



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

JULIANNE SILVA LALÔR

**REVISÃO SISTEMÁTICA DO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE
CARBONO EM MATRIZES DE ALUMÍNIO PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA**

ANANINDEUA – PA
2025

JULIANNE SILVA LALÔR

**REVISÃO SISTEMÁTICA DO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE
CARBONO EM MATRIZES DE ALUMÍNIO PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Bacharelado em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Ribeiro
Guimarães Ribeiro

ANANINDEUA – PA
2025

JULIANNE SILVA LALÔR


REVISÃO SISTEMÁTICA DO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EM MATRIZES DE ALUMÍNIO PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

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


Data de Aprovação: 28 / 03 / 2025

Conceito: EXCELENTE


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 PEDRO PAULO GUIMARAES RIBEIRO
Data: 04/04/2025 10:44:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
(FEMat/CANAN/UFPA – Orientador)

Documento assinado digitalmente
 ALACID DO SOCORRO SIQUEIRA NEVES
Data: 08/04/2025 11:33:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMat/CANAN/UFPA)

Documento assinado digitalmente
 EDNELSON DA SILVA COSTA
Data: 07/04/2025 15:36:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
(FEI/CABAE/UFPA)

Documento assinado digitalmente
 CRISTHIAN RICARDO LOAYZA LOAYZA
Data: 07/04/2025 10:38:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Dr. Cristhian Ricardo Loayza Loayza
– Convidado -

Dedico este trabalho a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha jornada acadêmica. Aos meus familiares, amigos e colegas, que me apoiaram e inspiraram ao longo deste percurso, o meu sincero agradecimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido tantas bênçãos, por me acompanhar nessa longa jornada, me protegendo e fortalecendo.

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Paulo, pela orientação constante, pela paciência e pelos valiosos conselhos que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Cristhian Ricardo Loayza pelo apoio na área de conhecimento de Engenharia de Materiais e Metalurgia da UFPA.

Agradeço aos meus pais, Julio Lalôr e Rosangela Silva, pelo amor, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim. Sem o suporte de vocês, este momento não seria possível.

Aos meus amigos e colegas de curso, agradeço pelo companheirismo, pelas conversas inspiradoras e pelo apoio em cada etapa dessa jornada acadêmica.

O verdadeiro sinal da inteligência não é o conhecimento, mas a imaginação. —
Albert Einstein

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

B₄C – Carboneto de Boro

CE – Condutividade Elétrica

CBA – Companhia Brasileira de Alumínio

CMM – Compósitos de Matriz Metálica

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva

IACS – International Annealed Copper Standard

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

Mg – Magnésio

NTC ou CNT – Nanotubos de Carbono

NTCPM ou MWCNTS – Nanotubos de Carbono de Parede Múltipla

NTCPS – Nanotubos de Carbono de Parede Simples

PM – Personalidade de Metalúrgico

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

Se – Selênio

Si – Silício

SCOPUS – Science Direct

SPS – Sinterização por Plasma de Faísca

UTS – Alta resistência à tração

VOS – Visualization of Similarities

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Quadro 1 – Propriedades do alumínio puro.....	13
Figura 1 – Diagrama esquemático representativo de nanotubos de carbono (a) de parede simples (NTCPS), (b) de paredes múltiplas (NTCPM).....	16
Figura 2 – Representação dos Nanotubos de carbono e suas extremidades fechadas.....	16
Figura 3 – Geometrias de Nanotubos de carbono: armchair, zig-zag e quiral.....	17
Figura 4 – A folha de grafeno e as formas com que a folha pode ser enrolada através dos diferentes pontos no retículo, resultando em NTC com diferentes quiralidades....	18
Figura 5 - Variação da Condutividade (%IACS) com tratamento térmico de diferentes ligas.....	24
Figura 6 – Efeito da concentração de CNTs nas propriedades em tração de um compósito CNT/Al.....	25
Figura 7 – Partículas do compósito 1% CNT/Al com (a) região com CNTs dispersos e (b) região com CNTs aglomerados	26
Quadro 2 – Síntese dos produtos dos artigos selecionados.....	31
Quadro 3 – Referências completas documento selecionados.....	33
Figura 8 – Rede de Palavras	35
Figura 9 – As micrografias MEV (a-c) e (d-f) mostram nanocompósitos S1, S2 e S3 com clusters de NTCPS. Esses clusters são resultado da forte interação de Van der Waals entre os NTCPS.....	38
Figura 10 – As micrografias MEV de nanocompósitos sinterizados M1, M2 e M3, reforçados com nanotubos de carbono de múltiplas paredes (MWCNTs) em concentrações de 0,5%, 1% e 2%, revelam aglomerados de MWCNTs localizados nas fronteiras de grão da matriz de Al. Isso indica a influência das interações entre nanotubos na formação de estruturas durante a sinterização	38
Figura 11 – As micrografias MEV (a) e (d) e o mapeamento espectroscópico EDS correspondente para Al (b, e) e C (c, f) nas amostras M1 e M3 mostram que a área de aglomerados de MWCNTs aumenta significativamente com concentrações maiores, como observado na amostra M3.....	39
Figura 12 – Os valores de resistividade elétrica dos nanocompósitos de Al reforçados com NTCPS e NTCPM foram comparados com o valor padrão do alumínio puro, indicado pela linha azul tracejada.....	40

Figura 13 – Número da amostra versus condutividade elétrica.....	43
Figura 14 - As micrografias e o mapeamento do elemento ferro (Fe) são apresentadas da seguinte forma.....	44
Figura 15 – Microdureza, condutividade elétrica, UTS e macrografias.....	45
Figura 16 – Condutividade elétrica de Al2024-NTCPMs.....	46
Figura 17 - As imagens MEV (a) e TEM (b) mostram o Al2024 com pó de MWCNT, evidenciando o estado disperso dos nanotubos (c) e sua configuração dobrada e interfacial após moagem de bolas e sinterização (d)	47
Figura 18 - Perfil MEV do pó Al2024 + MWCNT em porcentagem de peso de 1%, 2% e 3%.....	48
Figura 19 - Imagem MEV de (a) fratura por tração do Al2024 com falha do cone-copo, (b) superfície sinterizada tratada termicamente com fratura de 1% de MWCNT.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades elétricas e térmicas dos nanotubos de carbono: uma visão geral.....	20
Tabela 2 – As principais ligas de alumínio eletrocondutoras e suas características em relação à condutividade elétrica.....	21
Tabela 3 – Condutividade comercial de Al puro.....	23
Tabela 4 – Comparativo de técnicas de mistura / incorporação de nanotubos de carbono em matrizes metálicas.....	26
Tabela 5 – Avaliação dos documentos selecionados.....	34
Tabela 6 – Descrição dos pós nanocompósitos de nanotubos de carbono à base de Al (NTC) moídos em bolas de alta energia	39
Tabela 7 – Resultados da resistividade e condutividade elétrica das amostras.....	40
Tabela 8 – Os valores de condutividade elétrica dos nanocompósitos NTC à base de Al, sinterizados por plasma de faísca, foram calculados a partir da resistividade e convertidos para o padrão internacional de cobre recozido (IACS%).....	41

RESUMO

A nanotecnologia tem desempenhado um papel essencial na Engenharia de Materiais, impulsionando avanços significativos no desenvolvimento de novos compósitos. Dentre os nanomateriais mais promissores, os nanotubos de carbono (NTCs) destacam-se por suas propriedades excepcionais, especialmente no que se refere à condutividade elétrica. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da adição de NTCs na matriz de alumínio, visando a melhoria das propriedades elétricas condutoras desses compósitos. Para a condução deste estudo, foi adotada a abordagem de Revisão Bibliográfica Sistemática, uma metodologia que permite identificar, analisar e sintetizar criticamente as evidências disponíveis sobre o tema. A pesquisa foi realizada na base de dados Science Direct (Scopus), utilizando termos em língua inglesa combinados com os conectores booleanos AND e OR. Após a triagem e filtragem realizada no software RStudio®, foram selecionados 24 artigos, dos quais 4 foram considerados altamente relevantes para a investigação. Os estudos analisados forneceram uma base sólida para compreender os desafios e oportunidades na aplicação de NTCs em nanocompósitos de alumínio, destacando fatores como a escolha adequada dos nanotubos, métodos eficientes de dispersão e o uso de aditivos complementares para otimizar a condutividade elétrica sem comprometer outras propriedades do material. Os compósitos de matriz metálica de alumínio vêm despertando crescente interesse na indústria e na pesquisa acadêmica devido ao seu potencial para substituir materiais metálicos convencionais, oferecendo melhorias significativas em resistência mecânica, rigidez, resistência à corrosão, além de propriedades térmicas e elétricas superiores. Os resultados desta revisão ressaltam a importância do desenvolvimento contínuo de técnicas inovadoras para a fabricação desses compósitos, consolidando a viabilidade dos NTCs como elementos estratégicos para a engenharia de materiais avançados.

Palavras-chave: nanotubos de carbono; matriz de alumínio; propriedades mecânicas e elétricas.

ABSTRACT

Nanotechnology has played an essential role in Materials Engineering, driving significant advances in the development of new composites. Among the most promising nanomaterials, carbon nanotubes (CNTs) stand out for their exceptional properties, especially with regard to electrical conductivity. In this context, this work aims to analyze the impact of the addition of CNTs to the aluminum matrix, aiming at improving the electrical conductive properties of these composites. To conduct this study, the Systematic Literature Review approach was adopted, a methodology that allows identifying, analyzing and critically synthesizing the available evidence on the subject. The search was carried out in the Science Direct (Scopus) database, using English terms combined with the Boolean connectors AND and OR. After screening and filtering performed in the RStudio® software, 24 articles were selected, of which 4 were considered highly relevant to the investigation. The studies reviewed provided a solid basis for understanding the challenges and opportunities in the application of CNTs in aluminum nanocomposites, highlighting factors such as the appropriate choice of nanotubes, efficient dispersion methods, and the use of complementary additives to optimize electrical conductivity without compromising other material properties. Aluminum metal matrix composites have been attracting increasing interest in industry and academic research due to their potential to replace conventional metallic materials, offering significant improvements in mechanical strength, stiffness, corrosion resistance, and superior thermal and electrical properties. The results of this review highlight the importance of the continuous development of innovative techniques for the fabrication of these composites, consolidating the viability of CNTs as strategic elements for advanced materials engineering.

Keywords: carbon nanotubes; aluminum matrix; mechanical and electrical properties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo geral	12
1.1.1 Objetivos específicos	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 O Alumínio e suas propriedades	13
2.2 Nanotubos de carbono	15
2.3 Ligas de alumínio eletrocondutores	22
2.4 Adição de nanotubos de carbono em matriz metálica de alumínio	24
3 MÉTODO	29
3.1 Desenho do estudo	29
3.2 Coleta de dados	29
3.3 Análise de dados	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia tem se destacado como uma área promissora e inovadora na Engenharia de Materiais, oferecendo um vasto leque de possibilidades para o desenvolvimento de materiais com propriedades e aplicações revolucionárias. Um dos principais avanços nesse campo são os nanotubos de carbono, que de acordo com Corazza *et. al.*, (2020) são estruturas cilíndricas compostas por átomos de carbono compatíveis em arranjos hexagonais.

As propriedades dos nanotubos de carbono (NTC) podem ser exploradas para aprimorar as características elétricas na superfície de matrizes de alumínio por meio de tratamentos térmicos. A incorporação de NTC como reforço em matrizes de alumínio apresenta-se como uma alternativa promissora para ampliar as aplicações desse material em indústrias como a automotiva, aeronáutica e elétrica, entre outras (PAIVA, 2008). Estudos recentes têm investigado a dispersão de NTC na superfície do alumínio, evidenciando seu potencial como material reforçado para diversas aplicações tecnológicas (SIMÕES, 2015).

Há uma crescente demanda por materiais com propriedades elétricas avançadas, como baixa resistividade e alta condutividade, especialmente nas indústrias de energia e eletrônica. Compósitos de nanotubos de carbono (CNTs) e cobre (Cu) têm ganhado atenção devido à sua elevada condutividade elétrica. A combinação de CNTs e Cu em substratos de alumínio também desperta interesse, oferecendo potencial para o desenvolvimento de compósitos com condutividade elétrica superior, aplicáveis em dispositivos e sistemas que exigem alta eficiência energética e desempenho elétrico (SILVA, 2024).

A fim de obter materiais com propriedades térmicas e elétricas melhoradas, foram incorporados NTC com sucesso na superfície do fio AA-6101, por tratamento térmico de solubilização. Isto criou cabos nanoestruturados com resistência elétrica 13,7% menor que os cabos convencionais, e a resistência à tração aumentou 34% em relação ao fio padrão AA-6101 sem NTC, para linha de transmissão de energia (RODRIGUES, 2016).

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é identificar e analisar artigos científicos que abordem a melhoria das propriedades elétricas condutoras de matrizes de alumínio com a adição de nanotubos de carbono. Para alcançar esse propósito, os objetivos específicos incluem: desenvolver uma metodologia sistemática para a busca

de artigos relevantes em bases de dados como Science Direct (Scopus), Google Acadêmico, entre outras; organizar e sistematizar os dados coletados; e apresentar os resultados mais relevantes da análise realizada.

Além disso, a aplicação dos nanotubos de carbono em áreas como eletrônica, energia e materiais compostos pode trazer benefícios significativos, como o aumento da eficiência, a redução do consumo de recursos e a criação de produtos mais leves e resistentes.

Assim sendo, está dividida em cinco sessões, sendo a primeira composta por esta introdução, a segunda traz o referencial teórico da pesquisa, a terceira sessão descreve o método na pesquisa, a quarta sessão apresenta os resultados e discussão e, por fim, as considerações finais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão sistemática de artigos científicos que abordem a melhoria das propriedades elétricas condutoras na superfície de matrizes de alumínio por meio da adição de nanotubos de carbono (NTC).

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar uma metodologia de pesquisa sistemática de artigos relevantes na área nas bases de Science Direct (Scopus);
- ✓ Identificar e analisar os principais artigos científicos sobre a incorporação de nanotubos de carbono (NTCs) em matrizes de alumínio;
- ✓ Investigar a influência da concentração e sua relação com a eficiência energética do material;
- ✓ Organizar os dados obtidos;
- ✓ Avaliar os resultados mais relevantes da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O alumínio e suas propriedades

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 o 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.

O alumínio é amplamente utilizado na indústria devido à sua combinação única de propriedades, que tornam um material extremamente versátil. A Quadro 1 apresenta as principais propriedades inerentes ao alumínio.

Quadro 1 – Propriedades do alumínio puro.

Propriedades	Características
Ponto de fusão	O alumínio possui ponto de fusão de 660°C, o que é relativamente baixo comparado ao do aço, que é da ordem de 1570°C.
Peso específico	A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é de cerca de 2,70 g/cm ³ , aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.
Resistência à corrosão	O alumínio possui uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essa característica de autoproteção dá ao alumínio uma elevada resistência à corrosão.
Condutibilidade elétrica (S/m)	O alumínio puro possui condutividade elétrica de 62% da IACS (Internacional Annealed Copper Standard).
Condutibilidade térmica (W.m-1·K-1)	O alumínio possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço.
Reciclagem	A característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas, é uma das principais vantagens do alumínio.

Fonte: ABAL, 2015.

