autora (2022).



Fonte: Wesling (2020).

Fonte: Fonseca et al. (2020).

No espectro Raman, da Figura 20 foi identificada a banda D em $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ referente à densidade de defeitos e estruturas desordenadas da amostra, e banda G em $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$, a qual representa a ordem estrutural das paredes dos nanotubos de carbono.

Os NTCs apresentaram a razão de $ID/IG = 0,9$ que mostrou um grau de desordem menor comparado ao trabalho de Fonseca et al. (2020), onde possui valor de ID/IG de 1,13 para o Material carbonoso; já em relação aos resultados de Wesling (2020) com razão de $ID/IG = 0,92$ a partir materiais grafíticos foi semelhante aos do presente trabalho.

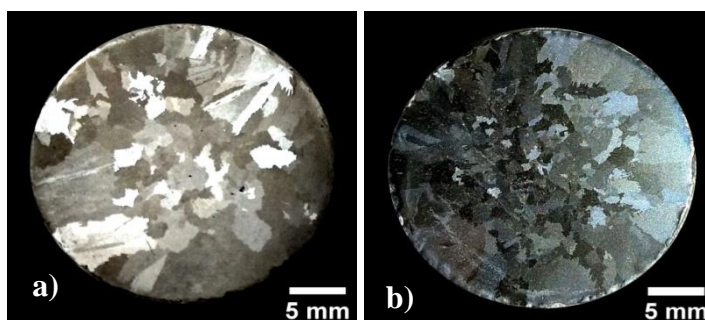
A largura a meia altura (FWHM) para as bandas D e G foram $70,122 \text{ cm}^{-1}$ e $66,757 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente, o que confirma uma presença de carbonos amorfos na rede cristalina, atribuindo à liga possivelmente aumento na resistência mecânica e de dureza e diminuição da

ductilidade. Maurício Filho et al. (2018), explicam que uma possível justificativa para a banda D ter se mostrado bem expressiva pode ser justificado pelo fato do espectrômetro ter realizado a varredura na maior região onde se encontram os NTC defeituosos ou estruturas de carbono amorfo ou mesmo de outras estruturas como carbono amorfo e estruturas grafíticas.

4.2 Metalografia

As macroestruturas da Figura 21 foram obtidas para o estudo dos grãos e seu comportamento nas ligas Al-2% Si / Al-2% Si + NTC e correlaciona-las, com base em suas propriedades.

Figura 21 - Macroestruturas das ligas não deformadas: Al – 2% Si (a); Al – 2% Si+NTC (b).



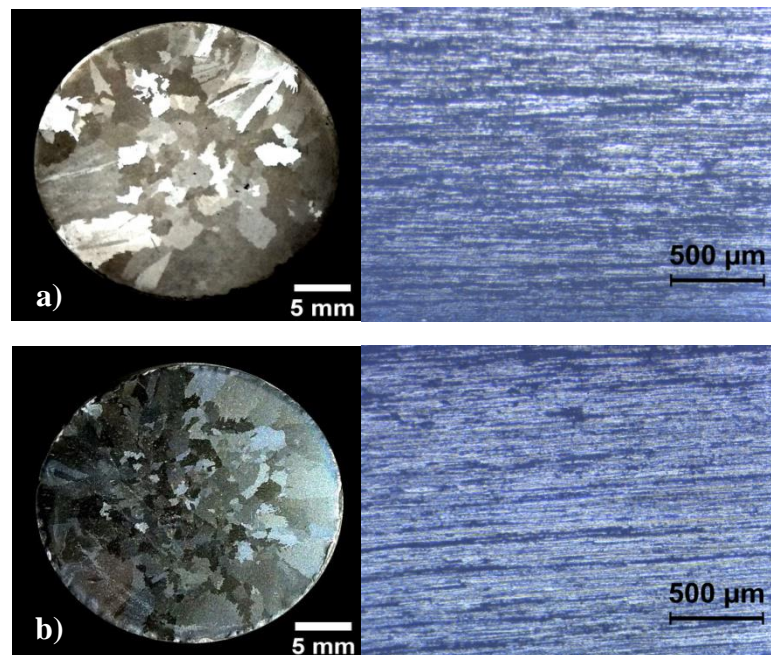
Fonte: Autora (2022).

Após a solidificação e o ataque químico foi revelada nas peças, uma macroestrutura com grãos predominantemente equiaxiais, visto na Figura 21; Fonseca et al. (2020) afirma que com isso pode haver melhora nas propriedades mecânicas da liga com relação a uniformidade, usinabilidade e a superfície do material, vale lembrar que a diminuição dos grãos (Figura 21b) se originou através da adição do NTC. Askeland, (2019) explica também que um material que possui pequenos grãos é mais duro e resistente do que um material que possui grãos maiores, já que tem uma área total maior de contornos de grão para dificultar o movimento das discordâncias, além de este ser o único processo de endurecimento que também aumenta a tenacidade do material.

4.3 Laminação

Após a o processo de usinagem as ligas foram laminadas até o diâmetro final de 3 mm, onde comparou-se a macroestrutura das ligas antes e após a deformação dos laminadores, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Comparação da macroestrutura das ligas Al-2% Si (a) e Al-2% Si-NTC (b) sem Tratamento Térmico antes e após o processo de deformação.



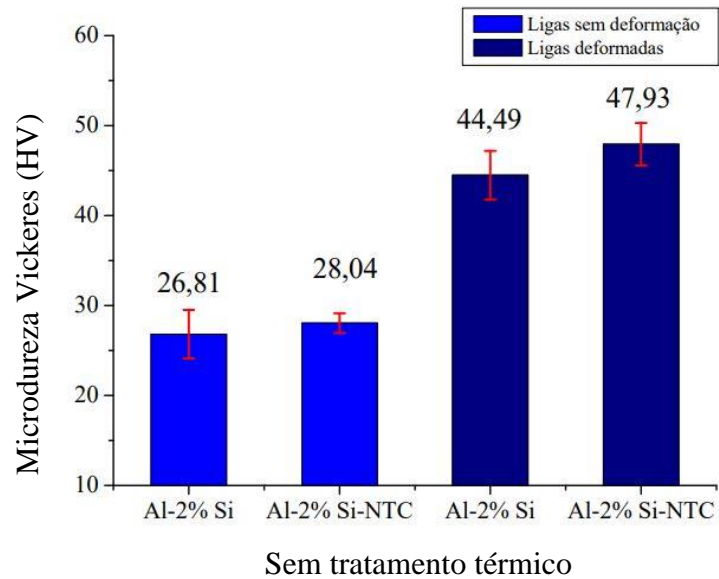
Fonte: Autora (2022).

