



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE MATERIAIS

GISELE PAIVA CAVALCANTI

**OTIMIZAÇÃO DA BLINDAGEM CONTRA INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA USANDO MEMBRANAS POROSAS DE POLICARBONATO
CONTENDO NANOFIOS DE NÍQUEL E COBALTO.**

RECIFE

2025

GISELE PAIVA CAVALCANTI

**OTIMIZAÇÃO DA BLINDAGEM CONTRA INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA USANDO MEMBRANAS POROSAS DE POLICARBONATO
CONTENDO NANOFIOS DE NÍQUEL E COBALTO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Pós Graduação em Ciências de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência de Materiais.

Área de concentração: Materiais não metálicos.

Orientador (a): Prof Dr. Eduardo Padrón Hernández

Orientador externo: Prof Dr. Samuel Jônatas de Castro Lopes

Coorientador (a): Prof Dr. André Galembeck

RECIFE

2025

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Cavalcanti, Gisele Paiva.

Otimização da blindagem contra interferência eletromagnética usando membranas porosas de polycarbonato contendo nanofios de níquel e cobalto / Gisele Paiva Cavalcanti. - Recife, 2025.
68f.: il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais.

Orientação: Eduardo Padrón Hernández.

Coorientação: Samuel Jônatas de Castro Lopes.

Coorientação: André Galembeck.

1. Nanofios metálicos; 2. Eletrodeposição; 3. Blindagem eletromagnética. I. Hernández, Eduardo Padrón. II. Lopes, Samuel Jônatas de Castro. III. Galembeck, André. IV. Título.

UFPE-Biblioteca Central

GISELE PAIVA CAVALCANTI


**OTIMIZAÇÃO DA BLINDAGEM CONTRA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA
USANDO MEMBRANAS POROSAS DE POLICARBONATO CONTENDO
NANOFIOS DE NÍQUEL E COBALTO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Pós Graduação em Ciências de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência de Materiais.


Área de concentração: Materiais não metálicos.

Aprovado em: 30/ 06/ 2025.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO PADRON HERNANDEZ**
Data: 01/07/2025 05:56:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profº. Drº. Eduardo Padrón Hernández (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **LILIAN KASSIA CAVALCANTE DA SILVA DE ASSIS**
Data: 03/07/2025 11:38:50-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profª. Drª. Lilian Kássia Cavalcante da Silva de Assis (Examinadora Interna)
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **EMANOEL LAURERTAN TAVARES FRANCA**
Data: 01/07/2025 17:26:32-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Drº. Emanuel Laurertan Tavares França (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

A Deus, pela luz que guia meus passos e pela força que me sustenta em todas as jornadas. Aos meus pais, Norma Alves e Severino Paiva, pelo exemplo de trabalho, dedicação e princípios que moldaram meu caráter. Ao meu esposo, Marcelo Campos, pelo apoio constante e pela paciência em todos os momentos. À minha filha, Ana Marcela Paiva Campos, fonte de inspiração diária e razão do meu esforço contínuo. Que esta conquista seja um exemplo de que, com dedicação e coragem, tudo é possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho e me fortalecer em cada etapa desta trajetória. Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Norma Alves e Severino Paiva, pelo amor, apoio e valores que sempre me transmitiram. Ao meu esposo, Marcelo Campos, por sua presença constante, incentivo e compreensão ao longo deste percurso. E à minha filha, Ana Marcela, pela motivação e alegria que me inspira todos os dias. Agradeço ao meu orientador, Prof. Eduardo Padrón Hernández, pela orientação, confiança e oportunidade de integrar o grupo de pesquisa MESOMAG, onde adquiri valiosos conhecimentos. Também sou grata ao meu orientador externo Samuel Jônatas de Castro Lopes, pelo suporte desde o primeiro dia no laboratório até a conclusão deste trabalho. A Universidade Federal de Pernambuco e o Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais merecem meu reconhecimento pelas oportunidades concedidas. A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Esta pesquisa investigou a aplicação de nanofios metálicos eletrodepositados em membranas de polycarbonato para blindagem contra interferência eletromagnética (EMI). Dois tipos de amostras foram produzidas: uma com nanofios de níquel e outra com nanofios de cobalto, ambos depositados em membranas porosas de polycarbonato. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou comprimentos médios de $10,19 \pm 0,21 \mu\text{m}$ para os nanofios de níquel e $5,82 \pm 0,41 \mu\text{m}$ para os de cobalto. A difração de raios-X (DRX) mostrou estrutura cristalina cúbica de face centrada para os nanofios de níquel e estrutura hexagonal compacta para os de cobalto. As análises de ressonância ferromagnética (FMR) indicaram anisotropia magnética acentuada nos fios de níquel, atribuída à sua maior razão comprimento/diâmetro. Os nanofios de cobalto, por apresentarem comprimento menor, demonstraram menor anisotropia, refletida em alterações menos intensas no espectro de FMR. As curvas de magnetização permitiram determinar a razão de quadratura (M_R/M_S) e a coercividade (H_C). Os nanofios de níquel apresentaram $M_R/M_S = 0,10$ e $H_C = 158 \text{ Oe}$, enquanto os de cobalto mostraram $M_R/M_S = 0,16$ e $H_C = 429 \text{ Oe}$, indicando características de magnetismo mole em ambas as amostras. Testes de blindagem eletromagnética foram realizados na faixa de 8 a 12 GHz. As membranas com nanofios de níquel sem deformação apresentaram atenuação de 28,7 dB, enquanto aquelas submetidas a 50 ciclos de dobra atingiram 15,2 dB. A redução de desempenho está associada à degradação da estrutura dos nanofios com o dobramento. Um comportamento similar foi observado para os nanofios de cobalto, com melhor desempenho nas membranas não deformadas, especialmente em frequências mais baixas. Os resultados evidenciam o potencial dos nanofios metálicos, especialmente os de níquel, como materiais promissores para blindagem eletromagnética em dispositivos flexíveis, unindo eficácia de atenuação e viabilidade mecânica.

Palavras-chave: nanofios metálicos, eletrodeposição, blindagem eletromagnética.