Embora o alumínio puro tenha uma alta condutividade elétrica, ele possui uma resistência mecânica à tração relativamente baixa. Tratamentos térmicos destinados a aumentar a resistência mecânica do alumínio, como as da série 6xxx (Al – Mg – Si), são frequentemente utilizadas como condutores em linhas de energia aérea. Essas ligas oferecem uma combinação equilibrada de resistência e condutividade elétrica, tornando-as uma escolha ideal para essa aplicação (VALIEV, 2014).

Diante disto, percebe-se a importância que as atividades de transmissão de energia elétrica detêm junto à sociedade e, além, a necessidade de que este ramo de atividade industrial receba investimentos maciços, sobretudo, porque o consumo de energia tem aumentado de maneira vertiginosa nas últimas décadas e os fatores que contribuíram para este aumento foram, segundo Ambrosi; Gonzatto (2018, p. 41) “o desenvolvimento do parque industrial, a modernização da agricultura, o aumento da capacidade de consumo da população e a elevação dos níveis de conforto individual e familiar”.

Nesse contexto, Kremer *et. al.*, (2020) sinaliza que a aplicação da nanotecnologia no setor elétrico brasileiro tem um potencial significativo para trazer avanços e melhorias em diversas áreas, pois a nanotecnologia pode fornecer soluções inovadoras e eficientes para os desafios enfrentados pelo setor elétrico, como o aumento da eficiência energética, a melhoria da transmissão e distribuição de energia e a criação de dispositivos eletrônicos mais avançados.

Prazeres (2023) reitera que uma das áreas em que a nanotecnologia pode ter um impacto positivo é na geração de energia, pois a utilização de nanomateriais em células solares, por exemplo, pode aumentar a eficiência de conversão de energia solar em eletricidade, além disso, nanopartículas semicondutoras podem ser incorporadas às células solares para amplificar a absorção de luz e melhorar a eficiência da conversão.

Kremer *et. al.*, (2020) indicam que a aplicação de nanomateriais em sistemas de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio, pode melhorar a capacidade de armazenamento e a vida útil das baterias, contribuindo para a integração de fontes renováveis de energia e o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis.

Já em relação à transmissão e distribuição de energia elétrica, a nanotecnologia também pode desempenhar um papel importante, pois de acordo com Pérez-Arriaga, *et. al.*, (2021), os cabos condutores de eletricidade podem se beneficiar

da incorporação de nanotubos de carbono, que oferecem uma condutividade elétrica superior ao cobre e ao alumínio.

Desse modo, percebe-se que a adição de nanotubos de carbono em cabos de energia pode reduzir as perdas de energia durante a transmissão, melhorar a eficiência do sistema e diminuir os custos operacionais e, ainda, os nanomateriais podem ser usados para melhorar a resistência à corrosão dos cabos, prolongando sua vida útil e reduzindo a necessidade de manutenção frequente.

Outra aplicação da nanotecnologia no setor elétrico brasileiro está relacionada à criação de dispositivos eletrônicos avançados, pois os nanomateriais, como os nanotubos de carbono e os pontos quânticos, possuem propriedades eletrônicas únicas que podem ser exploradas para o desenvolvimento de transistores, sensores e dispositivos de armazenamento de dados mais eficientes e compactos. Esses avanços tecnológicos podem contribuir para a inovação no setor elétrico, permitindo a criação de dispositivos eletrônicos mais poderosos, com menor consumo de energia e maior capacidade de processamento (RODRIGUES, 2023).

Além disso, a nanotecnologia pode contribuir para a melhoria da eficiência energética em edifícios e infraestruturas, pois segundo Amaral; Ferreira (2020), a aplicação de nanomateriais em isolantes térmicos pode aumentar a capacidade de isolamento e reduzir as perdas de calor, resultando em sistemas de climatização mais eficientes e menor consumo de energia, de modo que a utilização de nano revestimentos em painéis solares e vidros de janelas também pode melhorar a captura de luz solar e a eficiência energética dos edifícios.

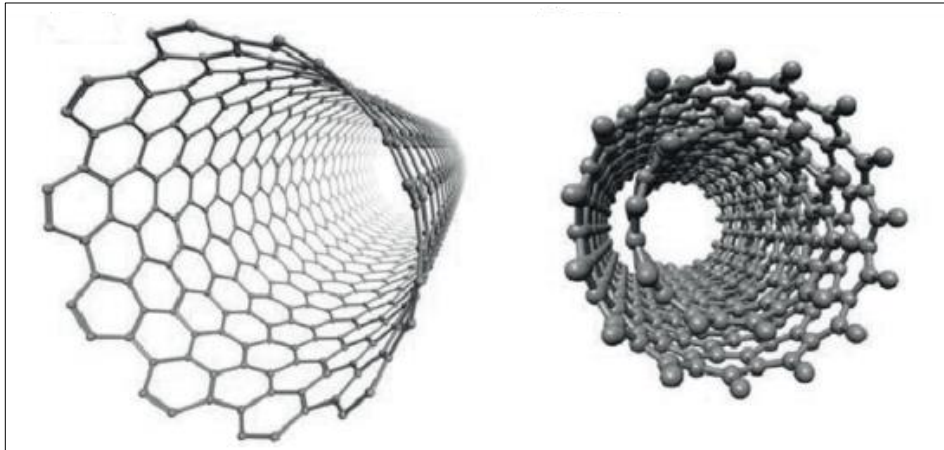
Sendo assim, a aplicação da nanotecnologia no setor elétrico brasileiro apresenta um potencial significativo para trazer avanços tecnológicos e melhorias em diversas áreas, especialmente, porque a nanotecnologia pode contribuir para o aumento da eficiência energética, a melhoria da transmissão e distribuição de energia, o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos avançados e a criação de sistemas de armazenamento de energia mais eficientes.

2.2 Nanotubos de Carbono

Os nanotubos de carbono (NTC) foram expostos por Iijima (IIJAMA, 1991) e podem ser considerados como folhas de grafeno enrolado, isto é, camadas únicas de grafite. Os nanotubos de carbonos, são geralmente distribuídos em nanotubos de

carbono paredes múltiplas (NTCPM) e nanotubos de carbono de parede simples (NTCPS), como representa na Figura 1 (GODDARIII *et al.*, 2007). Os NTCs apresentam excelentes propriedades mecânicas para a tração e ainda melhores para a compressão, além de mostrar também, ótimas propriedades térmicas e elétricas.

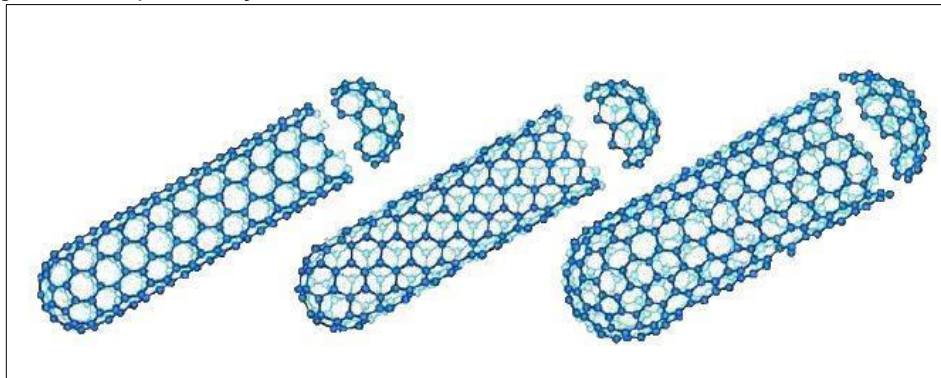
Figura 1 – Diagrama esquemático representativo de nanotubos de carbono (a) de parede simples (NTCPS), (b) de paredes múltiplas (NTCPM).



Fonte: ZABIN, 2013.

Nanotubos proporcionam uma morfologia tubular, com arranjos hexagonais de carbono. Suas extremidades são naturalmente fechadas por hemisférios equivalentes a meia molécula de fulereno, conforme na Figura 2. Ademais, pode-se considerar sua formação como o enrolar de uma folha de grafeno em um cilindro, ocasionando tubos de dezenas de angstroms de diâmetro e dezenas de nanômetros ou até mesmo milímetros de comprimento (HERBST *et al.*, 2004).

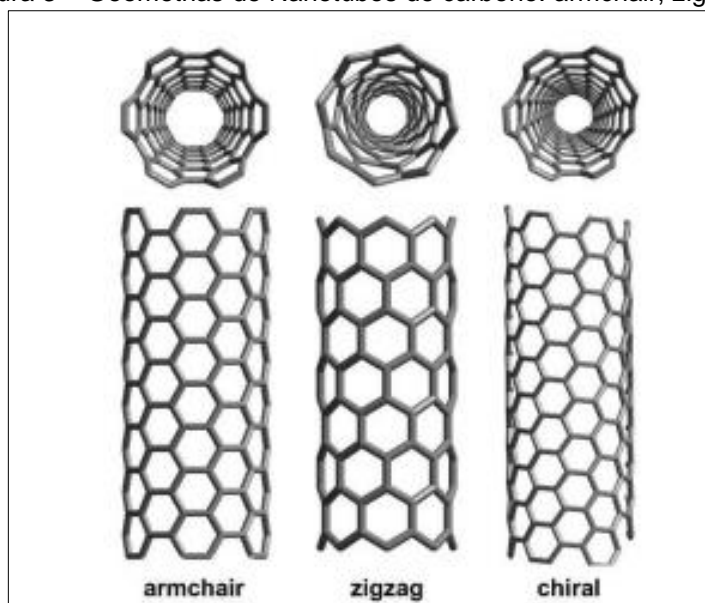
Figura 2 – Representação dos Nanotubos de carbono e suas extremidades fechadas



Fonte: MORAES, 2013

Os nanotubos de carbono são descritos usando três morfologias: armchair, zig zag e quirais, como indicado na Figuras 3. As variações na morfologia de nanotubos pode levar a alterações nas suas propriedades, por exemplo, um nanotubo armchair apresenta característica metálica; no entanto, os nanotubos zig zag e quirais são semicondutores. O procedimento é determinado com base no modelo matemático desenvolvido usando os índices do vetor quiral (GODDARII *et. al.*, 2007).

Figura 3 – Geometrias de Nanotubos de carbono: armchair, zig-zag e quiral.

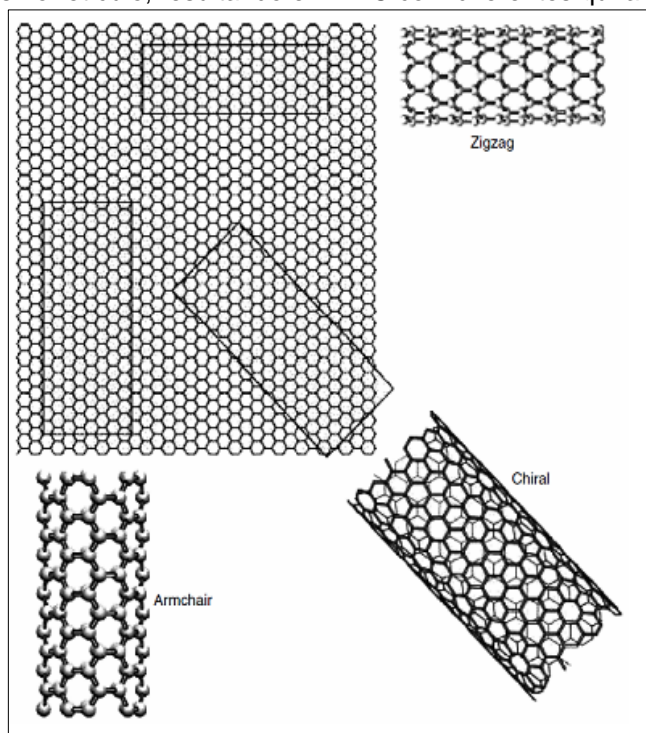


Fonte: TERRONES, 2003.

A pesquisa relacionada com estas estruturas foi classificada que os NTCPM são mais homogêneos em suas propriedades físicas com muitos tubos coaxiais com propriedades individuais. Tornando-se adequados para aplicações onde seu tamanho manométrico e as propriedades podem ser descobertas. Ademais, os NTCPS são produzidos com um conjunto de tubos que interatuam fragilmente com diferentes diâmetros.

As propriedades físicas dos NCT, podem mudar de maneira drástica, pois a estrutura eletrônica é muito sensível a direção de enrolamento, o chamado vetor quiral. Estar sujeito do vetor quiral, NTCPS pode ser metálico ou semicondutor. Dessa forma, proporcionando uma rica gama de fenômenos físicos, entretanto não obteve crescimento dirigido e seleção controlada de NTCPS com um vetor quiral bem definido realizado com sucesso (ROTKIN; SUBRAMONEY, 2005). Na Figura 4 demonstra a folha de grafeno e as formas com que a folha enrolada resulta em NTC com diferentes quiralidades.

Figura 4 – A folha de grafeno e as formas com que a folha pode ser enrolada através dos diferentes pontos no retículo, resultando em NTC com diferentes quiralidades.



Fonte: GOGOTSI, 2006

Em suma, os nanotubos de carbono na forma de nanotubos de carbono de parede múltipla (NTCPM) e nanotubos de carbono de parede única (NTCPS) têm sido objeto de intensa pesquisa devido às suas propriedades físicas únicas e potenciais aplicações em uma variedade de campos.

Conforme suas propriedades estruturais, eletrônicas, físicas e químicas, os NTC podem ser sensíveis ao ambiente em que se localizam, possuindo um amplo interesse na sua funcionalização (inserção de radicais na estrutura dos nanotubos por ligações covalentes ou não covalentes, ou ainda interações tipo Van der Waals), aumentando as características de solubilidade (SAIO; ZETTL, 2008).

Os nanotubos são fortes, resistentes a uma temperatura relativamente alta, são estáveis termicamente, e proporcionam cerca de 1 nm de largura. Além disto, são todas as características positivas para aplicações eletrônicas em escala molecular (SAIO; ZETTL, 2008).

As propriedades eletrônicas e térmicas peculiares de nanotubos recomendam muitas aplicações e tecnologias, que vão desde elevadores espaciais até filtros de água e circuitos eletrônicos de alta densidade. Alguns dispositivos baseados nos nanotubos já localizam no mercado (SAIO; ZETTL, 2008).

As características definidas do NTC não se restringem as propriedades elétricas, mas amplia às propriedades mecânicas. Tem sido exposto que o módulo de Young de um NTC é extremamente alto e é da ordem de 1 TPa. Ademais, os nanotubos de carbono não são frágeis e podem ser dobrados plasticamente (MAI, 2006).

Outra utilização seria nos compósitos e nanocompósitos sendo nos últimos anos, sendo realizado na tentativa de se obter materiais compósitos. Estes materiais podem ser definidos como sendo formados por dois ou mais componentes, apresentando propriedades singulares e diferentes daquelas dos seus componentes individuais. Apresentando-se em escala nanométrica, denominada nanocompósito (GEHR; BOOYD, 1996).

Estudos indicam que a incorporação de nanotubos de carbono (CNTs) ao alumínio puro resulta em compósitos com propriedades aprimoradas em relação aos metais convencionais. Os CNTs possuem características únicas, incluindo baixa densidade (1,3 g/cm³ para nanotubos de parede simples, NTCPS, e 2,1 g/cm³ para nanotubos de paredes múltiplas, NCTPMs), significativamente inferior à densidade do cobre (8,96 g/cm³). Eles oferecem boas estabilidade ambiental, resistindo a condições extremas de pressão e variações de temperatura. As propriedades mecânicas dos CNTs são notáveis, com módulo de Young em torno de 1,0 TPa e resistência à tração de até 50 GPa. Além disso, apresentam excelente condutividade elétrica para NTCPS ($\approx 10^8$ V/m) e condutividade térmica que varia entre 2000 e 7500 W/mK. Esses atributos tornam os CNTs promissores para aplicações em compósitos de alta eficiência, especialmente em contextos que demandam materiais leves, com resistência mecânica superior, estabilidade e alta condutividade térmica e elétrica (SILVA, 2024).