Na Figura 22 observa-se o alongamento desses grãos em sentido horizontal (sentido da laminação), acompanhado de uma diminuição de grãos na Figura 22b em relação à Figura 22a. Isso é devido à presença de NTCs na estrutura que atribui melhor homogeneização ao fio e mantém a liga com o NTC com melhor resistência mecânica mesmo após a deformação.

4.4 Microdureza (HV)

Os valores de Microdureza das ligas antes da deformação, sem Tratamento Térmico estão contidos, graficamente, na Figura 23.

Figura 23 - valores de Microdureza (HV) antes e após o processo de laminação, sem tratamento térmico.

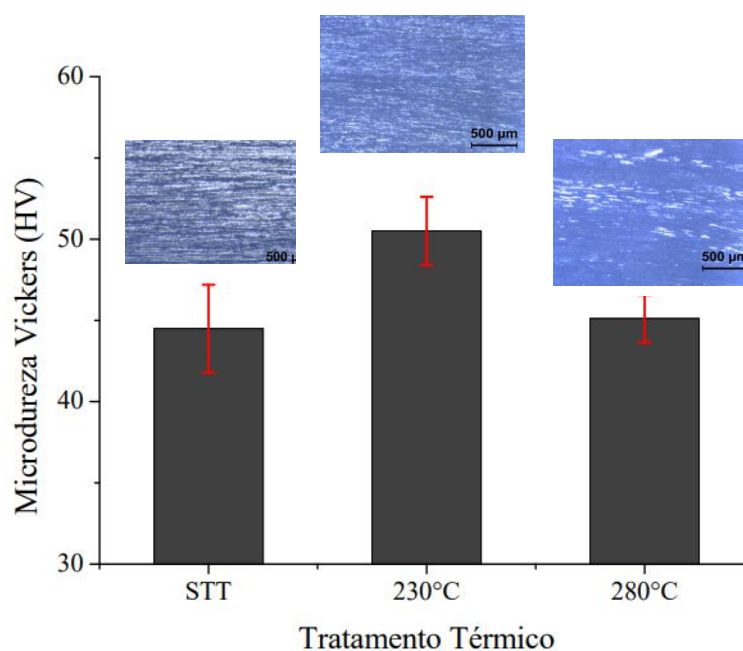


Fonte: Autora (2022).

O Alumínio e suas ligas apresentam facilidade em aumentar sua dureza e resistência mecânica quando laminadas (trabalho a frio), de acordo com ABAL (2021), o que pode ser visto facilmente na Figura 23. Segundo Jesus (2019), esse endurecimento elevado depois de deformadas é devido ao encruamento, causado por uma maior resistência à movimentação de discordâncias. Pode-se extrair também, que os NTCs influenciaram nesse aumento, justificado pelo refino de grãos que esse promove nas ligas, conferindo maior resistência mecânica nas peças.

A liga Al-Si é considerada ‘tratável’, sendo recorrente o uso de tratamentos térmicos após a Laminação, como o Envelhecimento Artificial, utilizado para teste de termorresistividade do fio, neste trabalho, mostrado na Figura 24.

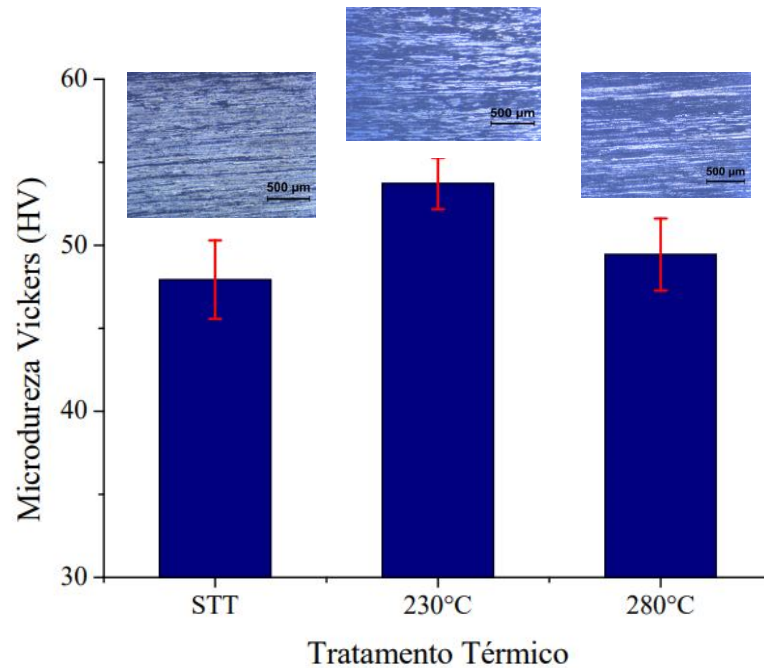
Figura 24 - Gráfico de Microdureza da liga Al-2% Si, após o processo de Laminação submetido aos Tratamentos Térmicos.



Fonte: Autora (2022).

No gráfico da Figura 24 é identificável um valor de Microdureza superior no Tratamento Térmico de 230 °C na liga Al-2% Si, com 50,51 HV, e desvio padrão de 2,1 Vickers. Como já dito, os Tratamentos Térmicos podem ser responsáveis pelo aumento das propriedades mecânicas dos materiais, isso porque confere ao material melhor homogeneização e direcionamento dos grãos. Entre as micrografias acima de cada tratamento a correspondente ao TT de 230 °C foi a que apresentou melhor refino de grãos, os quais atuam dificultando a movimentação das discordâncias na estrutura do material, aumentando a microdureza, e assim a resistência mecânica da liga, segundo CALLISTER (2020). Além do tratamento térmico é possível elevar ainda mais esses valores de Microdureza com a inserção dos NTCs, como o gráfico exibe, na Figura 25.