ABSTRACT

This research investigated the application of electrodeposited metallic nanowires in polycarbonate membranes for electromagnetic interference (EMI) shielding. Two samples were produced: one containing nickel nanowires and the other cobalt nanowires, both embedded in porous polycarbonate membranes. Scanning electron microscopy (SEM) revealed average lengths of $10.19 \pm 0.21 \mu\text{m}$ for the nickel nanowires and $5.82 \pm 0.41 \mu\text{m}$ for the cobalt nanowires. X-ray diffraction (XRD) analysis showed a face-centered cubic crystalline structure for the nickel nanowires and a compact hexagonal structure for the cobalt nanowires. Ferromagnetic resonance (FMR) analyses indicated pronounced magnetic anisotropy in the nickel wires, attributed to their higher length-to-diameter ratio. The cobalt nanowires, having shorter lengths, exhibited lower anisotropy, as reflected by less intense changes in the FMR spectrum. Magnetization curves allowed for the determination of the squareness ratio (M_R/M_S) and coercivity (H_C). The nickel nanowires exhibited $M_R/M_S = 0.10$ and $H_C = 158 \text{ Oe}$, while the cobalt nanowires showed $M_R/M_S = 0.16$ and $H_C = 429 \text{ Oe}$, indicating soft magnetic behavior in both samples. EMI shielding tests were conducted in the frequency range of 8 to 12 GHz. The undeformed membranes with nickel nanowires showed an attenuation of 28.7 dB, whereas those subjected to 50 bending cycles reached 15.2 dB. The reduction in performance is attributed to the structural degradation of the nanowires caused by repeated bending. A similar behavior was observed for the cobalt nanowires, with superior shielding performance in the undeformed membranes, especially at lower frequencies. The results highlight the potential of metallic nanowires, particularly nickel nanowires, as promising materials for electromagnetic shielding in flexible devices, combining attenuation effectiveness with mechanical viability.

Keywords: metallic nanowires, electrodeposition, electromagnetic shielding

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Curvas de histerese magnética de nanofios de FeCo e FeNi eletrodepositados em membranas de policarbonato. (a) Nanofios de FeCo depositados a -1,0 V com campo aplicado paralelo e perpendicular ao plano da membrana. (b) Nanofios de FeNi depositados a -1,6 V com campo aplicado nas mesmas orientações. Os resultados evidenciam anisotropia magnética com predominância na orientação paralela ao eixo dos nanofios.	24
Figura 2 –	Esquema dos mecanismos de blindagem eletromagnética: reflexão, absorção e reflexão múltiplas	30
Figura 3 –	Imagens de MEV e mapeamento por EDS da seção transversal da membrana porosa de policarbonato contendo os nanofios metálicos. a) e b) nanofios de níquel c) e d) nanofios de cobalto.	49
Figura 4 –	Histograma para estimar o comprimento dos nanofios metálicos. a) Fios de níquel e b) Fios de cobalto.	50
Figura 5 –	Padrões de difração de raios-X para nanofios metálicos eletrodepositados dentro de membranas porosas de policarbonato.	52
Figura 6 –	Espectros de ressonância ferromagnética para fios de níquel a) ($\theta_H = 0^\circ$), b) ($\theta_H = 90^\circ$), e para fios de cobalto c) ($\theta_H = 0^\circ$) e d) ($\theta_H = 90^\circ$). Para $\theta_H = 0^\circ$ o campo magnético externo aplicado está paralelo ao eixo dos fios, enquanto para $\theta_H = 90^\circ$ está perpendicular	57
Figura 7 –	Medidas de magnetização versus campo para a) fios de níquel e b) fios de cobalto. As medidas foram realizadas com a aplicação do campo magnético externo paralelo ao eixo dos fios ($\theta_H = 0^\circ$). A inserção das figuras possibilita a estimativa do campo coercitivo e da remanência.	58
Figura 8 –	Valores de blindagem eletromagnética em função da frequência para a) nanofios de níquel e b) nanofios de cobalto. Pontos em preto e vermelho representam a membrana sem deformação e dobrada 50 vezes, respectivamen	61

Figura 9– Valor médio de EMI SE_T , SE_R e SEA para a) nanofios de níquel e b) nanofios de cobalto. 62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAO	Anodic Aluminum Oxide (Óxido de Alumínio Anódico)
AFM	Atomic Force Microscopy (Microscopia de Força Atômica)
BSE	Elétrons retrospelhados
Co	Cobalto
CoNi	Liga de Cobalto-Níquel
CNT	Carbon Nanotube (Nanotubo de Carbono)
CVD	Chemical Vapor Deposition (Deposição Química de Vapor)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectroscopia eletrônica de varredura
EMI	Interferência eletromagnética
FEG	Field Emission Gun (Canhão de Emissão de Campo)
FMR	Ressonância ferromagnética
GMR	<i>Giant Magnetoresistance</i> (Magnetorresistência Gigante)
H _c	Coercividade
HF	High Frequency (Alta Frequência)
HRTEM	High-Resolution Transmission Electron Microscopy
I/I_0	Intensidade Transmitida / Intensidade Incidente
LLG	Landau–Lifshitz–Gilbert (Equação de Dinâmica Magnética)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPCS	Membranas de policarbonato
MR	Magnetorresistência
M _s	Magnetização de Saturação
Ni	Níquel
NiCu	Liga de Níquel-Cobre
NWs	Nanowires (Nanofios)
SE _T	Blindagem eletromagnética total
SE _R	Blindagem eletromagnética da reflexão
SE _A	Blindagem eletromagnética da absorção
VNA	Analizador de rede vetorial
VSM	Magnetometria da amostra vibrante

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Reflexão
T	Transmissão
A	Absorção
θ_H	Direção do campo magnético estático
L	Comprimento
D	Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	17
2.1	MEMBRANAS POROSAS	17
2.1.1	Membrana de alumina	18
2.1.2	Membrana de policarbonato	22
2.2	MECANISMO DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA	26
2.3	PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS E MAGNETICAS DOS NANOFIOS	32
2.4	A IMPORTÂNCIA DA SELEÇÃO DE MATERIAIS NA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA	34
2.5	MODELAGEM MICROMAGNÉTICA E SIMULAÇÃO NÚMERICA APLICADAS À RESSONÂNCIA FERROMAGNÉTICA (FMR)	37
2.6	TEORIA POR TRÁS DA RESSONÂNCIA FERROMAGNÉTICA EM NANOFIOS	39
2.7	IMPORTÂNCIA DA APLICAÇÃO DA CAMADA DE OURO NA ELETRODEPOSIÇÃO	40
3	METOLOGIA EXPERIMENTAL	43
3.1	PREPARAÇÃO DE MEMBRANAS POROSAS	43
3.2	PREPARAÇÃO DO ELETRÓLITO	43
3.3	ELETRODEPOSIÇÃO DOS NANOFIOS	43
3.4	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA ESTRUTURAL	44
3.4.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS	44
3.4.2	Difração de raios X	44
3.5	CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA	45
3.5.1	Ressonância ferromagnética	45
3.5.2	Magnetometria da amostra vibrante	45
3.6	MEDIDA DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47

4.1	ANALISE MORFOLÓGICA COMPOSICIONAL	47
4.2	ANALISE MICROESTRUTURAL	51
4.3	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	53
4.4	DESEMPENHO DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA	58
5	CONCLUSÃO	63
6	REFERÊNCIA	65

1 INTRODUÇÃO

O avanço exponencial na miniaturização e integração de dispositivos eletrônicos trouxe benefícios significativos à sociedade, possibilitando a criação de sistemas mais inteligentes, portáteis e conectados.