Suas propriedades elétricas também são excelentes, podendo ser metálicos e semicondutores, dependendo da sua estrutura. Os nanotubos de carbono que apresentam características metálicas têm uma condutividade superior à do cobre, já quando apresenta natureza de semicondutor, se comporta como o silício. Já suas propriedades térmicas, se apresentam como bons dissipadores térmicos, tendo uma condutividade térmica de aproximadamente 6000 W/mK a temperatura ambiente e sua estabilidade térmica é de cerca de 2800°C, em vácuo, e 750°C, no ar (HECTOR, 2013).

A Tabela 1 resume as propriedades elétricas e térmicas dos nanotubos de carbono.

Tabela 1 – Propriedades Elétricas e Térmicas dos Nanotubos de Carbono: Uma Visão Geral

Propriedade	Descrição
Tipo de Condutividade	Depende da estrutura dos nanotubos de carbono:
- Metálico	Condutividade elétrica superior à do cobre
- Semicondutor	Comportamento semelhante ao silício
Condutividade Térmica	Aproximadamente 6000 W/m·K à temperatura ambiente
Estabilidade Térmica	- Em vácuo: cerca de 2800 °C - No ar: cerca de 750 °C

Fonte: Autor, 2024

A incorporação de nanotubos de carbono (NTC) em compósitos metálicos apresentam desafios significativos que limitam sua viabilidade industrial. A dispersão inadequada dos nanotubos leva à formação de aglomerados, comprometendo a homogeneidade e reduzindo a eficiência do reforço estrutural (ESAWI & MORSI, 2007). Além disso, a fraca adesão interfacial entre os NTC e a matriz metálica dificulta a transferência de carga, resultando em menor aprimoramento mecânico do material (BAKSHI et al., 2010).

Os métodos de fabricação, como fundição e sinterização por plasma de faísca (SPS), impõem obstáculos adicionais, pois as altas temperaturas podem degradar os nanotubos ou promover reações indesejadas com a matriz (LAHA et al., 2009). Além disso, o alto custo dos NTC e a complexidade de seu processamento dificultam a escalabilidade e a competitividade econômica desses compósitos para aplicações industriais (SINGH et al., 2013). Sem avanços nos processos de dispersão, adesão interfacial e fabricação, a aplicação prática dos compósitos metálicos reforçados com NTC permanecerá restrita ao nível experimental.

2.3 Ligas de alumínio eletrocondutores

A crescente demanda industrial por materiais que combinem baixa densidade, alta resistência à tração (UTS) e excelente condutividade elétrica (CE) tem impulsionado o desenvolvimento de ligas de alumínio para aplicações elétricas. Devido à sua leveza e suas ligas destacam-se como opções altamente eficazes nesse

campo. Há mais de 40 anos, cabos de alumínio têm sido utilizados com sucesso, sem registrar problemas de segurança, o que tem promovido uma substituição cada vez maior dos condutores de cobre em sistemas de transmissão de energia a longa distância.

Na Tabela 2 inclui as ligas consideradas eletrocondutoras, organizadas por suas séries, incluindo a série PM (Personalidade de Metalúrgico).

Tabela 2 – As principais ligas de alumínio eletrocondutoras e suas características em relação à condutividade elétrica.

Série	Composição Principal	Ligas Exemplos	Nota sobre Condutividade	Fontes
1xxx	Alumínio puro (>99%)	1050, 1100	Alta condutividade elétrica, geralmente usada em aplicações onde a pureza é importante.	- ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy" por John E. Hatch
2xxx	Alumínio-cobre	2011, 2024	Boa condutividade, mas menor que a das ligas da série 1xxx. A série 2xxx é mais conhecida por sua resistência mecânica.	- ASM Handbook, Volume 2 - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Physical Metallurgy Principles" por Robert E. Reed-Hill e Reza Abbaschian
3xxx	Alumínio-manganês	3003, 3105	Boa condutividade elétrica e resistência à corrosão. Utilizado em aplicações como embalagens e componentes automotivos.	- ASM Handbook, Volume 2 - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Materials Science and Engineering: An Introduction" por William D. Callister Jr
4xxx	Alumínio-silício	4045, 4032	Boa condutividade elétrica, e são amplamente utilizados em aplicações automotivas e de engenharia.	- ASM Handbook, Volume 2 - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy" por John E. Hatch
5xxx	Alumínio-magnésio	5052, 5083	Condutividade elétrica razoável, com excelente resistência à corrosão. Usado em ambientes marinhos e para construção de embarcações.	- ASM Handbook, Volume 2 - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Physical Metallurgy Principles" por Robert E. Reed-Hill e Reza Abbaschian
6xxx	Alumínio-magnésio-silício	6061, 6082	Condutividade elétrica moderada, boa resistência e versatilidade. Usado em estruturas e componentes de engenharia.	- ASM Handbook, Volume 2 - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Materials Science and Engineering: An Introduction" por William D. Callister Jr

7xxx	Alumínio-zinco	7075, 7050	Condutividade elétrica relativamente baixa, mas alta resistência mecânica. Usado em aplicações aeroespaciais e militares.	- ASM Handbook, Volume 2 - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy" por John E. Hatch
8xxx	Outras ligas de alumínio	8006, 8090	Varia dependendo da composição; 8090, por exemplo, é conhecido por sua alta resistência e é usado em aplicações aeroespaciais.	- ASM Handbook, Volume 2 - Aluminium Association - Aluminium Standards and Data - "Physical Metallurgy Principles" por Robert E. Reed-Hill e Reza Abbaschian
PM	Ligas Personalizadas	Varia conforme o projeto	Projetadas para atender a requisitos específicos, incluindo condutividade elétrica quando necessário.	- Artigos e publicações científicas - "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy" por John E. Hatch

Fonte: Autor, 2024.

Atualmente, os requisitos de desempenho para ligas de alumínio condutoras variam de acordo com a aplicação específica. Para linhas de transmissão de longa distância, as ligas precisam atender a critérios rigorosos de resistência e condutividade. Nesses casos, é essencial que as ligas tenham uma alta resistência mecânica, tipicamente em torno de 320 MPa, e uma condutividade elétrica de cerca de 53% IACS (ALLAMKI A., 2023).

Essas propriedades garantem a eficiência e a durabilidade dos cabos em grandes distâncias. Por outro lado, em aplicações civis, como cabos domésticos e engenharia automotiva, a ênfase é frequentemente colocada na condutividade elétrica para otimizar a eficiência energética e minimizar perdas. Nessas situações, as ligas de alumínio são escolhidas principalmente pela sua alta condutividade elétrica, que é crucial para a conservação de energia e o desempenho eficiente dos sistemas elétricos sendo destacado por S. Koch (2007) diferenciando as exigências de desempenho para ligas de alumínio, evidenciando a importância de adaptar as propriedades dos materiais às necessidades específicas de cada aplicação.

O alumínio puro comercial, com um teor de alumínio superior a 99,7%, apresenta excelente condutividade elétrica (61-64% IACS) devido ao baixo nível de impurezas e à pequena distorção da rede cristalina. No entanto, sua resistência à tração final (UTS) é relativamente baixa (70-90 MPa) no estado fundido, devido à ausência de reforços e ao endurecimento por trabalho (S. KOCH, 2007). Os fios de Al puro com propriedades diversificadas são mostrados em Tabela 3.

Tabela 3 - Condutividade comercial de Al puro.

Ligas	Métodos	UTS (MPa)	CE (IACS) [%]	Ref.
AA1070	Refinamento de grãos e tratamento com boro	87	63,2	X. Cui, 2015.
1070	Refinamento de grãos e tratamento com boro	95	62,06	Q. Zhao, 2015.
Al (99,6%)	A deformação do estirado a frio	204,2	62,59	JP Hou, 2018.
1070	Deformação de estampagem rotativa	109	56,70	Y. Yang, 2019.
Al (99,7)	Com adição de 0,3% em peso de Ce	78	63,62	Y. Zhan, 2019.
Al (99,7)	Com adição de nanopartículas de Ti (C, N)	64	63,40	W.-P. Li, 2020.
Al (99,9)	Extrusão a quente processo de trefilação	170	60,40	P. Koprowski, 2020.

Fonte: Y. WANG, 2021.

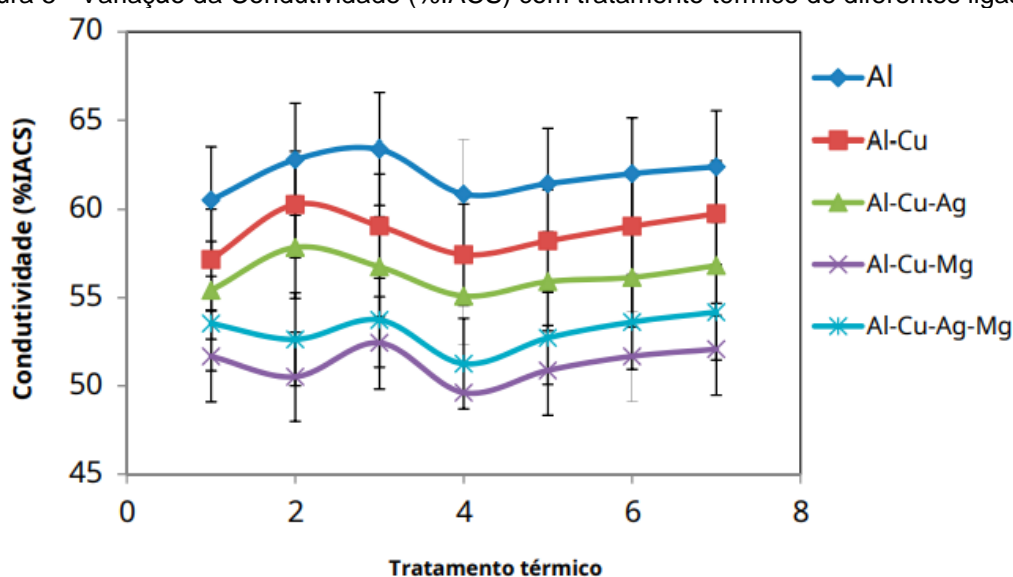
A resistência do alumínio puro pode ser significativamente aumentada por extrusão a quente e trefilação a frio multipasse, técnicas usadas para preparar fios. Por exemplo, Hou et al (2018). obtiveram uma condutividade elétrica de 62,59% IACS e uma resistência de 204 MPa por deformação a frio, enquanto Koprowski et al. (2020), alcançou de 60,4% IACS e uma resistência de 170 MPa com métodos semelhantes. As melhorias nas propriedades envolvem a redução de impurezas e o reforço da microestrutura por deformação, resultando em uma maior densidade de deslocamento e limites de grão.

A condutividade elétrica e a resistência mecânica são propriedades cruciais para a produção de materiais condutores de alumínio, especialmente para cabos de transmissão elétrica. O desenvolvimento para esses cabos exige uma combinação equilibrada de propriedades elétrica e mecânica. Defeitos e solutos presentes na estrutura cristalina podem causar o espalhamento dos elétrons, o que diminui a condutividade. A maioria das ligas envelhecidas exibe uma relação peculiar entre as propriedades que pode ser descrita como uma curva "em forma de C". Inicialmente, o aumento da dureza ou resistência à tração reduz a condutividade elétrica. Contudo, após um certo limite, o endurecimento contínuo pode favorecer sua recuperação. Conforme descrito por Hagemaiier (1982), a relação "em forma de C" reflete o

equilíbrio complexo entre a microestrutura do material e suas propriedades mecânicas e elétricas.

As propriedades melhoradas podem ser alcançadas por vários métodos, como trabalho a frio, tratamento térmico e adição de elementos de liga à matriz de alumínio. A adição de elementos de liga, incluindo elementos menores, elementos principais e impurezas microestruturais, pode controlar a resistência necessária e a condutividade elétrica da liga. A Figura 5 mostra a variação da Condutividade (%IACS) com tratamento térmico de diferentes ligas.

Figura 5 - Variação da Condutividade (%IACS) com tratamento térmico de diferentes ligas.



Fonte: Abdo H, 2021.

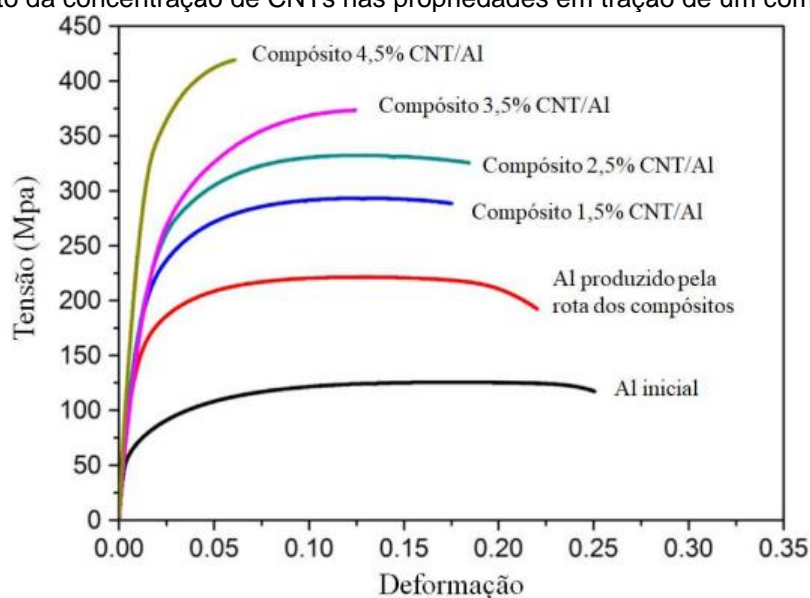
De acordo com Abdo H. (2021), a condutividade elétrica das ligas fundidas de alumínio, após processos de laminação a quente e tratamentos térmicos variados como têmpera, normalização, revenimento e envelhecimento, foi ligeiramente reduzida devido à adição de elementos de liga e aos tratamentos térmicos aplicados. No entanto, o envelhecimento das ligas resultou na melhor condutividade elétrica. Isso se deve a alterações na temperatura e à dissociação dos grãos, que melhoraram as propriedades condutivas das ligas.

2.4 Adição de Nanotubos de Carbono em Matriz Metálica de Alumínio

A adição de nanotubos de carbono (NTCs) à matriz de alumínio melhora a rigidez e a resistência à tração do material, mas também torna o compósito mais frágil

ao reduzir sua ductilidade, o que significa menor capacidade de deformação plástica. Isso ocorre porque os NTCs reforçam a estrutura, mas interferem na mobilidade das falhas (discordâncias) dentro do material, diminuindo a capacidade de alongamento do alumínio (Figura 6). O desafio científico está em encontrar uma concentração ideal de NTCs que aumente a resistência sem comprometer a ductilidade excessivamente. Para superar esse problema, pesquisadores vêm explorando técnicas de dispersão mais eficientes dos NTCs e o uso de outros materiais de reforço, como nanopartículas de grafeno ou fulerenos, que podem oferecer um compromisso mais equilibrado entre resistência e ductilidade (BATISTA, 2022).