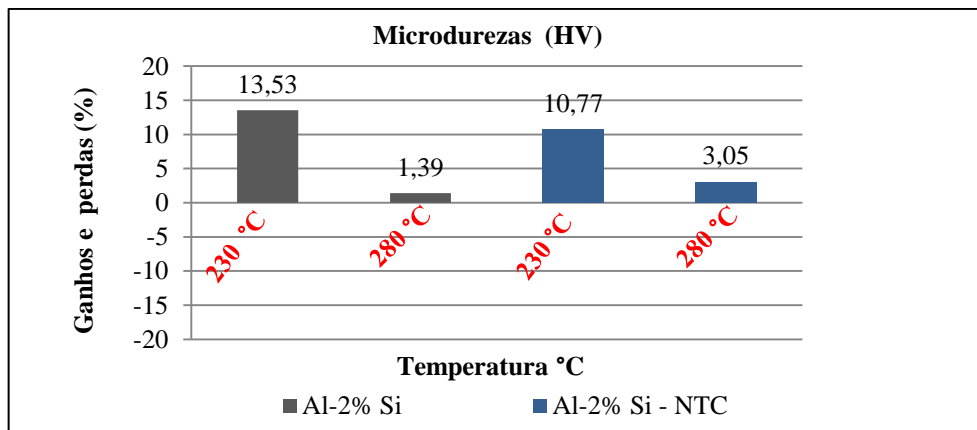
Figura 25 - Microdureza da liga Al-2% Si-NTC, após o processo de laminação e submetidas a Tratamentos Térmicos.



Fonte: Autora (2022).

Na Figura 25, o gráfico continua mostrando resultados maiores na microdureza para o tratamento de 230 °C, com 53,72 HV com desvio padrão de 1,55 Vickers. Observa-se, neste gráfico, que além do efeito dos TT, a adição dos NTCs foi relevante no aumento da propriedade, já que este reforçou a liga e dificultou a movimentação das discordâncias, como pode ser confirmado novamente pelas micrografias acima de suas respectivas temperaturas contornos de grãos mais visíveis; o aumento da microdureza com o reforço pode está associado ao comportamento amorfo dos NTC presente em sua estrutura.

Para um melhor entendimento dos ganhos e perdas da microdureza após os tratamentos térmicos com o ensaio de Termorresistividade do fio, elaborou-se o gráfico da Figura 26.

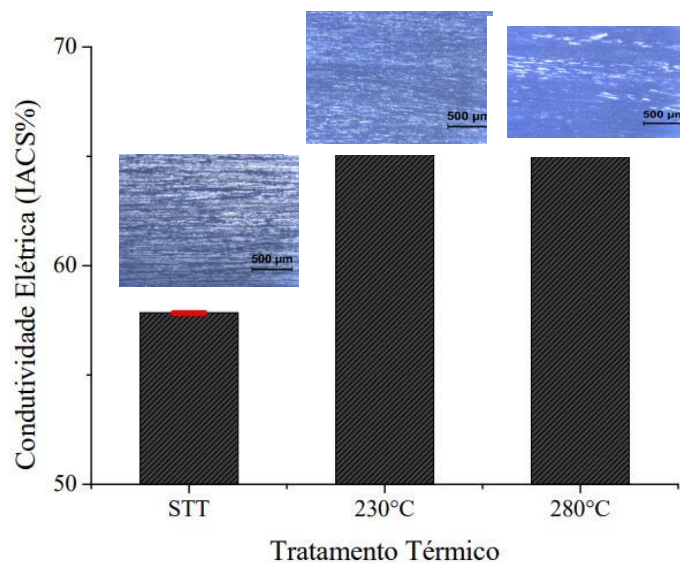
Figura 26 - Gráfico de ganhos e perdas das microdurezas.

Fonte Autora (2022).

No gráfico da Figura 26 é possível observar que ambas as ligas, submetidas pelo teste de Termorresistividade do fio, conseguiram apenas ganhos, em relação às suas ligas que não foram tratadas termicamente, o que é de grande contribuição às propriedades mecânicas das ligas, sendo a liga Al-2% Si a 230 °C a que teve maiores efeitos dos tratamentos térmicos, isso pode ser devido a possíveis alterações no ciclo do tratamento térmico recomendado para a liga em relação.

4.5 Condutividade Elétrica do fio

A Figura 27 mostra, graficamente, os resultados obtidos para os valores da condutividade elétrica das ligas Al-2% Si / Al-2% Si+NTC, para os diâmetros de 3 mm.

Figura 27 - Condutividade Elétrica da liga Al-2% Si submetidas ao ensaio de Termorresistividade.

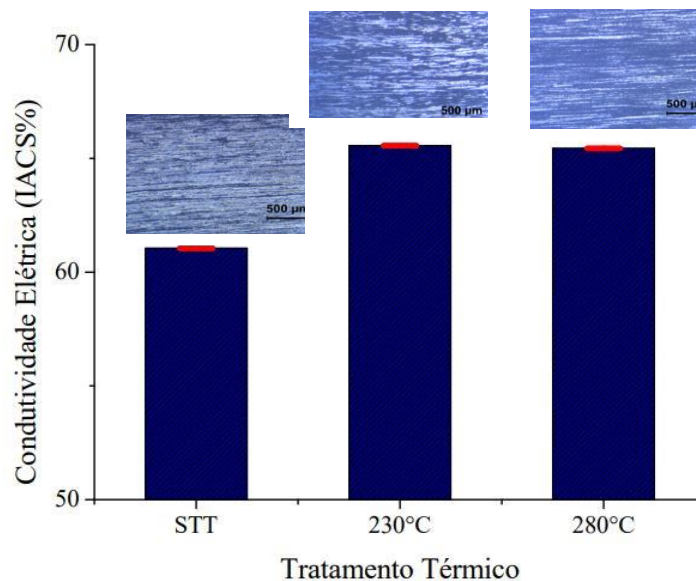
Fonte: Autora (2022).