No entanto, essa evolução intensificou os desafios relacionados à interferência eletromagnética (EMI), fenômeno que prejudica a confiabilidade, o desempenho e a segurança de equipamentos eletrônicos ao afetar a transmissão e recepção de sinais (FRANÇA *et al.*, 2024). As consequências de EMI são particularmente críticas em aplicações militares, aeroespaciais, biomédicas e industriais, onde a falha de componentes eletrônicos pode gerar impactos financeiros ou riscos à vida humana. Diversas soluções têm sido empregadas para mitigar EMI, incluindo filmes metálicos, tecidos condutivos e tintas à base de metais. Apesar de eficazes, essas abordagens apresentam limitações, como alta densidade, rigidez, elevado custo de produção e baixa flexibilidade, o que as torna inadequadas para aplicações em dispositivos dobráveis ou vestíveis, cuja demanda vem crescendo globalmente (LOPES *et al.*, 2024).

Nesse contexto, materiais nano estruturados surgem como alternativas promissoras para blindagem eletromagnética, destacando-se os nanofios metálicos eletrodepositados em matrizes poliméricas devido à sua elevada relação comprimento/diâmetro (aspect ratio), excelente condutividade elétrica e propriedades magnéticas ajustáveis (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Dentre os métodos de síntese, a eletrodeposição em membranas porosas de polycarbonato ou alumina apresenta vantagens significativas, como baixo custo, simplicidade de execução e possibilidade de controle dimensional dos nanofios produzidos, gerando estruturas uniformes e orientadas.

Em estudo recente, demonstraram que o uso de tinta condutiva de carbono como cátodo substitui camadas metálicas convencionais, simplificando o processo de eletrodeposição e mantendo alta condutividade elétrica ($\sim 46,7$ S/cm), permitindo a síntese eficiente de nanofios de Ni e Cu (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

O polycarbonato destaca-se como matriz porosa pela sua elevada flexibilidade, baixo custo, compatibilidade eletroquímica e facilidade de remoção, sendo ideal para

aplicações em dispositivos flexíveis e dobráveis. Quanto aos mecanismos de blindagem EMI, propriedades elétricas e magnéticas adequadas são fundamentais para promover reflexão associada à condutividade elétrica e absorção relacionada a perdas magnéticas e dielétricas. Assim, nanofios de metais ferromagnéticos, como Ni e Co, são candidatos ideais, pois suas propriedades magnéticas, como coercividade, anisotropia magnética e resposta em ressonância ferromagnética, favorecem a absorção de ondas EM, além de apresentarem boa estabilidade química e mecânica (FRANÇA *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2023). Apesar dos avanços na literatura, ainda há lacunas no conhecimento sobre o desempenho de blindagem EMI de membranas contendo nanofios metálicos sob deformação mecânica, aspecto essencial para aplicações em dispositivos flexíveis e vestíveis.

Objetivo geral

Investigar a viabilidade da utilização de nanofios metálicos, obtidos por eletrodeposição em membranas porosas de policarbonato, como elementos funcionais em sistemas de blindagem eletromagnética, com vistas ao desenvolvimento de tecnologias leves, flexíveis e eficientes para proteção contra interferências eletromagnéticas (EMI).

Objetivo específico

Para alcançar o objetivo central desta pesquisa, algumas metas específicas foram estabelecidas de forma a orientar o desenvolvimento do trabalho de maneira sistemática e fundamentada. Primeiramente, propõe-se avaliar a aplicabilidade de membranas porosas de policarbonato, amplamente disponíveis no mercado, como moldes eficientes para o crescimento controlado de nanofios metálicos por eletrodeposição. Essa escolha se justifica pela facilidade de aquisição e pela estrutura regular dessas membranas, que favorece a formação ordenada de nanofios com dimensões bem definidas.

Em um segundo momento, o estudo visa contribuir para o desenvolvimento de materiais e dispositivos de blindagem eletromagnética mais eficientes, buscando otimizar suas propriedades funcionais para a proteção de equipamentos eletrônicos contra interferências indesejadas. A integração de nanofios metálicos com materiais

poliméricos pode resultar em estruturas leves, flexíveis e de alto desempenho, alinhadas às exigências tecnológicas atuais.

Além disso, serão investigadas detalhadamente as propriedades magnéticas das membranas funcionalizadas com nanofios, com ênfase na análise da anisotropia, da coerência magnética e da resposta sob campos externos. Compreender esses aspectos é essencial para correlacionar a microestrutura dos nanofios com seu comportamento magnético e sua eficácia em aplicações de blindagem.

Por fim, será analisada a influência da deformação mecânica sobre o desempenho das estruturas, por meio de testes de dobra controlada. Tal abordagem visa simular as condições reais de uso em dispositivos flexíveis, avaliando a estabilidade estrutural e funcional das amostras frente a esforços mecânicos repetitivos, elemento essencial para validar sua aplicação prática em tecnologias emergentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo oferecer uma análise aprofundada e crítica sobre o uso de membranas porosas, especialmente as de alumina e policarbonato, como substratos para a produção de nanofios metálicos voltados à blindagem eletromagnética (EMI). Serão discutidos os conceitos fundamentais associados à estrutura e funcionalidade dessas membranas, os mecanismos de blindagem eletromagnética, bem como a relação entre as propriedades microestruturais e magnéticas dos nanofios. A partir de uma abordagem comparativa, pretende-se justificar a escolha das membranas de policarbonato como meio preferencial para aplicações tecnológicas avançadas.

2.1 MEMBRANAS POROSAS

As membranas porosas são estruturas sintéticas que funcionam como barreiras seletivas, permitindo a passagem de substâncias líquidas ou gasosas com base em critérios como tamanho molecular e polaridade. Desde a década de 1970, seu uso tem se expandido em substituição a processos clássicos de separação, como filtração e destilação (HABERT *et al.*, 2020).

A composição química dessas membranas (polimérica, cerâmica ou híbrida) e suas propriedades físicas (diâmetro dos poros, espessura e topografia) são determinantes para sua aplicação e eficiência. O nível de seletividade de uma membrana está diretamente relacionado ao tamanho de seus poros (ABETZ *et al.*, 2006). De acordo com Yahya *et al.* (2024, p. 2), o uso de membranas poliméricas porosas na microextração oferece benefícios significativos, especialmente pela possibilidade de controle do tamanho dos poros e pela ampla área superficial dessas estruturas, o que permite minimizar interferências causadas por matrizes complexas e aumentar a seletividade dos compostos-alvo.

Além de processos de separação, as membranas porosas são amplamente utilizadas como moldes para crescimento de nanofios metálicos por eletrodeposição. Essa técnica eletroquímica permite a formação de estruturas cilíndricas uniformes

em escala nanométrica com grande controle sobre morfologia e orientação, características essenciais para aplicações em blindagem EMI. Estudos recentes (DUTT *et al.*, 2021) apontam para um crescente uso de membranas porosas em aplicações de alta tecnologia, especialmente com o suporte da nanotecnologia.