Figura 6 - Efeito da concentração de CNTs nas propriedades em tração de um compósito CNT/Al.



Fonte: YANG et al. 2016

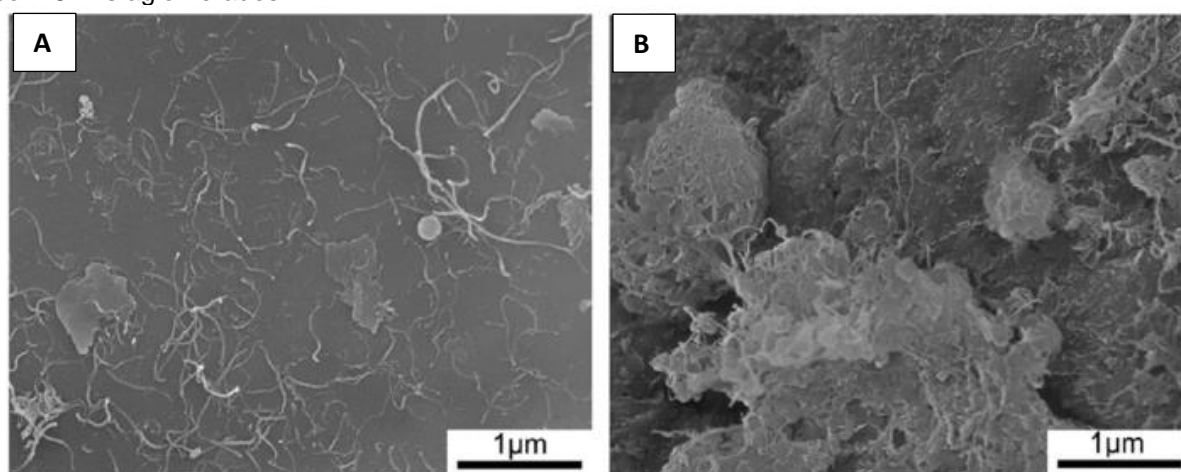
Teoricamente, a adição de nanotubos de carbono (NTCs) ao alumínio aumenta a resistência mecânica do compósito. No entanto, em concentrações acima de 1%, surgem desafios na dispersão uniforme dos NTCs, causando problemas como aglomeração, porosidade intergranular e processamento mais difícil. Isso leva à perda de resistência mecânica devido à má consolidação do material. Por essa razão, a maioria dos estudos limita a concentração de NTCs a 1% para evitar esses efeitos negativos e garantir a melhoria da resistência sem sacrificar a qualidade do compósito (BATISTA, 2022).

O principal desafio na produção de compósitos com nanotubos de carbono (NTCs) é garantir a dispersão homogênea e a incorporação eficiente dos NTCs na matriz metálica. Isso é dificultado pelas elevadas forças de Van der Waals, que

promovem a aglomeração dos NTCs, além da morfologia tubular, alta relação de aspecto, grande área superficial e baixa molhabilidade no metal fundido. A diferença significativa nas tensões superficiais entre os NTCs e o metal também contribui para esse problema, tornando o processo de dispersão mais complexo (BATISTA, 2022).

Durante o processamento os nanotubos tendem a se organizar em forma de aglomerados (clusters) e se concentram entre as partículas metálicas, o que prejudica as propriedades do compósito (CHEN et al., 2015a; SINGLA; AMULYA; MURTAZA, 2015). Na Figura 7 são apresentadas imagens da superfície de partículas de um compósito com NTC/Al com nanotubos dispersos e aglomerados.

Figura 7 - Partículas do compósito 1% CNT/Al com (a) região com CNTs dispersos e (b) região com CNTs aglomerados.



Fonte: GUO et al., 2017.

Conforme Batista L. (2022), diversas técnicas foram desenvolvidas para melhorar a dispersão e a adesão dos nanotubos de carbono (CNTs) em matrizes metálicas. Cada método apresenta vantagens específicas, como controle da distribuição e reprodutibilidade, sendo que abordagens como ultrassom, moagem mecânica e funcionalização química têm se mostrado mais eficientes e consistentes, enquanto outras apresentam limitações práticas ou de uniformidade. A escolha da técnica depende das propriedades desejadas e do tipo de matriz metálica utilizada (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparativo de técnicas de mistura / incorporação de nanotubos de carbono em matrizes metálicas.

Técnica	Princípio	Vantagens	Desvantagens	Referências
		- Produção em massa	- Geração de defeitos e quebra dos NTCs.	Al (CHEN et al., 2015a; ESAWI et al., 2009; LIU et

Mistura mecânica (Ball milling)	Partículas metálicas e NTCs são misturados e moídos em uma jarra com bolas de alta dureza.	<ul style="list-style-type: none"> - Boa dispersão dos NTCs na matriz metálica - Possibilidade de confecção de ligas durante a mistura 	<ul style="list-style-type: none"> - Alteração na forma das partículas - Encruamento do Al - Inclusão de contaminantes - Tempo de processo longo 	al., 2017a; PENG; CHANG, 2014), Ni (RATHER; NAHM, 2014), Mg (NAI; WEI; GUPTA, 2014), Cu (YOON et al., 2013), Fe (BARZEGAR VISHLAGHI; ATAIE, 2014)
Mistura em nível molecular	Uma reação química ou física ocorre NTCs funcionalizados e íons metálicos em meio líquido	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de dispersar uniformemente grandes concentrações de CNTs (10-15 %vol) em matrizes metálicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Impurezas de óxidos - Produção apenas em escala laboratorial - Processo complexo 	Cu (CHA et al., 2005; KIM; CHA; HONG, 2007; TU et al., 2016), Ni (HWANG et al., - 2013)
Metalização (i.e., decoration with metals)	Os NTCs são revestidos com uma camada metálica de Cu, Ni, Co, Mo ou W antes de sua introdução na matriz.	Alta eficiência (dependendo do método de dispersão usado com os NTCs metalizados)	Necessidade de um método de mistura adicional como mistura mecânica para produzir partes densas	Al (NIE et al., 2011), Cu (NIE et al., 2012)
Ultrassom	Os CNTs são dispersos em uma solução com solventes orgânicos ou surfactante com o uso ondas sonoras de alta frequência.	<ul style="list-style-type: none"> - Produção em grande escala - Processamento fácil - Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> - Geração de defeitos em CNTs (menor que a mistura mecânica) 	Al (WU et al., 2012), Cu (ZHAO et al., 2016)
Reforço híbrido	Os CNTs são adicionados a outros componentes como SiC, A2O3 e grafite para melhor distribuição.	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de obter maior resistência mecânicas devido ao efeito de fortalecimento dos reforços híbridos 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de um processo de mistura adicional - Possibilidade de formação de compostos intermetálicos indesejados 	Mg (HABIBI et al., 2011), Al (KWON; LEPAROUX; KAWASAKI, 2014), Cu (AKBARPOUR et al., 2013)

Fonte: Azarniya et al 2017.

A complexidade e a qualidade final dos compósitos metálicos reforçados com nanotubos de carbono (NTCs) dependem dos materiais utilizados e do histórico de processamento. Além de garantir a boa dispersão dos NTCs nas partículas metálicas,

é essencial que o processamento termomecânico consolide adequadamente o compósito sem degradar os nanotubos. O equilíbrio entre a integridade estrutural dos NTCs e a boa coesão com a matriz metálica é fundamental para melhorar as propriedades mecânicas e evitar a perda de desempenho do material (BATISTA, 2022).

Para obter os benefícios dos nanotubos de carbono em compósitos de matriz metálica, é crucial utilizar técnicas eficazes de dispersão e consolidação. Essas técnicas devem garantir uma distribuição uniforme dos NTCs, boa adesão à matriz metálica e mínima degradação dos nanotubos. Métodos como mecanofusão, ultrassom, modificação química, metalurgia do pó, fundição e extrusão são comumente aplicados. A seleção cuidadosa desses métodos e o controle dos parâmetros de processamento são essenciais para desenvolver compósitos de alumínio de alto desempenho (CARNEIRO I., 2021).

3 MÉTODO

3.1 Desenho do estudo

Foi realizado um estudo em revisão sistemática fundamentada na recomendação *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Neste estudo, os itens que não corresponderam a metanálise não serão utilizados para a elaboração do artigo.

Foram considerados somente os artigos publicados no idioma inglês, que analisaram a melhoria das propriedades elétricas condutoras com adição de nanotubos de carbono na matriz de alumínio. Além disso, foram excluídos estudos de revisão da literatura, dissertações, teses, editoriais, diretrizes e baixa qualidade metodológica com risco de viés (score ≤ 3 na *Jadad Scale*).

3.2 Coleta de dados

A busca foi realizada de forma *on-line* na base de dados Science Direct (Scopus). Foram utilizados os string de pesquisa: "Carbon nanotubes" AND "electrical conductivity" AND "aluminum metal matrix" AND "applications" OR "electrical properties" OR "conductivity enhancement" AND "nanocomposites" OR "metal matrix composites" OR "nanotechnology"

A seleção dos estudos seguiu o passo a passo registrado no PRISMA. Durante a pesquisa nas bases de dados estabelecidas, após se obter o número de relatos identificados, os trabalhos duplicados foram eliminados. Posteriormente, após filtração pelo idioma, os estudos foram selecionados conforme a leitura dos títulos e resumos, excluindo aqueles que divergiram do tema da pesquisa. Os demais estudos foram filtrados pelos critérios de elegibilidade (resumo, palavras-chave e fator de impacto). O último processo de seleção foi a leitura dos artigos na íntegra, e os que se enquadraram nos critérios de elegibilidade integraram essa revisão.

3.3 Análise de dados

A compilação dos dados foi realizada no *Microsoft Word*[®] através de fichamento eletrônico. Foram identificadas as características do estudo incluindo desenho de estudo; ano de publicação; características dos participantes, fator de impacto e índices de citações; características da intervenção incluindo variáveis analisadas e instrumentos de avaliação e principais desfechos.

A pesquisa inicial obteve 84 documentos, dos quais 60 estavam em duplicidade e foram excluídos. Os 24 títulos foram analisados, sendo selecionados e avaliados 18 resumos potencialmente relevantes. E um total de 8 documentos foram completamente lidos, dos quais 4 foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão de acordo com o objetivo da pesquisa, totalizando 4 documentos selecionados por satisfazerem os critérios de elegibilidade sendo a importância da escolha adequada de NTCs, métodos de dispersão eficazes e a exploração de aditivos complementares para alcançar um equilíbrio entre propriedades elétricas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os artigos selecionados (Quadro 2) são provenientes da base de dados Science Direct (Scopus), em língua inglesa combinados entre si com os conectores booleanos *AND* e *OR*.

Quadro 2 – Síntese dos produtos dos artigos selecionados

Título	Palavras-Chave	Autor	Índices de Citações
Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio-Graphene/Nanotubos de Carbono (CNTs): Avanços, Oportunidades e Perspectivas	Compósitos de matriz metálica; Nanotubos de carbono (CNT'S); Propriedades Mecânica	Khanna et al.; 2021.	109
Perspectivas Futuras e Cenário Atual das Características dos Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio.	Composto de matriz metálica de alumínio; Reforço; Metalurgia do pó	Singh et al.; 2023.	88
Cavação Ultrassônica: Uma Abordagem para a Síntese de Nanocompósitos de Matriz Metálica Uniformemente Dispersos — Uma Revisão.	Compósitos de matriz metálica; compósitos de matriz metálica Al; Cavitação ultrassônica	Mohanty et al.; 2020.	49
Materiais de Matriz e Reforço para Compósitos de Matriz Metálica.	Compósitos com matriz metálica; Propriedades Mecânicas	Selvam et al.; 2021.	36
Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio Reforçados com SiC/Graphene Preparados por Metalurgia do Pó: Uma Revisão.	Compósito de Matriz de Metal; metalurgia do pó; condutividade térmica; resistência à tração final	Sadhu et al.; 2023.	34
Estruturas Compostas Reforçadas com Nanotubos de Carbono Gradados Funcionalmente: Uma Revisão Abrangente.	Nanotubos de Carbono Graduado; Propriedades Mecânicas; Nanocompósitos	Soni et al.; 2022.	30
Características de Lubrificação e Mapeamento do Mecanismo de Desgaste para Compósitos Híbridos de Matriz Metálica de Alumínio Deslizantes Sob Óleo de MWCNT Funcionalizado com Surfactante.	Lubrificação Mecanismo; Matriz Metálica; Mecanismo	Singh et al.; 2020.	26
Medida Ingeniosa Baseada em Entropia Neutrossófica para Classificação de Parâmetros de Processo e Resistência ao Desgaste de Compósitos Híbridos AA7075-B4C de Matriz Metálica de Alumínio Processados por Fricção e Mistura Usando Transformadas de Fourier Rápidas.	Entropia difusa; FSP; Taxa de alimentação	Kumar et al.; 2022.	17

Título	Palavras-Chave	Autor	Índices de Citações
Uma Revisão sobre Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio.	Composto de matriz metálica; liga de alumínio; Ensaio mecânicos	Ramnath et al.; 2021.	15
Processamento e Propriedades de Compósitos Reforçados com Nanotubos de Carbono: Uma Revisão.	Nanotubos de carbono; Propriedades elétricas e mecânicas dos polímeros	Kumar et al.; 2020.	14
Paradigma dos Compósitos de Matriz Metálica de Cobre Reforçados com CNT de Última Geração: Processamento, Caracterizações e Aplicações.	Compósitos de matriz metálica; Nanotubos de carbono (CNT'S); Cobre; Força; Condutividade elétrica; Dureza.	Singh et al.; 2023.	14
Sinterização por Plasma de Faísca de Pós à Base de Alumínio Reforçados com Nanotubos de Carbono: Investigação da Condutividade Elétrica e Propriedades de Dureza.	Nanotubos de carbono; sinterização por plasma de faísca (SPS); condutividade elétrica; pós de alumínio; dureza de amostra	Ulloa-Castillo et al.; 2021.	11
Caracterização e Comportamento Tribológico de Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio – Uma Revisão.	Liga de Al; SiC; CNT; Fundição por agitação líquida	Munnur et al.; 2021.	10
Melhoria Simultânea das Propriedades Elétricas e Mecânicas de Ligas de Alumínio Nanoestruturadas.	Nanocompósitos de alumínio, nanotubos de carbono de paredes múltiplas, pó de aço inoxidável nanoestruturado	Prazeres et al.; 2022.	9
Simulação baseada em microestrutura do comportamento mecânico de compósitos de matriz metálica reforçada com partículas com características de partículas variáveis.	Compósitos de matriz metálica; características das partículas; Modelagem de elementos finitos; Desempenho mecânico; Evolução de falhas	Yan et al.; 2023.	4
Nova Tecnologia de Extrusão Solid-Stir para Fabricação de Cabos com Condutividade Aprimorada Através da Exfoliação In-Situ de Grafite para Grafeno.	Compósitos de matriz metálica híbrida; condutividade térmica; difusividade térmica	Sharma et al.; 2024.	3
Análise Térmica de Compósitos Híbridos de Matriz Metálica de Alumínio.	Compósitos de matriz metálica híbrida; condutividade térmica; difusividade térmica	Sangeetha et al.; 2024.	3
Efeito das Condições de Processamento e Materiais de Eletrodo na Rugosidade da Superfície de Compósitos Híbridos de Matriz Metálica Processados por EDM.	Matriz metálica de alumínio; Fundição por agitação; Usinagem por descarga elétrica;	Singh et al.; 2024.	3

Título	Palavras-Chave	Autor	Índices de Citações
Caracterização Magnética e Mecânica de Compósitos Híbridos de Matriz Metálica Al-MWCNT-Fe-Ni.	Caracterização magnética e mecânica; compósitos de matriz metálica; morfológica dos compósitos	Tugirumubano et al.; 2021.	3
Fabricação e Caracterização de Nano Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio 6101-Selênio/Carboreto de Boro/Nanotubos de Carbono.	Compósitos de matriz metálica de alumínio; Resistência à corrosão; Resistência ao desgaste, Condutividade elétrica	Prasad M. et al.; 2022.	2
Um Estudo sobre a Caracterização Mecânica de Compósitos de Matriz Metálica Reforçados com Nanotubos de Carbono.	Caracterização mecânica; Nanotubo de carbono; compósitos de matriz metálica	Velmurugan et al.; 2022.	2
Investigação das Propriedades Mecânicas, Condutividade Térmica e Elétrica de Nanocompósitos Al ₂ O ₃ Reforçados com Nanotubos de Carbono de Múltiplas Paredes.	Nanotubos de carbono; Metalurgia do pó; Condutividade elétrica e mecânica	Shadakshari et al.; 2022.	0
Influência de Nanopartículas em Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio Reforçados em Aplicações Aeroespaciais – Uma Revisão.	Resistência Mecânica; Compósitos de Alumínio; Matriz Metálica	Qadir et al.; 2023.	0
Influência de Nanoplaquetas de Grafeno e Partículas de Dibróxido de Titânio nas Propriedades de Desgaste e Ligação Interfacial de Compósitos de Liga de Alumínio Sinterizados.	Nanoplaquetas de grafeno; compósitos de matriz metálica de alumínio; propriedades térmicas	Lokesh Kumar et al.; 2024.	0

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024.