Na Figura 27, pode-se inferir que a Condutividade Elétrica está dentro dos exigidos pela IACS para ligas com fins elétricos (54,71 % para 3 mm de diâmetro). Já a liga STT, apresentou um valor inferior ao do alumínio comercialmente puro (~62 % IACS) o que mostra que apenas com o Si não foi possível aumentar a condutividade elétrica da liga, isso porque, segundo Filho (2021) alguns semicondutores atuam como obstáculos para a movimentação dos elétrons, o que pode ter dificultado a transferência de energia.

Já nos CPs tratados termicamente, verifica-se um aumento da propriedade elétrica com o avanço da T °C, pois com o aumento da temperatura os grãos tendem a aumentarem, facilitando a movimentação dos elétrons, como identificado na micrografia do TT a 280 °C, com grãos um pouco mais expressivos, com 67,38 %, e desvio padrão praticamente nulos em todos os CPs.

Posteriormente, na Figura 28 é analisado um aumento na propriedade elétrica novamente com a introdução do NTC.

Figura 28 - Condutividade Elétrica da liga Al-2% Si-NTC, submetidas ao ensaio de Termorresistividade.



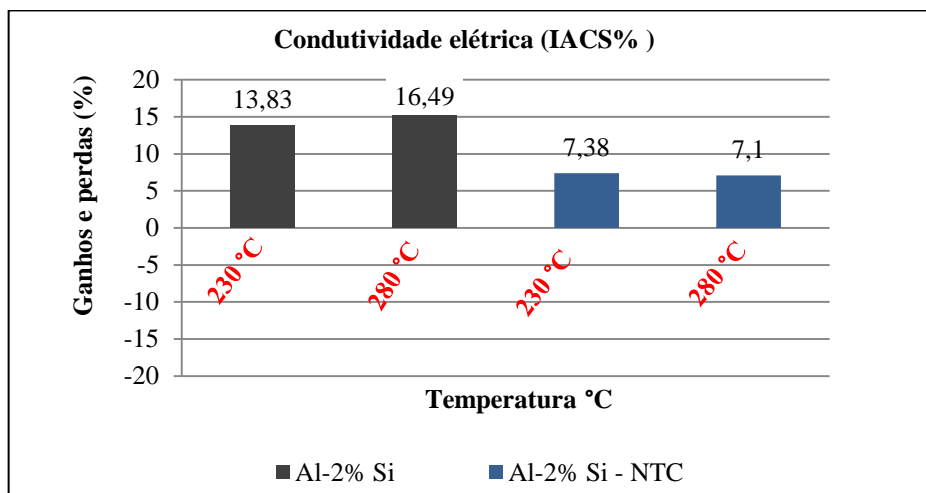
Fonte: Autora (2022).

Já na Figura 28 o maior valor de condutividade elétrica se encontra na temperatura a 230 °C com 65,56 %. Esse comportamento pode estar associado, entre outros fatores que podem ter ocorrido durante o TT, ao refino de grãos atribuídos pelos NTCs à liga, o que foi potencializado com o aumento da temperatura, visto na micrografia do TT de 280 °C, onde mostra grãos mais homogêneos e refinados. Devido esse refino dos grãos pode haver perda de

parte da condutividade elétrica, já que os contornos de grãos estão mais delimitados, diminuindo a movimentação dos elétrons.

Além disso, o NTC foi capaz de conferir um ganho na condutividade elétrica sem a influência do TT devido a características que Stefano (2020) mostra em seu trabalho, como as paredes múltiplas (MWNT), seu tipo de hibridização, formato da cadeia e força de ligação, fornecendo boa estabilidade na condutividade elétrica. O gráfico da Figura 29 confirma que os resultados do ensaio de Termorresistividade obtiveram valores dentro do esperado.

Figura 29 - Gráficos de perdas e ganhos da Condutividade elétrica.



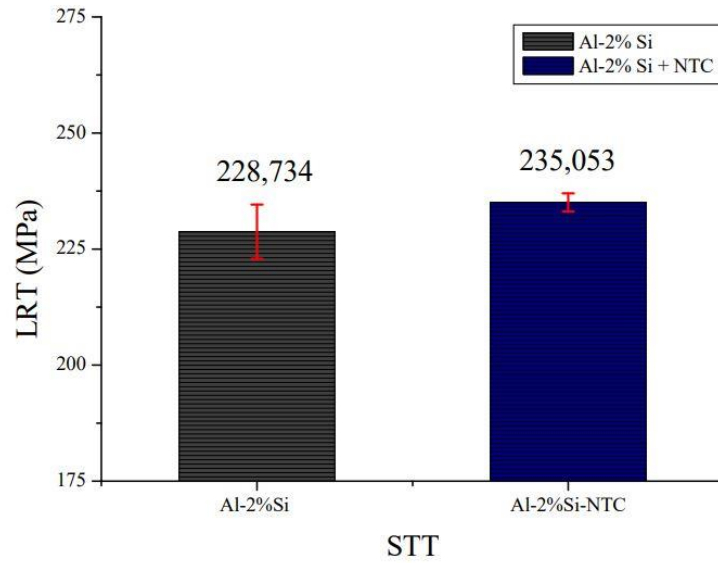
Fonte: Autora (2022).

Na condutividade elétrica a Termorresistividade do fio também foi positiva, de acordo com as normas, como visto no gráfico da Figura 29, obtendo apenas ganhos em relação à liga sem o tratamento térmico. Tanto o TT como o NTC atribuiu à liga características favorecendo esse ganho, destacando-se novamente as ligas sem o NTC para os efeitos dos TT, já que estas apresentaram mais facilidade na transferência dos elétrons com grãos maiores na sua microestrutura.