2.1.1 Membranas de alumina

As membranas de alumina (óxido de alumínio - Al_2O_3) destacam-se por sua elevada estabilidade térmica, resistência à corrosão e uniformidade de poros. São tradicionalmente obtidas por anodização do alumínio, resultando em estruturas altamente ordenadas (RHEIMA *et al.*, 2023).

As membranas de alumina têm se destacado como materiais estratégicos em diversas áreas da ciência e da engenharia, devido à sua elevada porosidade, estabilidade térmica, resistência química e possibilidade de controle preciso das características estruturais. Essas propriedades fazem com que as membranas de óxido de alumínio (Al_2O_3) sejam amplamente utilizadas como suportes para separação molecular, moldes para deposição de nanomateriais e substratos funcionais em dispositivos optoeletrônicos, sensores e sistemas de liberação controlada de fármacos.

A preparação dessas membranas pode ser realizada por diferentes rotas, sendo a anodização controlada uma das mais utilizadas na síntese de membranas nanoporosas auto-organizadas. Neste processo, o alumínio metálico é oxidado eletroquimicamente em meio ácido sob tensão constante, resultando em estruturas com poros cilíndricos paralelos e altamente ordenados, cujas dimensões são ajustáveis conforme os parâmetros eletroquímicos aplicados (BOUCHETTA; SANTAMARIA; DI QUARTO, 2009). A estrutura final da membrana depende fortemente da natureza do eletrólito, da densidade de corrente e da duração da anodização.

Além das membranas anodizadas, abordagens baseadas na sinterização de misturas de alumina com outros óxidos ou minerais também têm sido estudadas. (AOUDJAA *et al.*, 2022), investigaram a fabricação de membranas cerâmicas

porosas a partir de misturas de diatomita e alumina, obtendo materiais com elevada permeabilidade e resistência mecânica, adequados para aplicações industriais. Os autores enfatizaram que a incorporação de diatomita reduz a densidade da estrutura e facilita a formação de uma rede porosa interconectada, sem comprometer a estabilidade térmica do sistema.

No contexto de dispositivos eletromagnéticos e de microeletrônica, a aplicação das membranas de alumina como moldes para deposição de nanofios metálicos tem sido explorada com destaque. A morfologia altamente regular dos poros permite o crescimento controlado de nanomateriais por eletrodeposição ou técnicas de preenchimento por solução, possibilitando a produção de dispositivos com comportamento anisotrópico bem definido e propriedades magnéticas moduláveis (OSAMA *et al.*, 2024). Neste sentido, membranas com porosidade e espessura otimizadas são indispensáveis para garantir a uniformidade e continuidade dos nanofios crescidos no interior das cavidades.

Ainda no campo das aplicações avançadas, Du *et al.* (2021) demonstraram que o projeto racional de membranas cerâmicas de alumina para mancais de ar requer controle simultâneo da porosidade e da conectividade da rede de canais internos.

A pesquisa destacou o uso de modelagens computacionais para prever a eficiência de suporte de carga das membranas e otimizar suas propriedades estruturais. Essa abordagem permite alinhar o desempenho do material com requisitos técnicos específicos de aplicações em ambientes de alta rotação ou de microprecisão.

Outra vertente promissora se refere ao uso biomédico das membranas de alumina. A pesquisa de Osama *et al.* (2024) revelou que essas membranas, quando processadas com diferentes parâmetros de anodização, apresentam propriedades ajustáveis de tamanho de poro, espessura de parede e taxa de degradação, tornando-as excelentes candidatas para sistemas de liberação de fármacos. A porosidade regular das membranas promove uma liberação controlada e sustentada dos agentes terapêuticos, com aplicações potenciais em sistemas transdérmicos, oculares ou implantáveis.

O estudo de Wang *et al.* (2023) inovou ao aplicar técnicas de microgravação a laser para criar padrões funcionais em membranas tubulares de alumina, voltadas à captura direta de CO₂ do ar. A pesquisa comprovou que a micropadronização permite o aumento significativo da área superficial ativa, otimizando o desempenho de captura e promovendo economia de energia no processo.

Estudos mais recentes têm aprofundado a compreensão sobre a estabilidade térmica e a transição de fases em membranas de alumina anodizada, especialmente no que se refere à conversão da fase γ -Al₂O₃ para α -Al₂O₃, esta última reconhecida por sua superior estabilidade termodinâmica, resistência mecânica e inércia química.

Ono e Asoh *et al.* (2020) demonstraram que, por meio de tratamentos térmicos controlados acima de 1100 °C, é possível promover a cristalização progressiva da estrutura, culminando na formação da fase α -Al₂O₃ em temperaturas próximas a 1250 °C, sem comprometer a integridade estrutural da membrana.

A caracterização por difração de raios-X evidenciou essa transição de forma clara, indicando a eliminação de fases intermediárias como γ e δ -Al₂O₃. Tais avanços são particularmente relevantes para aplicações em que as membranas atuam como suportes cerâmicos em sistemas catalíticos ou em processos de filtração de gases corrosivos, exigindo materiais com elevada resistência térmica e estabilidade química.

Dessa forma, observa-se que as membranas de alumina representam uma classe versátil de materiais funcionais, cuja aplicabilidade abrange desde sistemas de purificação de fluidos até componentes em dispositivos de alta tecnologia.

O contínuo aprimoramento das técnicas de fabricação e caracterização dessas membranas, aliado ao avanço das simulações numéricas e modelagens multiescala, tende a expandir ainda mais seu uso em tecnologias emergentes e sustentáveis.

Essas características tornam-nas adequadas para várias aplicações especialmente em ambientes agressivos e processos que requerem elevada precisão, entretanto, apresentam limitações práticas: alto custo de fabricação, fragilidade mecânica e complexidade na manipulação.

Embora eficientes na formação de nanofios, sua rigidez e baixa transparência reduzem sua versatilidade em dispositivos modernos que exigem flexibilidade e compatibilidade ótica (YOUNS *et al.*, 2018).

2.1.2 Membranas de Policarbonato

De acordo com (Gohil *et al.*, 2022) as membranas de policarbonato ganham destaque com relação a sua aplicabilidade em dispositivos flexíveis, sensores e blindagens portáteis, devido à sua compatibilidade com diferentes técnicas de deposição e sua estabilidade físico-química em ambientes moderadamente agressivos.