Após as buscas e análises completas os 4 documentos selecionados para compor o estudo foram relacionados e são apresentados, por ordem alfabética, no Quadro 3. Sendo quatro artigos científicos publicados.

Quadro 3 – Referências completas dos documentos selecionados.

Referências Completas
¹ Castillo N A. U., Romero O M., Maya R H., Cárdebas E S., Zuniga A E., Sinterização por Plasma de Faísca de Pós à Base de Alumínio Reforçados com Nanotubos de Carbono: Investigação da Condutividade Elétrica e Propriedades de Dureza. <i>Materials</i> , 2021.
² Hari Prasad M., Venkata Ramaiah P, Fabricação e Caracterização de Nano Compósitos de Matriz Metálica de Alumínio 6101-Selênio/Carboreto de Boro/Nanotubos de Carbono. <i>Materials Today: Proceedings</i> , 2022.

³ Prazeres E. R. Loayza C. R. L., Reis V.S., Melo V. L., Quaresma J. M. V. et al. Melhoria Simultânea das Propriedades Elétricas e Mecânicas de Ligas de Alumínio Nanostruturadas. *International Journal of Development Research*, 2022.

⁴ R.Shadakshari , HB Niranjana , H. Pakkappa, Investigação das Propriedades Mecânicas, Condutividade Térmica e Elétrica de Nanocompósitos Al2024 Reforçados com Nanotubos de Carbono de Múltiplas Paredes.. *Materials Today: Proceedings*, 2022.

Fonte: Autor, 2024.

Sendo realizada, também, uma avalia o da quantidade de índices de cita es, palavras-chaves, revistas e livros e fator de impacto documentos selecionados para compor o estudo foram relacionados e são apresentados, vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Avalia o dos documentos selecionados

Referência	Palavras-chaves	índices de Cita�es	Revistas e Livros	Fator de Impacto
Castilho N A. U, 2021	Nanotubos de carbono;sinteriza�o por plasma de faísca (SPS); condutividade elétrica; p�s de alumínio; dureza de amostra	11	Materials 2021, 14(2), 373; https://doi.org/10.3390/ma14020373	s/n
Hari Prasad M., 2022	Compósitos de matriz metálica de alumínio; Resistência � corrosão; Resistência ao desgaste, Condutividade elétrica	2	Materials Today: Proceedings	s/n
Prazeres E. R., 2022	Nanocompósitos de alumínio, nanotubos de carbono de paredes múltiplas, p� de aço inoxidável nanoestruturado	9	International Journal of Development Research	8.0
R. Shadakshari, 2022.	Nanotubos de carbono; Metalurgia do p�; Condutividade elétrica e mecânica	0	Materials Today: Proceedings	s/n

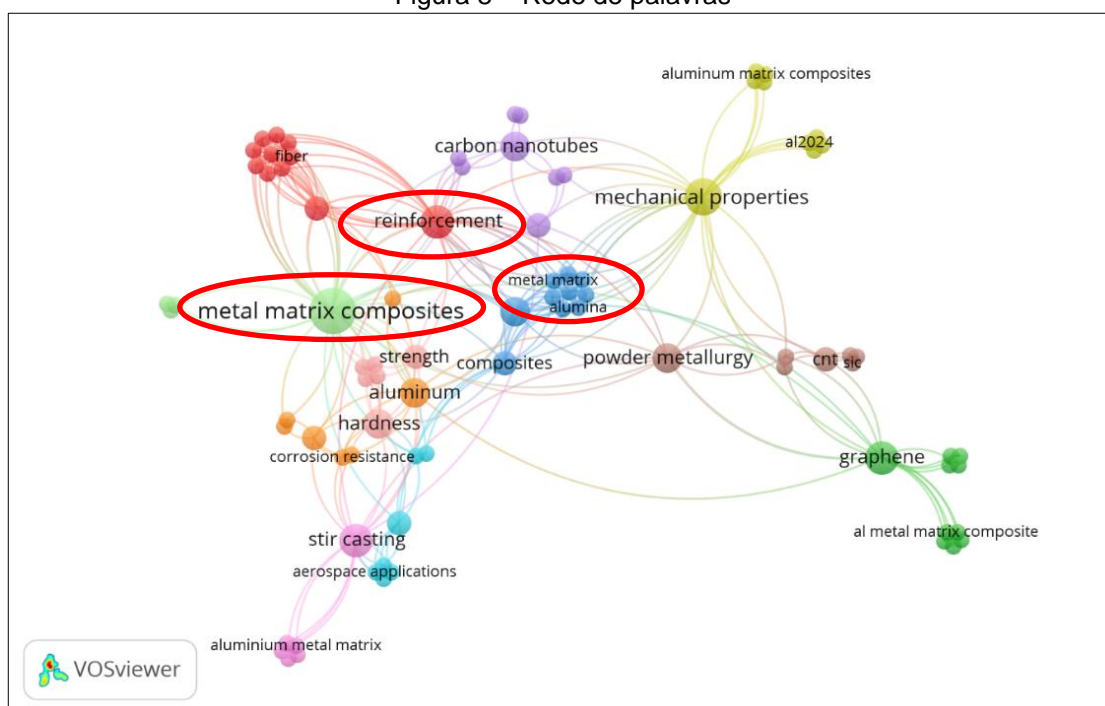
Fonte: Autor, 2024.

A análise de rede, ou network, realizada na pesquisa foi realizada utilizando-se o software *VOSviewer*, baseando-se no mapeamento bibliométrico dos dados nas bases examinadas.

Tal ferramenta presta especial atenção à representação gráfica de mapas bibliométricos, que é um importante tópico de pesquisa no campo da bibliometria. O *VOSviewer* pode ser usado, por exemplo, para construir mapas de autores ou revistas com base em dados de citações ou para construir mapas de palavras-chave com base em dados de coocorrência. O programa oferece, ainda, um visualizador que permite que mapas bibliométricos sejam examinados em detalhes. O software usa a técnica de mapeamento VOS, onde VOS significa visualização de similaridades (*visualization of similarities*), e na construção de mapas baseados em distância, que são mapas em que a distância entre dois itens reflete a força da relação entre eles. Uma distância menor geralmente indica uma relação mais forte (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

Além disso, a partir dos dados da pesquisa foi possível identificar as principais palavras citadas nos artigos selecionados, conforme se pode observar na Figura 8.

Figura 8 – Rede de palavras



Fonte: Dados da Pesquisa, 2024

Observa-se o termo *Metal Matrix Composites* com centro da imagem com apresentando o maior círculo e sendo o núcleo de todas as ligações e muito próximo ao termo *Metal Matrix Alumina*. Como ambos os termos foram escolhidos como critérios de inclusão por ocasião da seleção dos documentos é natural que aparecem em destaque nesta análise. No tocante aos demais termos que se destacaram

podemos ressaltar a presença dos termos *Mechanical Properties*, *Carbon Nanotubes*, *Reinforcement* e *Powder Metallurgy*.

Nesse contexto, a Quadro 3 e a Tabela 5 listam os autores com aspectos importantes como a relevância acadêmica, pois os autores citados nas tabelas são figuras-chave no campo de estudo abordado pela revisão sistemática e a frequência com que são citados indica a influência de seus trabalhos na literatura existente.

Desse modo, a análise conjunta dos dados das Quadro 3 e Tabela 5, juntamente com a Figura 8, oferece uma visão abrangente da produção acadêmica e das tendências de pesquisa dentro do campo estudado, de forma que os autores mais produtivos desempenham um papel crucial na definição dos temas principais e na evolução do conhecimento, enquanto a rede de palavras ajuda a visualizar as inter-relações e identificar possíveis lacunas e novas descobertas para futuras investigações.

Os quatro artigos discutidos fornecem uma visão abrangente sobre o potencial dos nanocompósitos de alumínio reforçados com nanotubos de carbono (NTC), destacando suas propriedades elétricas e os desafios associados à dispersão dos NTC na matriz de alumínio. Cada estudo contribui com informações valiosas para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e com melhores desempenhos em várias aplicações tecnológicas.

Na produção acadêmica, a análise dos desafios associados ao desenvolvimento de compósitos com matriz metálica reforçados por Nanotubos de Carbono (NTC) revela obstáculos significativos, como à preservação da integridade estrutural dos nanotubos durante os processos de fabricação. A complexidade desse desenvolvimento ocorre em métodos que assegurem a dispersão homogênea dos NTC na matriz metálica, evitando sua degradação térmica ou estrutural.

Dentre as abordagens analisadas, destacam-se a metalurgia do pó, a fundição convencional, a sinterização por plasma de faísca (SPS), a extrusão a quente e a pulverização térmica, especialmente em compósitos com matriz de alumínio. No entanto, cada um desses métodos apresenta limitações inerentes. A metalurgia do pó, por exemplo, enfrenta dificuldades na dispersão uniforme dos NTC e na obtenção de interfaces adequadas entre o reforço e a matriz. Já a fundição convencional pode comprometer a integridade dos nanotubos devido às altas temperaturas envolvidas no processo. A sinterização por plasma de faísca, embora eficiente na consolidação do material, exige controle rigoroso dos parâmetros de processamento para evitar

danos estruturais aos NTC. Portanto, a efetividade desses processos ainda depende de avanços técnicos que abrandem as dificuldades na dispersão e preservação dos nanotubos, garantindo, assim, a melhoria das propriedades mecânicas, térmicas e elétricas dos compósitos metálicos reforçados.

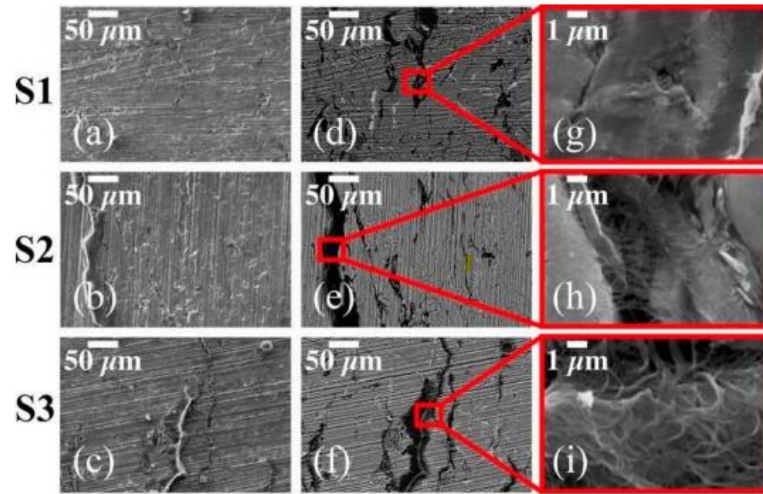
Os nanocompósitos de alumínio demonstram melhorias nas propriedades mecânicas, bem como na condutividade elétrica. A incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas e simples identificaram na matriz de alumínio resultados e medições de condutividade elétrica valores positivos (PRAZERES, 2023).

Omori (2000) discute o processo de sinterização por plasma centelhado (SPS) sendo uma técnica muito eficaz de consolidação de pós compósitos que produz altamente densificados, elimina o crescimento de grãos, melhora a ligação nos contornos de grãos, conserva energia e economiza tempo e custos.

No próximo artigo por Castilho (2021) argumenta que as propriedades de condutividade elétrica dos nanocompósitos à base de alumínio reforçados com concentrações de 0,5% em peso, 1% em peso e 2% em peso de nanotubos de carbono de parede simples e múltiplas se encontra as melhores condições experimentais para aumentar suas propriedades elétricas e análise de dispersão do NTC realizada por mapeamento elementar EDS.

Conforme Castilho (2021), a caracterização da morfologia transversal dos nanocompósitos sinterizados à base de Al com NTCPs (S1, S2 e S3) é apresentada na Figura 9. As micrografias MEV nas Figuras 9a–c mostram a presença de NTCPs entrelaçados, especialmente nas amostras S2 e S3. As micrografias MEV nas Figuras 9d–f confirmam essa observação, detectando uma quantidade menor de aglomerados de NTC na amostra S1. A formação dos aglomerados de NTC é causada pela forte interação de Van der Waals entre os NTCPs, que inibe a desaglomeração adequada durante o processo de moagem. Um close-up desses aglomerados de NTCPs está nas Figuras 9g–i.

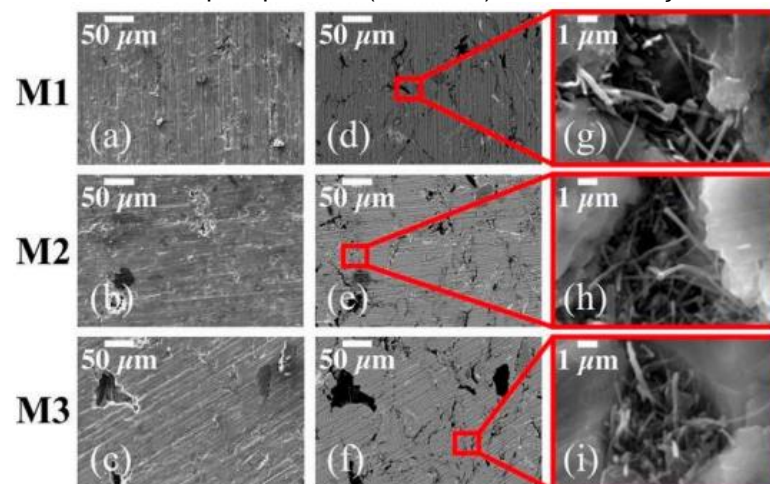
Figura 9 – As micrografias MEV (a-c) e (d-f) mostram nanocompósitos S1, S2 e S3 com clusters de NTCPS. Esses clusters são resultado da forte interação de Van der Waals entre os NTCPS.