4.6 Ensaio de Tração

A Figura 30 mostra o gráfico de resistência à Tração (LTR MPa), onde se compara as duas ligas de estudo sem Tratamento Térmico Al-2 % Si / Al2% Si-NTC.

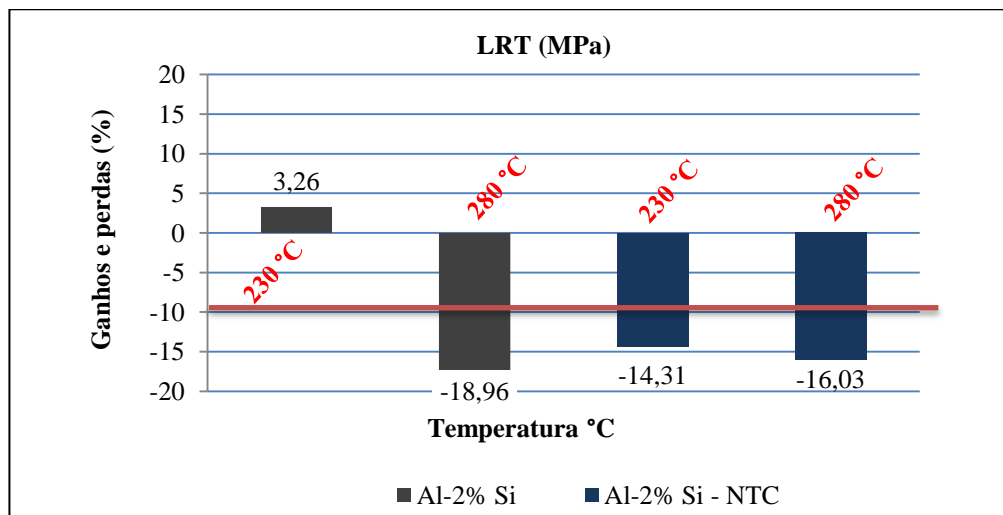
Figura 30 - Gráfico de Tração comparando as duas ligas sem o Tratamento Térmico.



Fonte: Autora (2022).

O Limite de Resistência a Tração (LRT) é medido na unidade de Mpa, que se trata da verificação da tensão no maior ponto de uma curva Tensão x Deformação, ou seja, é a maior tensão que um corpo pode sustentar como visto na Figura 30. No gráfico LRT é visto um valor superior para a liga Al-2% Si-NTC com 235,053 MPa, concedendo a liga uma maior resistência à tração, atribuído às características próprias dos Nanotubos de Carbono, como sua força de ligação entre carbonos. Entretanto, quando submetidas ao ensaio de Termorresistividade apenas a liga sem o NTC a 230 °C obedece aos critérios do protocolo COPEL, exibido na Figura 31.

Figura 31 - Gráfico de perdas e ganhos de LRT.

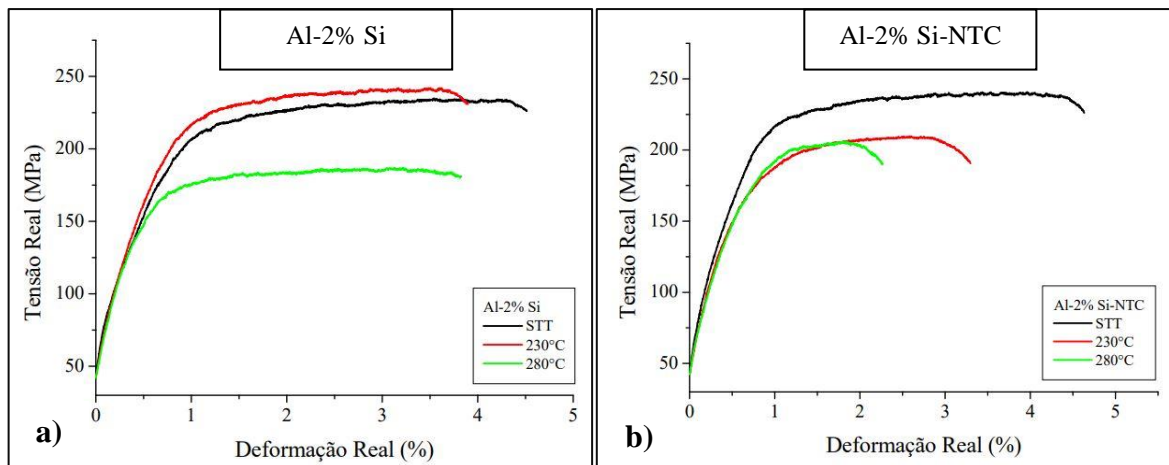


Fonte: Autora (2022).

Os resultados da Figura 31 exibem uma média dos CPs com ultrapassagem superior a 10 % da perda do limite de resistência à tração em relação as suas respectivas ligas sem o efeito do tratamento térmico, e tal fato pode ser justificado ao alívio de tensões causado pelo tratamento térmico nas ligas. A liga Al-2% Si a 230 °C foi exceção, e apesar de se enquadrar dentro das normas do protocolo COPEL, este resultado não foi esperado, evidenciando algo incompatível durante as etapas de fabricação ou testes dessa liga, sendo assim importante uma investigação maior ou refaze-la para que se justifique o porquê do LRT desta liga ter sofrido o efeito contrario pelo tratamento térmico.

Posteriormente, a Figura 32 exhibe os valores de Tensão Real *versus* Deformação Real dessas ligas sob a influência dos Tratamentos Térmicos.

Figura 32 - Gráfico de Tensão Real x Deformação Real para as ligas Al-2% Si (a) e Al-2% Si-NTC (b).



Fonte: Autora (2022).