As membranas de policarbonato se destacam como matrizes promissoras para o crescimento controlado de nanofios metálicos por eletrodeposição, especialmente em aplicações tecnológicas como blindagem eletromagnética, sensores e nanodispositivos. Estas membranas se caracterizam por possuírem poros cilíndricos uniformemente distribuídos, diâmetros controláveis na escala nanométrica e alta estabilidade química e térmica. Essa estrutura ordenada permite o controle da morfologia, densidade e orientação dos nanofios, tornando possível a engenharia precisa das propriedades físicas e funcionais do material resultante.

A eletrodeposição de nanofios metálicos equiatômicos de FeNi e FeCo em membranas porosas de policarbonato demonstrou elevada eficácia na obtenção de estruturas com controle composicional preciso, morfologia cilíndrica bem definida e propriedades magnéticas moduláveis conforme o potencial aplicado. De acordo com os resultados apresentados por Mansouri *et al.* (2023), a composição final dos nanofios foi diretamente influenciada pelas condições eletroquímicas, sendo possível ajustar a razão atômica entre os metais por meio da variação do potencial de deposição.

A caracterização magnética dos nanofios revelou que a anisotropia magnética é significativamente afetada pela orientação dos nanofios em relação ao campo aplicado, apresentando coerção e remanência mais elevadas quando o campo é paralelo ao eixo longitudinal dos nanofios. Tal comportamento confirma a predominância da anisotropia de forma, um fator determinante para a otimização de materiais voltados à blindagem eletromagnética e dispositivos magnéticos de alta precisão.

Esses achados reforçam a importância das membranas de polycarbonato como matrizes versáteis e eficazes para o crescimento direcionado de nanofios por eletrodeposição, especialmente quando se almeja a engenharia de propriedades magnéticas específicas. O estudo também evidencia que o controle da composição durante a deposição permite sintonizar a resposta magnética dos materiais, aspecto fundamental para aplicações que exigem elevado desempenho em frequência, como sistemas de proteção contra interferência eletromagnética (EMI).

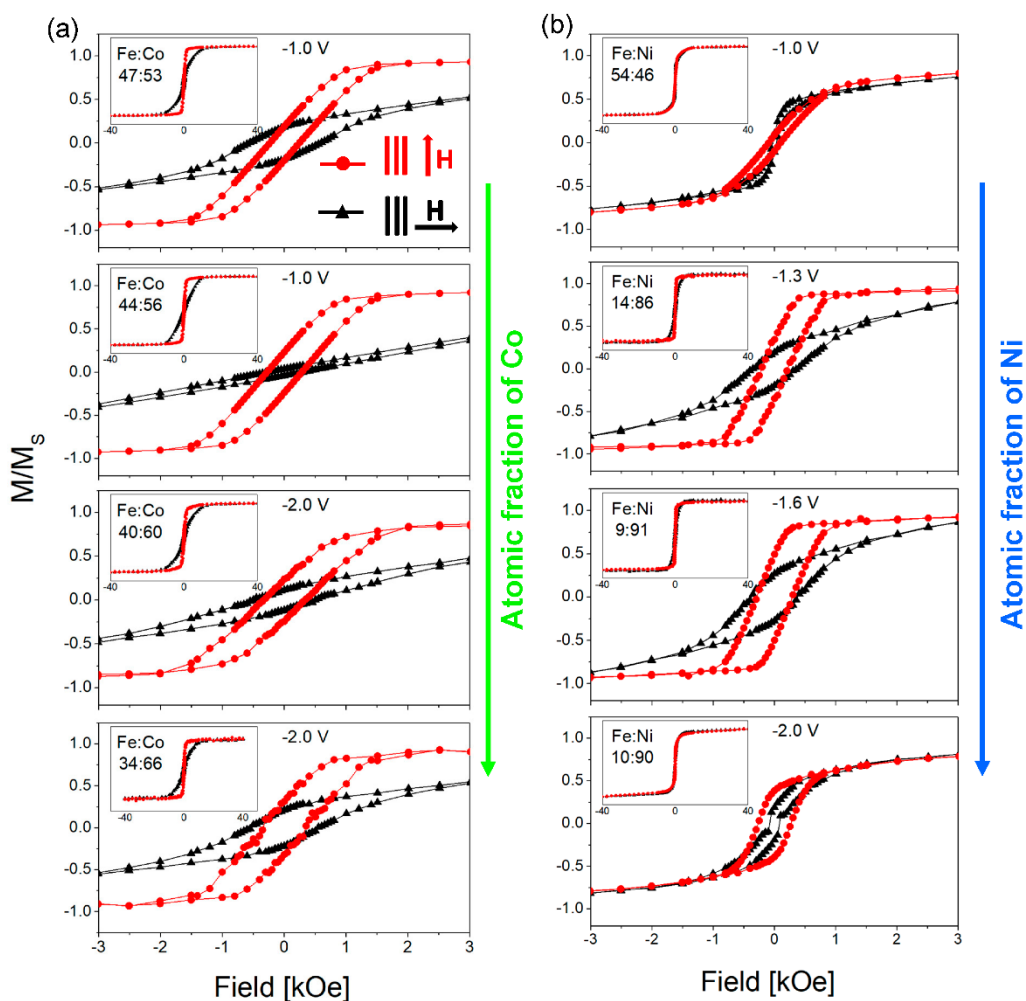
A metodologia adotada por Mansouri *et al.* (2023) se alinha aos critérios de reprodutibilidade e controle estrutural descritos por Lopes (2023) em sua tese, ampliando a base científica sobre o uso de nanofios metálicos eletrodepositados em plataformas flexíveis.

Figura 1 - Curvas de histerese magnética de nanofios de FeCo e FeNi eletrodepositados em membranas de policarbonato.

(a) Nanofios de FeCo depositados a -1,0 V com campo aplicado paralelo e perpendicular ao plano da membrana.

(b) Nanofios de FeNi depositados a -1,6 V com campo aplicado nas mesmas orientações.

Os resultados evidenciam anisotropia magnética com predominância na orientação paralela ao eixo dos nanofios.



Fonte: TRUEBA, M.; TRASATTI, S. P. Surface characterization of amorphous alumina and its hydrophilic behavior. *Langmuir*, v. 21, n. 18, p. 8314-8321, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1021/la050459c>.

Do ponto de vista estrutural, as membranas de polycarbonato são obtidas, em sua maioria, por processos de irradiação com feixes de íons pesados seguidos de ataque químico. Esse método confere poros alinhados e homogêneos, o que é essencial para garantir a reprodutibilidade dos nanofios metálicos sintetizados (DAMMAK *et al.*, 2023).

A precisão geométrica das matrizes influencia diretamente a anisotropia de forma dos nanofios e, conseqüentemente, suas propriedades magnéticas e eletromagnéticas.

Outro fator relevante é a possibilidade de metalização de uma das faces da membrana com uma fina camada de ouro ou prata, com espessura típica de 30 a 50 nm, que atua como eletrodo condutor para a eletrodeposição. Esse processo garante o crescimento unidirecional dos nanofios no interior dos poros, o que favorece o alinhamento e a uniformidade das propriedades físicas ao longo da matriz (AL-EZZI *et al.*, 2024).