Fonte: Castilho, 2021.

As micrografias MEV correspondentes para nanocompósitos sinterizados à base de Al reforçados NTCPMs (M1, M2 e M3) estão apresentadas na Figura 10. As micrografias nas Figuras 10a–c mostram a presença de pequenos microporos, cujo tamanho tende a aumentar com concentrações maiores de NTC em peso. As micrografias MEV nas Figuras 10d–f revelam a existência de pequenos aglomerados de NTCPMs, que parecem estar entrelaçados nas fronteiras de grão da matriz de Al. As Figuras 10g–i fornecem um close-up desses aglomerados de NTCPM. A análise das imagens MEV conclui que, apesar da dispersão uniforme alcançada durante o processo de moagem de alta energia, é difícil evitar a formação de aglomerados devido às forças de Van der Waals existentes nos NTCs não tratados.

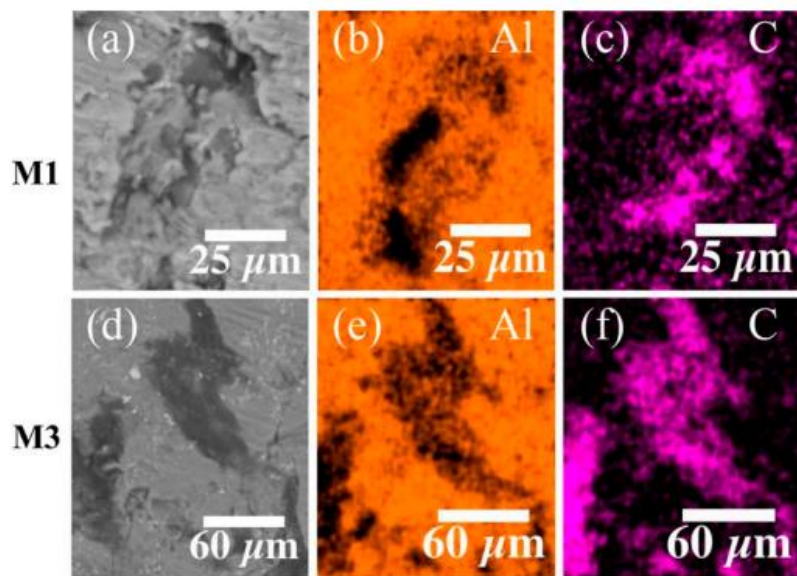
Figura 10 - As micrografias de nanocompósitos sinterizados M1, M2 e M3, reforçados com nanotubos de carbono de múltiplas paredes (NTCPMs) em concentrações de 0,5%, 1% e 2%.



Fonte: Castilho, 2021.

A análise de dispersão de NTC foi realizada por mapeamento elementar EDS-MEV para o conteúdo de Al e C, focando nas amostras reforçadas com NTCPMs. Observou-se que a melhor dispersão de NTCs corresponde às amostras M1 e M3. As imagens EDS estão na Figura 11. A distribuição de NTCs (magenta) na matriz de Al (laranja) é relativamente uniforme, conforme a Figura 11c. Além disso, nota-se que as dimensões dos aglomerados de NTCs aumentam com altas concentrações de NTCs, como mostrado na Figura 11f.

Figura 11 - As micrografias (a,d) e o mapeamento espectroscópico EDS correspondente para Al (b, e) e C (c, f) nas amostras M1 e M3 mostram que a área de aglomerados de NTCPMs aumenta significativamente com concentrações maiores, como observado na amostra M3.



Fonte: Castilho, 2021.

A pesquisa de Castilho (2021) demonstra que a teste de condutividade elétrica e a resistividade elétrica usando o método de quatro fios cuja configuração consistiu em uma fonte de alimentação do sistema DC (Keysight Technologies, Modelo 6553, Zapopan, Jalisco, México), um multímetro Agilent Technologies U3402A (Santa Clara, CA, EUA) e fios de cobres. Na tabela 6 as descrições de todos os pós nanocompósitos moídos em esfera de alta energia.

Tabela 6 – Descrição dos pós nanocompósitos de nanotubos de carbono à base de Al (NTC) moídos em bolas de alta energia.

Amostra	Descrição	Amostra	Descrição
S1	Al+ NTCPS a 0.5% em peso	M1	Al + NTCPM a 0,5% em peso
S2	Al + NTCPS a 1% em peso Al	M2	Al + NTCPM a 1% em peso
S3	Al + NTCPS a 2% em peso	M3	Al + NTCPM a 2% em peso

Fonte: Castillo, 2021.

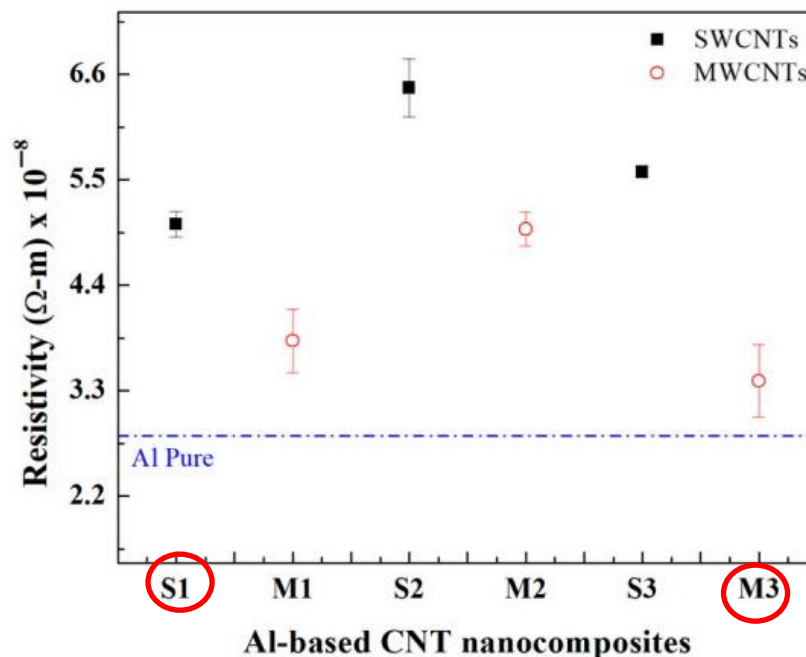
Os valores de resistividade elétrica das amostras, mostrados na Figura 12, foram medidos e comparados. A amostra S1 apresentou uma resistividade menor do que as amostras S2 e S3, indicando que a condutividade elétrica da amostra S1 é maior. Por outro lado, nos nanocompósitos NTCPM sinterizados, a amostra M3 teve uma resistividade menor em comparação com as amostras M1 e M2, o que significa que a condutividade elétrica da amostra M3 é superior às demais. Os resultados da resistividade e condutividade elétrica das amostras estão detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados da resistividade e condutividade elétrica das amostras.

Amostra	Condutividade (S/m)	Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot m$)	Amostra	Condutividade (S/m)	Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot m$)
S1	$1,98 \times 10^7$ S / m	$5,03 \pm 0,13 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$	M1	$2,61 \times 10^7$ S / m	$2,61 \pm 0,32 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$
S2	$1,54 \times 10^7$ S / m	$6,45 \pm 0,30 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$	M2	$2,00 \times 10^7$ S / m	$4,98 \pm 0,17 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$
S3	$1,79 \times 10^7$ S / m	$5,57 \pm 0,05 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$	M3	$2,94 \times 10^7$ S / m	$(3,4 \pm 0,32 \times 10^{-8})$ $\Omega \cdot m$

Fonte: Castillo, 2021.

Figura 12 – Os valores de resistividade elétrica dos nanocompósitos de Al reforçados com NTCPs e NTCPM foram comparados com o valor padrão do alumínio puro, indicado pela linha azul tracejada.



Fonte: Castillo, 2021.

Na Tabela 8 exibe os valores de dados de condutividade elétrica coletados para todas as amostras de nanocompósitos sinterizados, em seus valores equivalentes ao Padrão Internacional de Cobre Recozido (IACS%).

Tabela 8 – Os valores de condutividade elétrica dos nanocompósitos NTC à base de Al, sinterizados por plasma de faísca, foram calculados a partir da resistividade e convertidos para o padrão internacional de cobre recozido (IACS%).

Amostra	Condutividade (S/m)	IACS (%)	Amostra	Condutividade (S/m)	IACS (%)
S1	$1,98 \times 10^7$ S / m	34,2	M1	$2,61 \times 10^7$ S / m	45,1
S2	$1,54 \times 10^7$ S / m	26,7 (↓22%)	M2	$2,00 \times 10^7$ S / m	34,6 (↓23%)
S3	$1,79 \times 10^7$ S / m	30,9 (↓9,6%)	M3	$2,94 \times 10^7$ S / m	50,7 (↑12%)

Fonte: Castillo, 2021.

Os resultados indicam que as amostras S1 e M3 apresentam a melhor condutividade elétrica. Analisando os dados, observamos que a condutividade elétrica dos nanocompósitos é aprimorada com baixas concentrações de NTCPS (em peso) sem tratamentos químicos, o que evita a formação de grandes aglomerações e melhora a dispersão uniforme dos nanotubos nos pós de alumínio. A amostra M3 demonstrou valores de IACS 45,1% e 34,6% superiores aos das amostras M1 e M2, respectivamente. Além disso, o IACS da amostra M3 é aproximadamente 28% superior ao valor reportado por Ujah (2019), que encontrou um valor máximo de 39,88% IACS para alumínio puro reforçado com 8% em peso de nanotubos de carbono e consolidado por sinterização por plasma de faísca. O estudo de Ujah (2019) mostrou uma melhoria marginal de cerca de 2% na condutividade elétrica.

Entretanto, constatou-se que a incorporação de 2% em peso de NTCPM na matriz de alumínio pode elevar a condutividade elétrica do material composto em 3%. Esse aprimoramento da condutividade elétrica é atribuído ao fato de que os NTCPM estão estrategicamente posicionados nas interfaces dos grãos, funcionando como preenchedores e contribuindo de forma positiva para o limiar de percolação elétrica.

De acordo com o estudo selecionado por Hari P. (2022), a incorporação de carbeto de boro (B4C) e nanotubos de carbono (CNT) como reforços, juntamente com selênio (Se) como material composto, resultou em melhorias substanciais nas propriedades do compósito Al6101. Os resultados experimentais indicaram que a adição de B4C e CNT aumentou a dureza, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência à flexão e condutividade elétrica dos compósitos Al6101-Se/B4C/CNT em comparação com a matriz de Al6101 puro. Essas melhorias são essenciais para aplicações em setores exigentes como o marítimo, aeroespacial e automotivo, onde componentes com alta resistência mecânica e durabilidade são cruciais. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um compósito metálico híbrido de

alumínio utilizando o método de fundição por agitação (Stir Casting), visando alcançar alta resistência, resistência à corrosão e condutividade elétrica para a fabricação de peças por eletroerosão (EDM) em diversas aplicações.

Neste trabalho, a liga Al6101 é utilizada como material matriz, sendo o carbeto de boro (B4C) e os nanotubos de carbono (CNT) considerados como materiais de reforço, com proporções fixas de 0,7% e 0,15% em peso, respectivamente, além do selênio (Se) como material de composto, com uma proporção de 0,7% em peso. Amostras compostas de Al6101-Se/B4C/CNT (S1, S2, S3, S4, S5) com cinco combinações diferentes de reforços são preparadas utilizando o processo de fundição por agitação (stir casting). A presença de B4C/CNT na liga fundida aumenta suas propriedades. O pó de Se é adicionado ao metal líquido de Al6101 durante a agitação.

Referente as propriedades elétricas a técnica de dois pontos é utilizada para medir a resistividade com base na geometria da amostra e sua resistência elétrica. A amostra é moldada como uma barra de seção retangular com comprimento, largura e espessura. As extremidades da barra são conectadas com fios de cobre usando a técnica de dois pontos. Uma corrente flui pela barra, enquanto a tensão é aplicada através de uma fonte de voltagem. Na Tabela 9 e Figura 13 exibe os valores de dados de condutividade elétrica coletados para todas as amostras.

Tabela 9 – Valores da Condutividade Elétrica de Compósitos

Número da Amostra	Composição	Resistência (Ω)	Resistividade (Ω -m)	Condutividade Elétrica (s/m)
S1	Al 6101 - 100%	1.8	0.018	56,25
S2	Al 6101 - 98,6% + 0,7% B4C + 0,7% Se	1.1	0.011	81,81
S3	Al 6101 - 99,15% + 0,7% Se + 0,15% CNT	1.6	0.016	60,00
S4	Al 6101 - 99,15% + 0,15 % CNT + 0,7% B4C	1	0.01	90,00
S5	Al 6101 - 98,45% + 0,7% B4C + 0,7% Se + 0,15% CNT	1.1	0.011	81,81

Fonte: Hari, 2022.

O compósito Al6101–99.15% + 0.15% CNT + 0.7% B4C (S4) apresentou maior condutividade elétrica devido à presença de CNT, uma propriedade crucial para aplicações como a fabricação de peças sob EDM (Eletroerosão a Fio). Este estudo válido a eficácia do método de adição de B4C, Se e CNT através do processo de stir casting para melhorar múltiplas propriedades do Al6101, tornando-o uma opção viável para diversas aplicações industriais avançadas.

Figura 13 - Número da amostra versus condutividade elétrica.

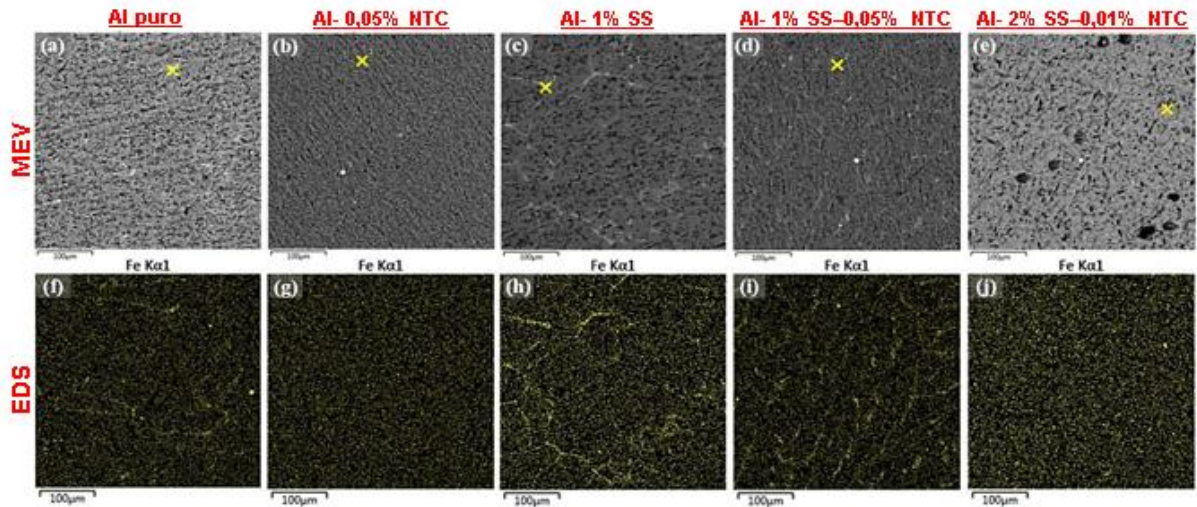


Fonte: Hari, 2022.