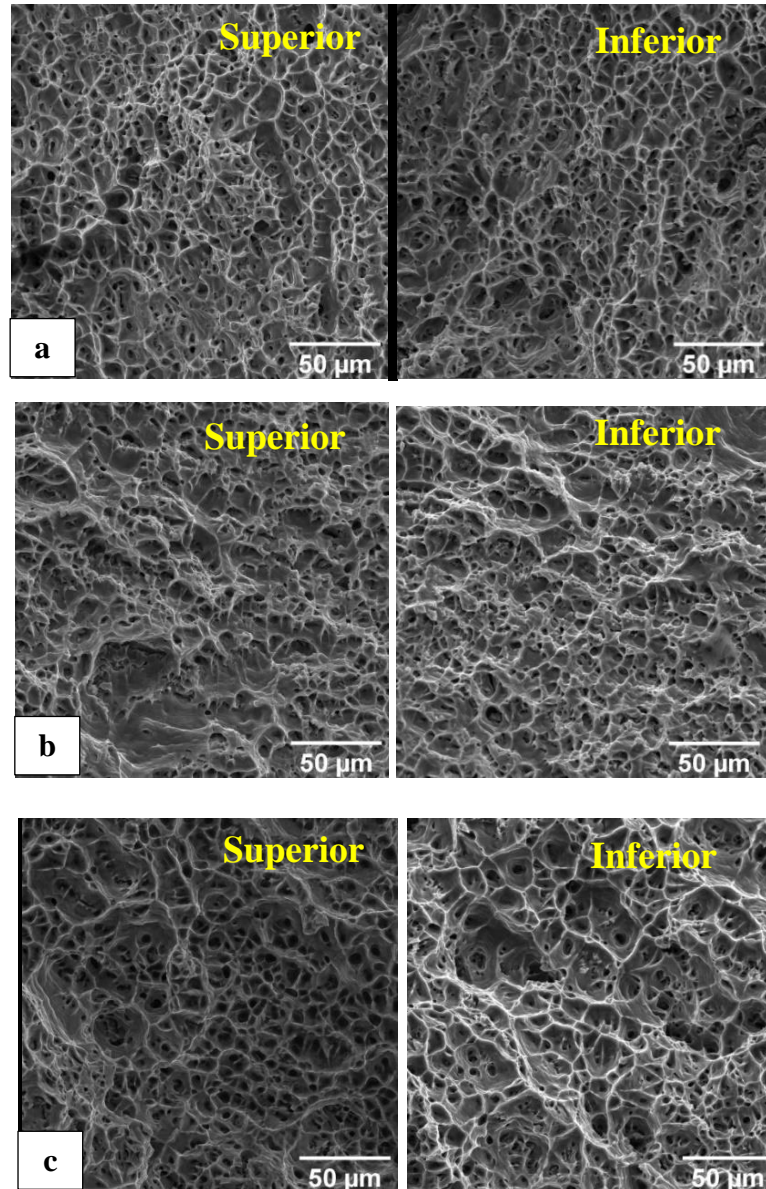
No gráfico da Figura 32a observou-se o maior valor de Tensão Real para o tratamento a 230 °C, próximo aos 225 MPa e com relação à Deformação Real as duas ligas submetidas ao tratamento térmico obtiveram uma deformação aproximada de 4%. A liga a 280 °C teve maior perda da tensão real, possivelmente devido ao alívio de tensões no encruamento causado com o tratamento térmico, aumentando sua ductilidade e capacidade de se deformar próximo à liga sem o tratamento térmico, a qual apresentou 5% de Deformação Real.

No gráfico da Figura 32b mostra a liga sem o efeito do tratamento térmico, com NTC tendo o maior valor de tensão real, próximo aos 250 MPa, e deformação real de 5 %. As ligas tratadas termicamente mostraram queda na tensão e deformação real, que pode ter sido causada por uma degradação dos NTCs durante os tratamentos térmicos, o que pode ter provocado perda de algumas propriedades, como ductilidade, que fez com que as ligas se rompessem antes do esperado.

4.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fratura

As imagens de MEV, da Figura 33, foram retiradas da região fraturadas após o ensaio de tração apenas da liga contendo NTC para o entendimento de forma microestrutural do efeito desse composto na formação e formato dos dimples, quando estas foram submetidas ao tratamento de termorresistividade do fio.

Figura 33 - Imagens da fratura da liga Al-2% Si-NTC, obtidas através de MEV: STT (a), 230 °C (a), 280 °C (c).

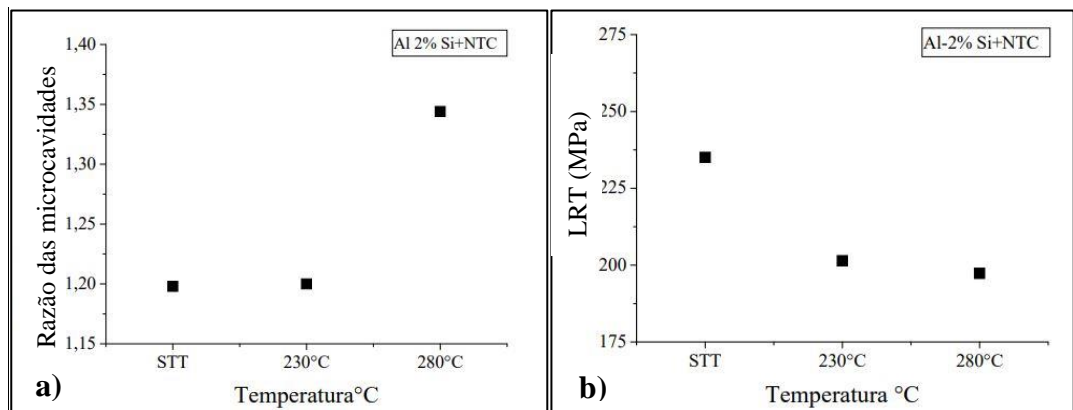


Fonte: Autora (2022).

A Figura 33a, mostrou uma maior homogeneidade com maior número de microcavidades do tipo cônicas e profundas, que segundo a literatura esse formato de estrutura se traduz em maior ductilidade no material se comparado com as ligas tratadas

termicamente, nas quais é possível visualizar uma tendência à formação de coalescências em determinadas partes (Figuras 33b e 33c) do tipo mais rasas e com maior fração volumétrica, com dimples semelhantes a uma clivagem em alguns pontos que, provavelmente, se originou por acúmulo de tensão nesses locais, conferindo as ligas tratadas termicamente à diminuição do LRT à medida que se eleva a razão dos dimples, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Razão de microcavidades (a) com gráfico de LRT (b) das ligas com NTC.