As membranas de polycarbonato também apresentam excelente resistência a eletrólitos e agentes químicos utilizados no processo de eletrodeposição, sendo compatíveis com sais metálicos em meio ácido ou básico. Essa resistência garante a integridade da matriz durante o crescimento dos nanofios, mesmo sob condições eletroquímicas agressivas (DAMMAK *et al.*, 2023).

Além disso, a flexibilidade mecânica das membranas de polycarbonato permite sua aplicação em substratos curvos ou flexíveis, o que é especialmente relevante para dispositivos eletrônicos vestíveis e sistemas de proteção EMI dinâmicos.

Estudos recentes demonstraram que, mesmo após múltiplos ciclos de dobragem, estruturas baseadas em nanofios eletrodepositados em membranas de Polycarbonato mantêm sua eficácia de blindagem em níveis superiores a 15 dB (AL-EZZI *et al.*, 2024).

Do ponto de vista da engenharia magnética, a densidade e o diâmetro dos poros afetam diretamente a interação magnética entre os fios, a distribuição de anisotropias e a resposta em ressonância ferromagnética (FMR). Tais fatores são

decisivos para a customização de dispositivos sensíveis a campos eletromagnéticos em diferentes faixas de frequência. A capacidade de sintonizar as propriedades magnéticas a partir do molde é uma das principais vantagens do uso de membranas poliméricas como plataformas de crescimento para nanofios metálicos.

A literatura científica também evidencia a aplicação dessas membranas em sistemas multicamadas ou com fios de composição variável ao longo do comprimento, possibilitando o desenvolvimento de dispositivos avançados de blindagem e absorção seletiva de radiação eletromagnética (DAMMAK *et al.*, 2023; AL-EZZI *et al.*, 2024). Esses avanços colocam as membranas de policarbonato no centro das pesquisas em materiais funcionais, não apenas como suporte físico, mas como parte ativa da engenharia de propriedades em nanossistemas metálicos.

Em comparação com a alumina, o policarbonato apresenta maior acessibilidade comercial, facilidade de manuseio e menor propensão a falhas estruturais, ou seja, apresentam vantagens significativas como moldes para eletrodeposição de nanofios metálicos, devido à sua geometria controlada, estabilidade química e mecânica, além da facilidade de funcionalização superficial.

Sua aplicabilidade em dispositivos de blindagem eletromagnética representa uma rota viável e eficiente para atender às demandas da indústria eletrônica e de telecomunicações por materiais leves, flexíveis e de alto desempenho.

2.2 MECANISMO DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

A interferência eletromagnética (EMI) configura-se como um dos principais desafios em sistemas de eletrônica de potência, sobretudo com o avanço das tecnologias de transmissão em altas frequências e a crescente vulnerabilidade a ataques intencionais, conhecidos como IEMI (Intentional Electromagnetic Interference).

De acordo com Jie *et al.* (2024), os dispositivos eletrônicos modernos demandam estratégias cada vez mais eficientes de proteção contra EMI, tanto do tipo conduzida quanto irradiada. Os autores revisam abordagens consolidadas e emergentes, incluindo técnicas de blindagem eletromagnética, análise de modos de

falha e critérios normativos de compatibilidade eletromagnética (EMC). Além disso, enfatizam a importância de protocolos de teste de imunidade mais robustos e padronizados, essenciais para garantir a operação segura e confiável de sistemas críticos em contextos industriais, militares e civis.

No que tange aos materiais utilizados na mitigação da EMI, Zecchi *et al.* (2024) apresentam uma revisão abrangente sobre os avanços no desenvolvimento de compósitos com propriedades de blindagem eletromagnética.

Os autores destacam o uso crescente de nanocompósitos baseados em grafeno, nanotubos de carbono e polímeros condutores, que oferecem excelente desempenho em reflexão e absorção de ondas eletromagnéticas.

Esses materiais se destacam pela sua leveza, flexibilidade e elevada eficácia de blindagem, atributos que os tornam especialmente adequados para aplicações em dispositivos portáteis, sistemas médicos sensíveis e equipamentos aeroespaciais de última geração. A eficiência desses compósitos decorre de sua estrutura multifuncional, capaz de combinar condutividade elétrica, perdas dielétricas e mecanismos magnéticos de absorção.

Em ambientes operacionais extremos, como minas subterrâneas de carvão, a presença de EMI representa um risco substancial à segurança. Nesse contexto, o estudo de Zhou, Reyes e Girman (2022), evidencia como a interferência eletromagnética pode comprometer o funcionamento de sensores, sistemas de comunicação e dispositivos de monitoramento essenciais à integridade da operação.

A revisão aborda não apenas os mecanismos físicos da interferência, mas também propõe medidas práticas de mitigação, fundamentadas em normas de projeto baseadas na compatibilidade eletromagnética.

A aplicação de técnicas de blindagem, isolamento de cabos e controle da emissão irradiada em ambientes subterrâneos torna-se, portanto, indispensável para preservar a funcionalidade e a segurança dos sistemas empregados nesses locais.

No campo biomédico, a EMI também suscita preocupações relevantes, principalmente no que diz respeito à segurança de dispositivos médicos implantáveis. Driessen *et al.* (2018) analisam a susceptibilidade de marcapassos e

desfibriladores cardíacos a campos eletromagnéticos emitidos por aparelhos eletrônicos de uso cotidiano, especialmente na faixa de frequência intermediária (1 kHz a 1 MHz).

A revisão demonstra que a interferência depende de múltiplos fatores, como a intensidade e frequência do campo incidente, o tipo de implante utilizado e a geometria dos eletrodos. Esses achados reforçam a necessidade de regulamentações mais específicas e atualizadas, bem como de estudos clínicos complementares que avaliem a interação entre emissores e dispositivos implantáveis.

Dessa forma, torna-se evidente que a blindagem eletromagnética desempenha um papel crucial na proteção de sistemas eletrônicos, sendo imprescindível para garantir sua integridade funcional em ambientes diversos e de alto risco.