Em outro estudo relevante, Prazeres (2022) demonstra melhorias significativas na condutividade elétrica por meio da incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCs) na matriz de alumínio. Os NTCs foram fabricados pelo método de fundição convencional, utilizando pó nanoestruturado de aço inoxidável (SS), e as ligas resultantes foram caracterizadas, revelando que a adição de NTCs aprimorou a microestrutura do alumínio puro, evitando a segregação de ferro (Fe). Além disso, altas concentrações de SS favoreceram a precipitação de elementos, contribuindo para o aprimoramento das propriedades do material (PRAZERES, 2022).

Conforme Prazeres (2022), as ligas obtidas foram caracterizadas microestruturalmente usando MEV com EDS; a condutividade elétrica foi medida eletricamente e mecanicamente por meio de teste de microdureza e resistência à tração. A Figura 14 apresenta as micrografias MEV e o mapeamento EDS do Fe nas diversas ligas. A Figura 14a mostra a microestrutura típica do alumínio puro com baixa impureza de Fe, enquanto a Figura 14f confirma isso. A adição de 0,05% em peso de NTC (Figuras 14b e 14g) modificou a microestrutura, evitando a segregação de ferro nas bordas dos dendritos. No entanto, com a incorporação de 1% em peso de SS, observou-se uma maior precipitação dos elementos da liga no soluto.

Figura 14 – As micrografias e o mapeamento do elemento ferro (Fe) são apresentadas da seguinte forma.

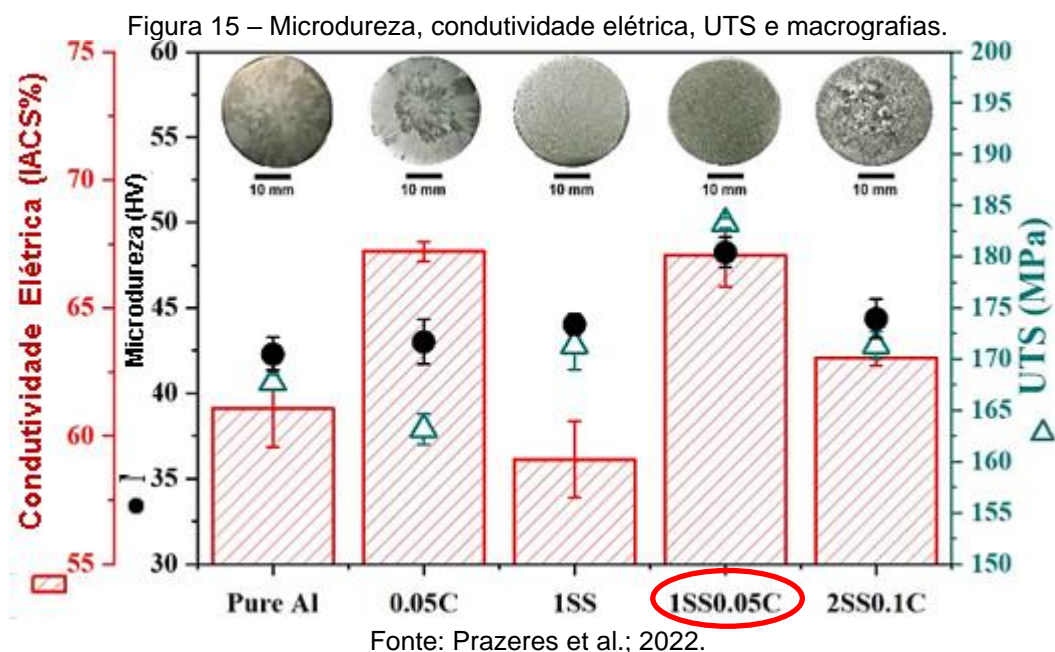


Fonte: Prazeres, 2022.

A adição do pó nanostruturado com 1% em peso de SS e 0,05% em peso de CNT alterou significativamente as microestruturas do alumínio, resultando em grãos alongados e baixa segregação de Fe e outros elementos nas bordas dos dendritos. Esse comportamento pode ser atribuído à combinação da redução do tamanho dos grãos causada pelas partículas de aço inoxidável e à distribuição uniforme dos nanotubos de carbono, que minimiza o movimento atômico. A afinidade do carbono com elementos como Cr e Ni contribui para essa estabilidade microestrutural (PRAZERES, 2022).

Quando a porcentagem de SS aumentou para 2% em peso, junto com 0,1% em peso de CNT, a microestrutura foi notavelmente alterada, mas sem observar segregação. Isso ocorreu porque a temperatura do alumínio líquido não foi suficiente para fundir todas as partículas de SS, levando a uma deterioração das propriedades dessa amostra.

Os resultados obtidos informam os estudos por Prazeres (2022) na Figura 15 apresentando a Resistência à Tração Máxima (UTS), a Microdureza Vickers (HV), a Condutividade Elétrica (EC) e as macrografias das amostras analisadas.

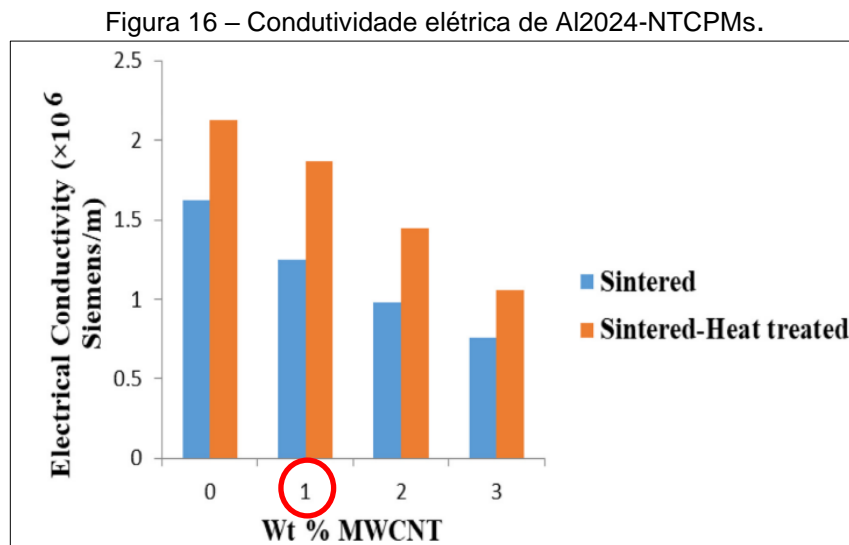


A análise dos dados revela os seguintes pontos principais o comportamento do *Al Puro* exibindo o esperado para suas propriedades, conforme descrito na literatura. O efeito dos *NTC (0,5% em peso)* causou uma redução no UTS devido à formação de aglomerados de *NTC*, que atuam como concentrações de estresse e reduzem a tenacidade. Os *NTCs* flutuaram devido à sua baixa densidade, resultando em uma quantidade limitada na matriz de alumínio e a condutividade elétrica aumentou cerca de 10% em relação ao *Al Puro*, indicando que os *NTCs* trouxeram mudanças positivas nas propriedades da matriz de alumínio.

O comportamento de efeito dos *Pó de SS (1% em peso)* causou um leve aumento no UTS devido à redução das tensões residuais na matriz, mas resultou em uma redução de 5% na condutividade elétrica. O desempenho da amostra *1SS0,05C* apresentou melhorias significativas em todas as propriedades avaliadas (UTS, deformação, tenacidade, microdureza e EC), com um aumento de cerca de 10% em cada uma. O tratamento químico dos nanotubos e sua aderência ao pó de *SS* foram eficazes na manutenção do efeito de reforço dos elementos de liga na matriz de alumínio.

De acordo com o artigo por R. Shadakshari (2022), a pesquisa nanocompósitos de liga *Al2024* reforçados com nanotubos de carbono de parede múltipla (*NTCPMs*) foram desenvolvidos através da técnica de metalurgia do pó. Diferentes concentrações de *NTCPMs* (1%, 2% e 3% em peso) foram misturadas em um moinho de bolas planetário. Posteriormente, a mistura foi compactada, sinterizada e tratada

termicamente para avaliação de diversas propriedades sendo observado uma diminuição na condutividade elétrica com o aumento da quantidade de NTCPMs, reduzindo de 55,88% para 45,45% no compósito sinterizado e sinterizado-tratado termicamente durante o tratamento térmico, o aumento da temperatura faz com que os poros fiquem preenchidos e reduz as imperfeições durante o processo de sinterização. Na Figura 16 mostra condutividade elétrica de Al2024-NTCPMs de amostras sinterizadas e sinterizadas tratadas termicamente.

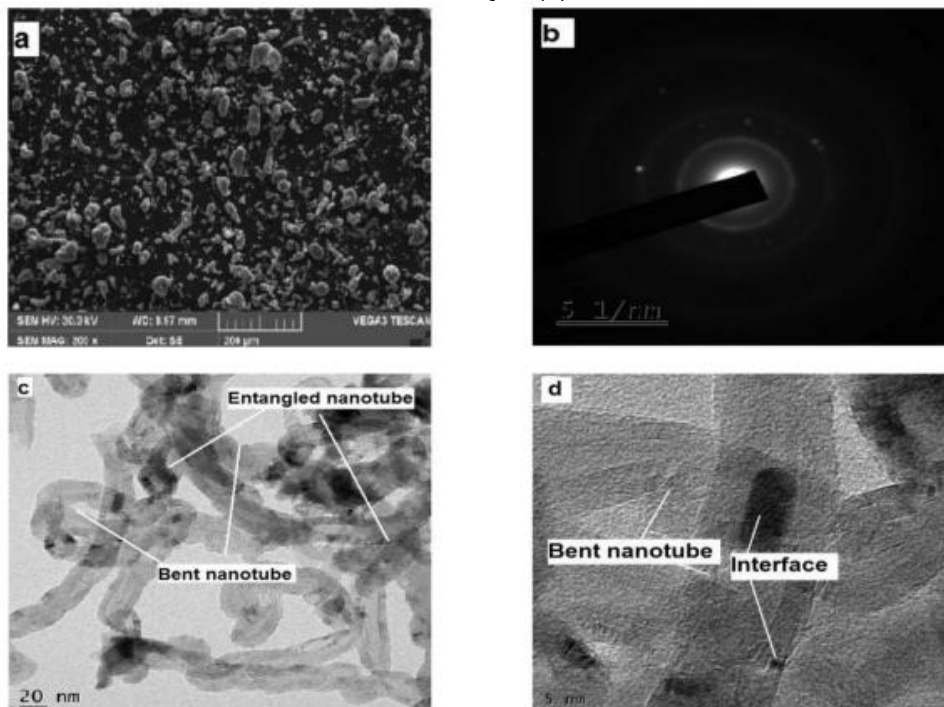


Fonte: R. Shadakshari, 2022.

Conforme os estudos por R. Shadakshari (2022), a tendência de diminuição na condutividade elétrica foi observada ao aumentar a quantidade de NTCPM de 55,88% para 45,45% em compósitos sinterizados e sinterizados e tratados termicamente. No compósito, a interface entre NTCPM causa dispersão significativa de elétrons, o que inibe a condutividade elétrica ao longo da direção do diâmetro dos NTCPM. A diminuição na condutividade elétrica pode ser atribuída a vários fatores: a dispersão de elétrons na interface NTCPM-AI, o transporte de elétrons através dos NTCPM e mudanças microestruturais na matriz devido à dispersão dos NTCPM. Além disso, a disposição aleatória dos NTCPM pode afetar o transporte eficaz de elétrons, levando a uma menor condutividade elétrica com o aumento dos NTCPM. O nanocompósito de Al2024 reforçado com NTCPM foi fabricado através da metalurgia do pó, resultando em melhorias significativas nas propriedades físico-mecânicas em comparação com a matriz base de Al2024.

As micrografias MEV e TEM do nanocompósito são apresentadas na Figura 17, com a micrografia MEV após moagem a seco. O padrão de difração de energia seletiva (SAED) do Al2024 reforçado com 2% em peso de NTCPMs, mostrado na Figura 17b, indica a formação de fases do compósito nanostruturado. As imagens de TEM (Figura 17c) revelam que os NTCPMs estão bem dispersos na matriz de Al2024, com nanotubos entrelaçados e dobrados, destacando a rigidez e a natureza de interface dos nanotubos.

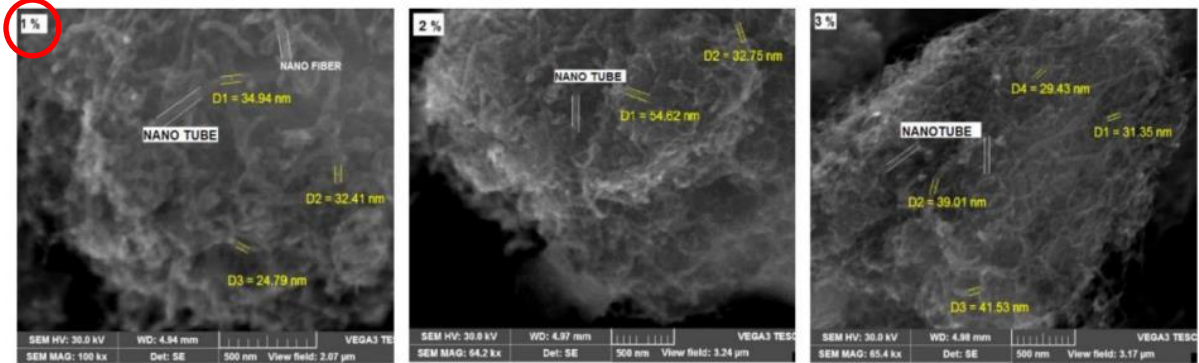
Figura 17 – As imagens MEV (a) e MET (b) mostram o Al2024 com pó de NTCPM, evidenciando o estado disperso dos nanotubos (c) e sua configuração dobrada e interfacial após moagem de bolas e sinterização (d).



Fonte: R. Shadakshari, 2022.

No artigo a análise das propriedades dos nanotubos no compósito foi realizada com micrografias MEV mostradas na Figura 18. Os tamanhos dos nanotubos variam de 24,79 nm a 54,62 nm, facilitando o processo de mistura para uma dispersão uniforme de NTCPMs na matriz. O uso de NTCs com diâmetro menor que 50 nm é significativo para o fortalecimento e endurecimento do nanocompósitos.

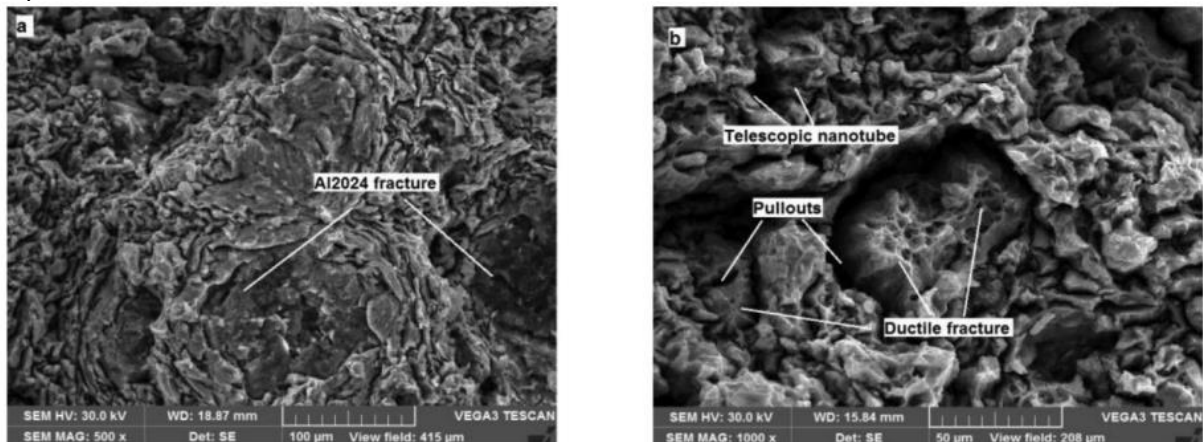
Figura 18 – Perfil MEV do pó Al2024 + NTCPMs em porcentagem de peso de 1%, 2% e 3%.