Fonte: Autora (2022).

O aumento da razão dos dimples junto com o aumento da temperatura, na Figura 36a, pode esta associada a um desordenamento na microestrutura, ocasionado pelos TT, rompendo os limites dos dimples e facilitando as discordâncias que reflete em uma microestrutura com maior resistência mecânica e menos dúctil, assim como no gráfico 34b, há a diminuição do limite de resistência à tração à medida que se eleva a temperatura, devido, provavelmente, a desordem na estrutura do material durante o tratamento que não é possível saber ao certo sua origem, caracterizando uma estrutura mais frágil.

5 CONCLUSÃO

Ao analisar o efeito do NTC na liga, notou-se que este proporcionou melhor homogeneização e conseqüentemente aumento da microdureza (HV), condutividade elétrica e resistência mecânica, assim como na diminuição do desvio padrão das amostras. No espectro Raman dos NTCs a presença de carbonos amorfos, provocando aumento da dureza e possível diminuição da ductilidade, além disso, foi observado um grau de desordem aceitável em comparação com a literatura;

O tratamento térmico nas ligas, em geral, proporcionou melhor direcionamento dos grãos. Nas ligas sem o NTC, influenciou no alívio das tensões diminuindo a microdureza e nas com o NTC uma possível desordem no reforço, que ocasionou perda superior a 10 % do LRT das ligas depois do serem tratadas termicamente;

A análise dos dimples foi essencial para complementar o entendimento sobre as características do material, onde se identificou microcavidades mais rasas com coalescimentos maiores nas amostras que passaram pelo tratamento térmico do que a amostra sem efeito do mesmo, mostrando estas microcavidades mais profundas e cônicas;

O presente trabalho mostrou que são possíveis, ligas de Al-2 % Si reforçadas com NTCs, após o tratamento térmico serem inseridas na indústria de cabos elétricos, segundo a IACS, já que essas apresentaram resultado igual ou acima de 54,71 % nos ensaios de condutividade elétrica.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir deste trabalho foram pontuadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar o DRx nas amostras a fim de complementar a técnica de Espectroscopia Raman e com isso extrair mais informações sobre as fases cristalinas presentes nas ligas;
- Realizar a investigação dos dimples das amostras de ligas sem os NTCs com base na norma da ASTM E 112-96;
- E por fim, realizar um estudo prévio de quais elementos de liga podem ser e inseridos que reforcem a liga com NTC para ganho de ductilidade ou/e inserir NTC na série 6xxx.

REFERÊNCIAS

ALUMÍNIO. Inovação e sustentabilidade. **Como diferentes elos da indústria enfrentam os desafios do momento**, São Paulo, SP, 55, p. 1, abril/maio. 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14155**. Alumínio e suas ligas – Tratamento de superfície – camada de anodização dura – determinação da microdureza. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6815**. Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6814**. Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 5118**. Fios de alumínio 1350 nus, seção circular, para fins elétrico. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6810**. Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro, 2010.

ASTM. American Society For Testing And Materials. **E112-96**: Standard Test Methods For Determining Average Grain Size. USA, 2004.

Associação Brasileira de Alumínio–ABAL. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/temperas.asp>>. Acesso em: 05 abr. 2021.

ASSADIKI. A. et al. **Stabilizing effect of alloying elements on metastable phases in cast aluminum alloys by CALPHAD calculations**. Rue De Nogent, Laigneville, França, 2018. 1-7 p.

Askeland, D.R.; Phulé, P.P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 4. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019. Cap. 8; Cap. 10, Seções 10-4; Cap. 11, Seção 11-1.

AZEVEDO, T.F. **Estudo de comportamento mecânico de ligas tinbsn em função do teor de liga, laminação a frio e envelhecimento**. Tese (doutorado em ciência e engenharia dos materiais) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, Sergipe, 2017.

BARBOSA C. **Metais não-ferrosos e suas ligas – microestrutura, propriedades e aplicações**. Rio de Janeiro: E-papers; 2014.

BIROL, Y. **Grain refinement and modification of Al-Si foundry alloys with B and Sr additions, Materials Science and Technology**. v. 30, p. 1154-1161, 2013.

BRITO, P.R.O. **Reforço superficial em alumínio fundido por nanotubos de carbono via tratamento de solubilização**. Tese (doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará, Pará 2021.

BROUGH, D. JOUHARA, H. **The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery**. Faculdade de Engenharia, Design e Ciências Físicas, Universidade de Brunel, London, 2020.

CALLISTER Jr, D. Willian. **Aplicações e processamento de ligas metálicas. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.** 9°. ed. atual. São Paulo: Gen – LTC, 2020. Cap. 11, p. 374.

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.

CHEN, Z. et al. **Grain refinement and tensile properties improvements of aluminum foundry alloys by inoculation with Al-B master alloys.** v. 553, p. 32-36, 2012.

CHIAVERINI. V. **Metalurgia do pó: técnicas e produtos.** São Paulo, 1992. cap. 8, p. 178

DRESSELHAUS, M. et al. **Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications;** Springer; Heidelberg, 2001.

DIAS, J. M. S. **Solidificação Transitória e Permanente de Ligas Monofásicas e Peritética Sn-Sb e Sn-Sb(Ag; Cu): Evolução Microestrutural, Molhabilidade e Propriedades Mecânicas.** Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2016.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em:< <https://www.epe.gov.br> >. Acesso em: 20 de Setembro de 2021.

FERREIRA, R.S. **Estudo computacional do cross-linking entre cadeias lineares de carbono e nanotubos quando submetidos a altas pressões.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Piauí, 2018.