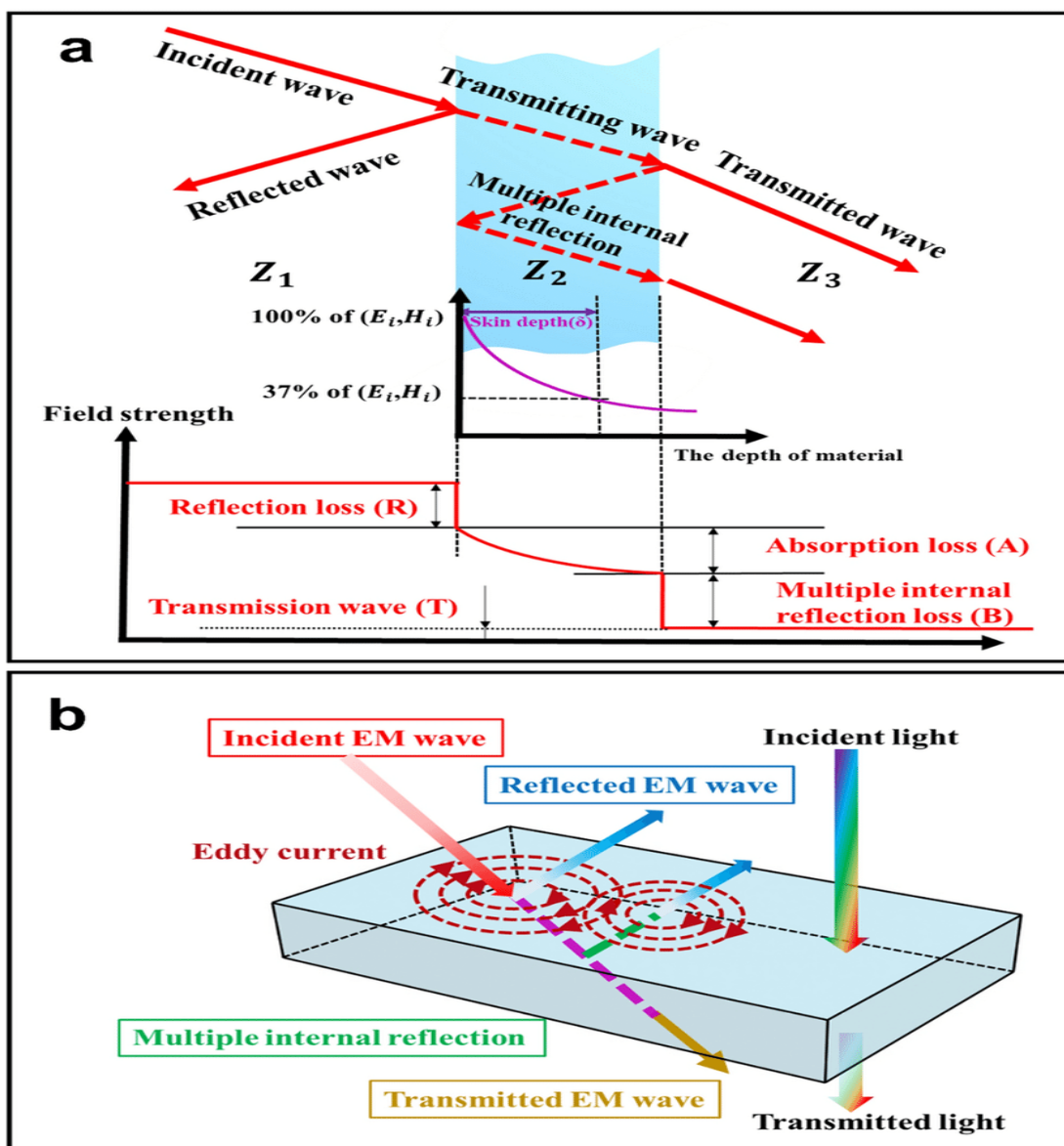
Adicionalmente, a crescente demanda por dispositivos eletrônicos de alta frequência e dimensões reduzidas intensificou o interesse pelo desenvolvimento de materiais avançados para blindagem eletromagnética.

O fenômeno da EMI refere-se à interferência gerada por ondas eletromagnéticas indesejadas, que afetam o desempenho de circuitos eletrônicos sensíveis, podendo comprometer funcionalidades críticas em equipamentos industriais, médicos e de comunicação. Nesse cenário, o desenvolvimento de materiais leves, flexíveis e com elevada capacidade de atenuação tornou-se prioridade estratégica, principalmente em áreas como eletrônica vestível, sistemas embarcados, telecomunicações e aeronáutica.

Entre os principais mecanismos físicos que compõem a blindagem eletromagnética destacam-se a reflexão, a absorção e as múltiplas reflexões internas, frequentemente representadas em diagramas técnicos, como ilustrado na Figura 2. A reflexão está diretamente relacionada à condutividade elétrica do material; quanto maior sua densidade eletrônica, maior a capacidade de refletir ondas incidentes. A absorção, por sua vez, ocorre por meio de perdas internas no material, geralmente associadas a propriedades dielétricas e magnéticas que dissipam a energia da onda eletromagnética.

Já as reflexões múltiplas são intensificadas em estruturas porosas, multicamadas ou com interfaces irregulares, que promovem o espalhamento interno das ondas e aumentam a eficiência global do material. Segundo Tan *et al.* (2021), o domínio desses mecanismos é fundamental para o projeto de soluções funcionais de EMI-shielding em aplicações contemporâneas.

Figura 2 — Esquema dos mecanismos de blindagem eletromagnética: reflexão, absorção e reflexão múltiplas



Fonte: Adaptado de Tan et al. (2021).

Nanomateriais como nanofios de prata, nanofibras de carbono e filmes de cobre têm se mostrado altamente eficazes na blindagem EMI por apresentarem não apenas elevada condutividade elétrica, mas também morfologia ajustável e integração eficiente com matrizes poliméricas flexíveis (ZHU *et al.*, 2020; XIE *et al.*, 2021).

Esses materiais formam redes condutoras interligadas que favorecem tanto a atenuação por reflexão quanto a dissipação interna de energia, alcançando níveis superiores a 30 dB de atenuação com espessuras inferiores a 200 μm .

A reutilização e durabilidade desses materiais sob flexão os tornam altamente desejáveis para aplicações móveis e dobráveis (BLACHOWICZ *et al.*, 2022). Esses avanços consolidam os nanomateriais condutores como alternativas promissoras à blindagem metálica convencional, conciliando leveza, flexibilidade e alto desempenho eletromagnético.

De acordo com Sharma *et al.* (2014), o alinhamento e a orientação dos nanofios são fatores determinantes para maximizar a eficiência de blindagem, pois otimizam os caminhos de condução elétrica e o acoplamento com o campo magnético.

2.3 PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS E MAGNÉTICAS DOS NANOFIOS

As propriedades magnéticas dos nanofios metálicos são fortemente influenciadas por suas características microestruturais, como a geometria, a textura cristalina e a presença de camadas superficiais ou cascas magnéticas. Essas variáveis impactam diretamente o comportamento da magnetização, especialmente em aplicações que envolvem blindagem eletromagnética (EMI).

Estudos recentes reforçam que a engenharia de tais propriedades, em especial por meio de modulação composicional, tem se mostrado eficaz na otimização do desempenho funcional desses nanomateriais.

Nesse contexto, Guerra, Viana e Padrón-Hernández (2022) realizaram simulações micromagnéticas em nanofios do tipo FeCo com perfis modulados, evidenciando que alterações na composição química ao longo do comprimento do fio resultam em modos distintos de ressonância ferromagnética (FMR).