Fonte: R. Shadakshari, 2022.

A análise do perfil do compósito tratado termicamente sinterizado é apresentada na Figura 19a e b, mostrando a fratura do NTCPMs + Al2024. Após envelhecimento, foram observadas as presenças de Al₄C₃, Al-Cu e NTCs, provavelmente devido à interação dos elementos na liga e às reações durante o tratamento térmico. A micrografia da fratura do compósito Al2024 + 1% de NTCPMs ilustra a resistência dos nanotubos (Figura 19b), demonstrando deformação por compressão e formação de necking, característico de fraturas dúcteis. A falha do material sob força aplicada é atribuída ao descolamento da matriz e à quebra dos nanotubos, que ocorrem na forma de um manto telescópico. Os nanotubos dobrados (Figura 19b) contribuem para o aumento do módulo de Young durante a carga de tração aplicada, apresentando rigidez.

Figura 19 - Imagem MEV de (a) fratura por tração do Al2024 com falha do cone-copo, (b) superfície sinterizada tratada termicamente com fratura de 1% de MWCNT.



Fonte: R. Shadakshari, 2022.

Este estudo investigou a microestrutura e as propriedades mecânicas de um nanocompósito de Al2024 reforçado com NTCPMs. A análise MEV e MET permite

entender a dispersão e a interação dos nanotubos na matriz metálica, essenciais para melhorar as propriedades mecânicas, como resistência e rigidez. A formação de novas fases durante o tratamento térmico e o comportamento de fratura do compósito fornecem insights valiosos para o desenvolvimento de materiais avançados com desempenho superior em aplicações estruturais.

Ao longo deste estudo, a combinação dos resultados sugere que a dispersão uniforme dos NTCs é crucial para otimizar as propriedades dos nanocompósitos. Observou-se melhoria significativa nas propriedades físico-mecânicas nos compósitos de Al2024 e Al6101 com a adição de NTCs, embora o impacto varie com a técnica de fabricação e as proporções utilizadas. As variações nas proporções de NTCs mostraram impactos distintos na condutividade elétrica e outras propriedades do material compósito. Por exemplo, concentrações menores podem ser mais eficazes para evitar aglomeração e melhorar a dispersão nos compósitos.

A relevância dos artigos oferece uma base sólida para a compreensão dos desafios e oportunidades na engenharia de nanocompósitos de alumínio com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPMs). Juntos, eles sublinham a importância da escolha adequada de NTCs, métodos de dispersão eficazes e a exploração de aditivos complementares para alcançar um equilíbrio entre propriedades elétricas e mecânicas, o que é crucial para o desenvolvimento de materiais de alto desempenho. Este estudo investiga a morfologia de nanocompósitos de Al reforçados com NTCPMs, destacando a influência da concentração de NTCs na formação de microporos e aglomerados. A análise MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) é crucial para entender como as interações intermoleculares afetam a dispersão e a estrutura dos nanocompósitos, o que tem implicações significativas para suas propriedades mecânicas e funcionais, como resistência à tração, dureza e condutividade elétrica.

Em suma, enquanto os nanotubos de carbono oferecem melhorias nas propriedades físico-mecânicas e elétricas dos compósitos de alumínio, sua eficácia varia com fatores como a técnica de fabricação, a dispersão dos nanotubos na matriz e as proporções utilizadas. Estes materiais compósitos são promissores para aplicações industriais avançadas onde a melhoria da condutividade elétrica e outras propriedades são essenciais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A nanotecnologia, especialmente o uso de nanotubos de carbono (NTC) em matrizes de alumínio, revela-se uma área promissora na Engenharia de Materiais, com potencial para revolucionar setores como a indústria automotiva, aeronáutica, elétrica e eletrônica. Este estudo, realizado por meio de uma revisão sistemática fundamentada na recomendação Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), teve como objetivo analisar a melhoria das propriedades elétricas condutoras do alumínio com a adição de nanotubos de carbono (NTCs). Foram selecionados quatro artigos publicados em inglês que atenderam aos critérios de elegibilidade estabelecidos, os quais abordam aspectos fundamentais para otimizar a condutividade elétrica desse material compósito.

Os resultados, no estudo de Prazeres (2022) destaca-se que a amostra 1SS0,05C apresentou melhorias significativas em todas as propriedades avaliadas (UTS, deformação, tenacidade, microdureza e EC), com um aumento médio de 10%. Visto o tratamento químico dos nanotubos e sua aderência ao Pó de SS foram eficazes na manutenção do efeito de reforço dos elementos de liga na matriz de alumínio. Contudo, ainda atribuindo desafios devido à interferência na estrutura cristalina do alumínio, gerando impedimentos ao movimento dos elétrons e, logo, aumentando a resistividade elétrica. Esse efeito pode reduzir a aplicação da liga em setores onde a alta condutividade elétrica é essencial, como em cabos condutores desde energia.

Para termos melhoras na eficiência energética do material condutor deve estar diretamente ligada à sua capacidade de minimizar perdas, para isto as concentrações ideais tragam a redução da resistividade e melhorando a eficácia em aplicações elétricas, como cabos condutores e componentes eletrônicos.

Na revisão aponta que a dispersão inadequada dos NTCs pode gerar aglomerados, comprometendo tanto a condutividade elétrica quanto a resistência mecânica. Além disso, a interação interfacial entre os NTCs e a matriz de alumínio é um fator crítico para garantir a estabilidade estrutural e o desempenho elétrico do material. Observando também que os métodos de processamento influenciam significativamente na distribuição dos NTCs e, conseqüentemente, no procedimento final da liga.

Portanto, pesquisas futuras devem aplicar a otimização das técnicas de incorporação, no desenvolvimento de novos métodos de fabricação que favoreçam a dispersão homogênea e na avaliação da estabilidade térmica e elétrica desses compósitos ao longo do tempo, garantindo sua viabilidade para aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

- ABDO, Hany; ASIFUL H. Seikh; JABAIR Ali Mohammed and MAHMOUD S. Soliman. **Effects of Alloying Elements on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Newly Manufactured Al-Based Alloys Produced by Conventional Casting Process**. *Materials*, 2021, 14, 3971. <https://doi.org/10.3390/ma14143971>.
- ALLAMKI, Alyaqadhan; MAJID Al-Maharbi; SAYYAD Zahid Qamar; FAROOQ Al-Jahwari. **Endurecimento por precipitação do condutor elétrico Liga de alumínio 6201**. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/6/1111>. Acesso em: 25 nov. 2023.
- AMARAL, Marcelo Batista; FERREIRA, Evaldo Antônio. **Sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica e sua integração ao projeto de edificações civis**. 2020. Disponível em: <https://www.unipac.br/barbacena/wp-content/uploads/sites/2/2023/09/ENG-CIVIL-Os-impactos-tecnico-economicos-e-ambientais-dos-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-integrados-ao-projeto.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- ANTUNES FILHO, Sérgio; BACKX, Bianca Pizzorno. **Nanotecnologia e seus impactos na sociedade**. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 40, 2020. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/rts/article/view/9870>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- AZARNIYA, A. et al. **Metallurgical Challenges in Carbon Nanotube-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites**. *Metals*, v. 7, n. 10, p. 384, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met7100384>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- BATISTA, Luana Araújo. **Desenvolvimento de compósitos de nanotubos de carbono com matrizes metálicas de alumínio e a liga AA7050**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2022.
- BAKSHI, S. R., Lahiri, D., & Agarwal, A. (2010). **Carbon nanotube reinforced metal matrix composites – a review**. *International Materials Reviews*, 55(1), 41-64.
- CASTILLO N A. U., Romero O M., Maya R H., Cárdebas E S., Zuniga A E., **Spark Plasma Sintering of Aluminum-Based Powders Reinforced with Carbon Nanotubes: Investigation of Electrical Conductivity and Hardness Properties**. *Materials*, 2021.
- CARNEIRO I., E SIMÕES S., **Mecanismos de Fortalecimento em Compósitos de Matriz Metálica Reforçada com Nanotubos de Carbono: Uma Revisão**, *Metals* 2021, 11 (10), 1613; <https://doi.org/10.3390/met11101613>.
- CORAZZA, Marcela Z. et al. **Avaliação de nanotubos de carbono funcionalizados visando o desenvolvimento de métodos de pré-concentração de íons metálicos e determinação por técnicas espectrométricas e eletroanalíticas**. *Revista Química Nova*, v. 43, n. 8, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/nvd9JtgTCQWZRGF8VgfKtDh/?lang=pt#>. Acesso em: 28 nov. 2023.

ESAWI, A. M. K., & Morsi, K. (2007). **Dispersion of carbon nanotubes (CNTs) in aluminum powder.** *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2), 646-650.

GEHR, R. J.; BOYD, R. W. **Optical Properties of Nanostructured Optical Materials.** *Chemistry of Materials*, v. 8, p. 1807-1819, 1996.

GOGOTSI, Yury. **Carbon Nanomaterials.** 2006, pp. 22. <https://docs.google.com/file/d/0BzKqmUB2pcRBMzh5ZHd4VkpueUK/edit?pli=1&resourcekey=0-U54FqnNcwbWdRghhIxEEbQ>.

GODDARIII, W.A.; Brenner, D. W.; Lyshevski, S. E.; Lafrate, G. J. **Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, Second Edition.** CRC Press. London: New York, 2007, pp. 21-49.

HAGEMAIER, Dj. **Avaliação de danos térmicos em estruturas de alumínio de aeronaves.** *Matéria. Avaliação.* 1982, 40, 942–969.

Hari Prasad M., Venkata Ramaiah P, **Fabrication and characterization of Aluminum 6101- Selenium/boron carbide /carbon nanotubes metal matrix nano composites.** *Materials Today: Proceedings*, 2022.

HERBST, M. H.; Macedo, M. I. F.; Rocco, A. M. **Tecnologia dos nanotubos de Carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar.** *Química Nova*, v. 27, n. 6, p. 986-992, 2004.

JP Hou, R. Li, Q. Wang, Hy Yu, Zj Zhang, Qy Chen, H. Ma, Xm Wu, Xw Li, Zf Zhang. *J. Ligas Compd.* 2018, 769, 96.

KREMER, Ingrido dos Santos et al. **Uma Síntese de Nanotecnologia Aplicada à Eletrônica.** *Revista Ciência e Natura. Edição Especial*, v. 42, p. 44-44, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/e25-40594/html>. Acesso em: 28 nov. 2023.

KOPROWSKI P., M. Lech-Grega; L. Wodziński; B. Augustin; S. Boczekal; M. Ożóg; P. Uliasz; J. Żelechowski E W. Szymański. **Efeito de aditivos de baixo teor na resistência, resistividade e mudanças microestruturais na trefilação de ligas de alumínio da série 1xxx para fins elétricos,** 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101039>. Acesso em: 24 nov. 2024.

LAHA, T., Agarwal, A., McKechnie, T., & Seal, S. (2009). **Synthesis and characterization of plasma-sprayed carbon nanotube reinforced aluminum composite coating.** *Surface and Coatings Technology*, 203(16), 3210-3219.

MAI, Y. Z.; Yu, C. **Polymer Nanocomposites.** 2006, pp. 359-362.

OMORI, M. S. **Sintering, Consolidation, Reaction and Crystal Growth by the Spark Plasma System (SPS).** *Mater. Sci. Eng. A*, v. 287, p. 183–188, 2000.

PAIVA, M. C.; Mano, J. F. **Carbon**, n. 42(14), 2008.

PÉREZ-Arriaga, I. J.; Rudnick, H.; Abbad, M. R. **Sistema de Energia Elétrica: Uma Visão Geral**. In: GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C. *Sistemas de Energia Elétrica: Análise e Operação*. Trad. rev. Antônio Padilha Feltrin, José Roberto Sanches Montovani, Ruben Romero. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

PRAZERES, Emerson Rodrigues. **Desenvolvimento de ligas de alumínio nanoestruturadas para a utilização em cabos elétricos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/15633>. Acesso em: 26 nov. 2024.

PRAZERES E. R. Loayza C. R. L., Reis V.S., Melo V. L., Quaresma J. M. V. et al. **Simultaneous Improvement of the Electric Conductive and Mechanical Properties of Nanostructured Aluminum Alloy**. *International Journal of Development Research*, 2022.

Q. ZHAO, X.; Cui, Z.; Qian, X.; Liu, J. *J. Ligas Comp.* 2015, 639, 478.
R.Shadakshari , HB Niranjana , H. Pakkappa, **Investigation of mechanical properties, thermal and electrical conductivity of multi-walled carbon nanotubes reinforced with Al2024 nanocomposites**. *Materials Today: Proceedings*, 2022.

RODRIGUES, Fabrício Augusto dos Santos. **Eletrodeposição e caracterização de revestimento de cobre/nanotubos de carbono dopados com iodo em fios de alumínio liga 1350**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16056>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ROTKIN, S. V.; Subramoney, S. **Applied Physics of Carbon Nanotubes: Fundamentals of Theory, Optics, and Transport Devices**. Springer, 2005, pp. 151-155.

SAIO, S.; Zettl, A. **Carbon Nanotubes, Quantum Cylinders of Graphene**. Elsevier, 2008, pp. 16-17.

SIMÕES, S.; Viana, F.; Reis, M. A. L.; Vieira, M. F. G. **Influence of Dispersion/Mixture Time on Mechanical Properties of Al-CNTs Nanocomposites**. *Composite Structures*, n. 126, pp. 114-122, 2015.

TERRONES, Mauricio. **Science and Technology of the Twenty-First Century: Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes**. *Annual Review of Materials Research*, v. 33, n. 1, p. 419-501, 2003.

S. KOCH, H.; Antrekowitsch, B.; Berg-Huettenmaenn. **Monatsh.** 2007, 152, 62.

UJAH, C. O.; Popoola, A. P. I.; Popoola, O. M.; Aigbodion, V. S. **Enhanced Tribology, Thermal and Electrical Properties of Al-CNT Composite Processed via Spark**

Plasma Sintering for Transmission Conductor. *J. Mater. Sci.*, v. 54, p. 14064-14073, 2019.

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.

X. Cui, Y.; Wu, X.; Liu, Q.; Zhao, G.; Zhang, X. *Matéria*, 2015, 86, 397.9

Y. Yang, J. Nie, Q. Mao, Y. Zhao. **Resultados Físicos.** 2019, 13, 102236.

Y. Zhang, F. Wei, J. Mao, G. Niu. *Matéria. Personagem.* 2019, 158, 109963.

Y. WANG, L. ZHU, G. NIU, PROF. J. MAO, Faculdade de Ciência e Engenharia de Materiais Universidade de Sichuan Chengdu, China. 2021.

YANG, X. et al. **Effect of carbon nanotube (CNT) content on the properties of in-situ synthesis CNT reinforced Al composites.** *Materials Science & Engineering A*, v. 660, p. 11–18, 2016.