FERREIRA. V.O. **Caracterização de nanocompósitos mwnts/aisi 304l tratados quimicamente com peróxido de hidrogênio por espectroscopia raman.** Universidade Federal do Pará, Pará, 2018.

MAURÍCIO FILH. et al. **Análise microestrutural e microdureza de um nanocompósito de matriz de alumínio reforçada por ntc via metalurgia do pó.** São Paulo, 2018.

FILHO. L.H.C. **Estudo e fabricação de termistores de zno dopados com cu por reação de combustão com otimização de eletrodos.** Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

FONSECA. A.D. S. et al. **Avaliação da resistência elétrica, mecânica e termoresistividade da liga Al-0,05%Cu-[0,25-0,35]%Fe-0,5%Si-0,6%mg com adição de teor de (0,13)% de nióbio, para transporte e distribuição de energia elétrica.** Universidade Federal do Pará, Pará, 2020.

FONSECA. J; TRINDADE. **Nanotubos de carbono: propriedades e funcionalização,** 2011.

GARCIA, A. **Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura correlação com propriedades decorrentes.** v. 23, p. 13-32, São Paulo, SP. 2005.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações.** 2ª. Edição. São Paulo: Editora da Unicamp, São Paulo, 2007.

HAACK, M.S. **Identificação e caracterização de materiais por espectroscopia Raman**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HAJ, B.A; BOUAYAD, A. B. ; ALAMI, M. **Effect of titanium addition on the proeutectic and eutectic phases of als19 cast alloy**. *Arch. Metall. Mater.* Marocco, 2020. n. 1, 385-391.

HARRIS, P.J.F. **Carbon Nanotube Science: Synthesis, Properties and Applications**. Cambridge University, Press. EUA, Nova York, 2009.

HENRIQUES, A.B. PORTO, M.F.S. **A insustentável leveza do alumínio: impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário**. Universidade do Estado de Minas Gerais, 2013.

Kaspar. K. et al. **Investigation of different carbon nanotube reinforcements for fabricating bulk AlMg5 matrix nanocomposites**. Suíça, 2015.

JORIO, A. et al. "Characterizing carbon nanotube samples with resonance Raman scattering. *New Journal of Physics* 5", pp.139, 2003.

JESUS, L.V.S. **Avaliação da influência do tratamento térmico t6 na liga al0,8%w após processo de laminação a frio**. Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

KAYA, H.; AKER, AYNUR. Effect of alloying elements and growth rates on microstructure and mechanical properties in the directionally solidified Al-Si-X alloys. **Journal of alloys and compounds**. Elsevier, 2016.

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) – Universidade Federal do Pará, Pará, 2014.

MARTÍN, N. **Sobre fullerenos, nanotubos de carbono y grafenos**. Madri, Espanha. P.1-17, 2011.

MARTINS. P. **Nanotecnologia e meio ambiente para uma sociedade sustentável**. **Estudios Sociales**, Vol. 17, Núm. 34, julio-diciembre, pp. 293-309. Universidad de Sonora. México, 2009.

MIZUTANI. U. **Hume-Rothery Rules for Structurally Complex Alloy Phases**. CRC Press, 2010.

NASCIMENTO, Luíz..G.S. **Influência da adição de nanotubos de carbono nas propriedades mecânicas da liga al-2%ni solidificada direcionalmente**. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2015.

OHNO. A. **Solidificação dos metais**. 185 p. 1988.

PINHO, J.R.S. **Análise de falha de um componente metálico aeronáutico associada a um estudo de melhoria de processo**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, São Paulo, 2021.

QIU, D. et al. **A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al-Si alloys**. *Acta Materialia*, v. 55, p 1447-1456, 2007.

QUADRO. A.L.; RAPOSO. M.T; SABARIZ. A.L.R. **Uso do nióbio como refinador de grão para ligas de alumínio-silício**. Universidade Federal de São João Del Rei, 2016.

RANA, R. S., PUROHIT, R., DAS, S. Reviews on the Influences of Alloying elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Alloy Composites. **International Journal of Scientific and Research Publications**, Vol. 2, Issue 6, 2012, p. 1-7.

RAUS. A.L. et al. **Propriedades elétricas de fibras à base de nanotubos de carbono e seu uso futuro em fiação elétrica**. Universidade de Cambridge, Inglaterra, 2014.

RIBEIRO. M. **Estudo das propriedades estruturais e ópticas em materiais nanoestruturados a base de silício**. Tese de doutorado. Universidade DE São Paulo, 2009.

RODRIGUES. F.A.S. **Incorporação de nanotubos de carbono em superfície de ligas de alumínio a6101 trefilado**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará, 2015.

SANTOS. A.R. et al. **Aplicação da espectroscopia raman na caracterização de minerais pertencentes a uma geocoleção**. Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2019.

SANTOS, E.N. **fabricação e caracterização da liga de alumínio-silício a partir dos pós elementares de alumínio e silício via metalurgia do pó**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SILVA. I.C. **Óxidos semicondutores como superfícies intensificadoras de espalhamento raman e caracterização de vacâncias de oxigênio em trióxido de molibdênio fase alfa por espectroscopia raman**. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2021.

SOARES, G.A. **Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia**. Rio de Janeiro: COPRE / UFRJ, p. 123, 2000.

Valiev, R.Z. et al. **A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity**. Instituto de Física de Materiais Avançados, Ufa, Universidade Técnica Estadual de Aviação, Rússia, 2014.

WESLING. B.N. **Estruturas de carbono como eletrodos para supercapacitores de dupla camada elétrica**. Dissertação de pós-graduação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

ZARBIN.A.J.G.,OLIVEIRA.M.M. **NANOESTRUTURAS DE CARBONO (NANOTUBOS, GRAFENO): QUO VADIS?**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ZHANG, A. et al. **Lubricant-infused coating by double-layer ZnO on aluminium and its anti-corrosion performance**. Universidade de Habin, China, 2018.

ZHOU. M.Y. et al. **Achieving ultra-high strength and good ductility in AZ61 alloy composites containing hybrid micron SiC and carbon nanotubes reinforcements**, China, 2019.

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