Tais variações estão associadas a efeitos de auto-demagnetização e às interações de troca magnética internas, que influenciam diretamente o campo de anisotropia efetivo e a largura das linhas de ressonância. A partir desses resultados, os autores demonstraram que a anisotropia magnética e a coercividade podem ser ajustadas com precisão, o que permite avanços importantes no desenvolvimento de materiais eficientes para aplicações de blindagem eletromagnética.

Complementarmente, Lopes *et al.* (2023) estudaram nanofios metálicos de Ni/Cu com modulação composicional e confirmaram que o perfil de anisotropia e o campo coercivo variam em função da distribuição dos elementos ao longo do fio. Esses parâmetros microestruturais influenciam diretamente o desempenho dos materiais em EMI. Em outro trabalho, Lopes *et al.* (2021) compararam a eficiência de blindagem de nanofios metálicos de ferro (Fe) com suas versões oxidadas. Os resultados mostraram que os nanofios metálicos apresentaram eficiência média de 23,7 dB, desempenho significativamente superior aos fios oxidados, cuja eficiência foi de apenas 5,1 dB em atmosfera ambiente e 6,0 dB em atmosfera de oxigênio.

Esse contraste evidencia a importância da continuidade estrutural e da elevada condutividade elétrica para a efetividade da blindagem.

Piriaux (2020) também contribuiu com uma análise abrangente sobre o magnetismo em nanofios, destacando a influência de domínios magnéticos complexos, como estados de vórtice e transversais e das múltiplas hierarquias de anisotropia (cristalográfica e de forma) nos mecanismos de reversão da magnetização. Segundo o autor, em nanofios com elevada razão de aspecto (relação entre comprimento e diâmetro), a anisotropia de forma tende a dominar, gerando altos valores de coercividade e remanência magnética. Tais propriedades são essenciais para ampliar a capacidade de absorção de micro-ondas e, consequentemente, a eficácia dos sistemas de blindagem EMI.

À luz desses resultados, evidencia-se que a escolha criteriosa dos materiais e de suas propriedades microestruturais desempenha papel fundamental na performance de sistemas de proteção eletromagnética. As membranas porosas de policarbonato, nesse cenário, apresentam vantagens técnicas relevantes em relação às de alumina, especialmente pela flexibilidade mecânica, facilidade de manuseio, compatibilidade com eletrodeposição e potencial de aplicação em dispositivos flexíveis. O uso dessas membranas como molde para o crescimento de nanofios metálicos representa uma estratégia viável para o desenvolvimento de blindagens funcionais em sistemas eletrônicos portáteis e vestíveis.

Dessa forma, este capítulo integra resultados experimentais e conceitos teóricos que fortalecem a compreensão das inter-relações entre morfologia, propriedades magnéticas e desempenho em blindagem de nanofios metálicos. A consolidação do uso de membranas de policarbonato como substrato de fabricação de nanofios representa não apenas uma inovação de caráter funcional, mas também uma alternativa economicamente viável e tecnologicamente promissora para futuras aplicações em proteção eletromagnética.

2.4 A IMPORTÂNCIA DA SELEÇÃO DE MATERIAIS NA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

A eficácia de um material aplicado à blindagem eletromagnética (EMI) depende, fundamentalmente, de suas propriedades elétricas, magnéticas e estruturais.

De acordo com Guan *et al.* (2024), a escolha adequada dos materiais é fator decisivo para alcançar valores elevados de blindagem, especialmente em estruturas otimizadas em escala micro e nano, capazes de atingir até 90 dB. Tais níveis de atenuação são possíveis quando a estrutura do material favorece caminhos de dissipação eficientes e apresenta alta condutividade elétrica. Além disso, o controle da morfologia, espessura e orientação dos elementos internos, como nanofios, torna-se essencial para direcionar e potencializar o mecanismo de absorção, o mais efetivo em altas frequências.

Yang *et al.* (2021) reforçam que a eficácia dos materiais depende não apenas das propriedades intrínsecas, mas da sua integração em arquiteturas funcionais, como estruturas multicamadas ou compósitos orientados. Nesse contexto, membranas porosas com nanofios metálicos demonstram-se promissoras, pois possibilitam o crescimento controlado e alinhado de condutores metálicos em escala nanométrica.

Outro aspecto relevante é a composição e estrutura do material condutivo. Estudo de Zhu *et al.* (2021) demonstrou que a introdução de elementos metálicos em matrizes poliméricas pode criar compósitos híbridos altamente eficazes para EMI. No trabalho, observou-se que a combinação entre materiais com elevada constante dielétrica e estruturas metálicas contínuas amplifica a absorção de ondas, superando os efeitos indesejáveis de reflexão superficial.

Além disso, como apontado por Xiang *et al.* (2024), materiais hierárquicos e funcionais com múltiplas interfaces aumentam as rotas de dissipação e possibilitam mecanismos simultâneos de absorção e conversão de energia eletromagnética. Isso corrobora a importância de selecionar substratos flexíveis e funcionais, como as

membranas de policarbonato, que apresentam vantagens significativas em termos de compatibilidade processual, transparência, resistência mecânica e facilidade de integração com dispositivos eletrônicos.

Em estudos recentes, compostos de nanofios de Fe, Ni e Cu eletrodepositados sobre matrizes de policarbonato apresentaram desempenho superior ao de estruturas similares em alumina, principalmente devido à maior flexibilidade da matriz e à uniformidade dos poros (LOPES *et al.*, 2023). Essa regularidade estrutural garante maior previsibilidade nas propriedades magnéticas, como coercividade e anisotropia, fundamentais para a eficiência da blindagem (ZHENG *et al.*, 2021).

Adicionalmente, compósitos impressos em 3D, com estruturas geométricas projetadas para favorecer a absorção, têm se mostrado eficientes, conforme evidenciado por Guan *et al.* (2024), que destacam a possibilidade de combinar condutividade elétrica, leveza e propriedades dielétricas elevadas. Esse tipo de estratégia permite personalizar a blindagem de acordo com a frequência de operação dos dispositivos e com o ambiente em que estão inseridos.

Portanto, a escolha criteriosa dos materiais utilizados na blindagem, considerando aspectos como condutividade, magnetismo, estrutura dos poros, conformação tridimensional e capacidade de integração com substratos funcionais é determinante para o desenvolvimento de soluções eficazes e viáveis para a proteção de sistemas sensíveis.

Este trabalho parte dessa premissa ao propor o uso de membranas de policarbonato com nanofios metálicos eletrodepositados, fundamentando-se nos avanços científicos da área e nos resultados obtidos experimentalmente. A eficácia de um material em blindagem eletromagnética (EMI) está diretamente relacionada às suas propriedades físicas, elétricas e estruturais.

Materiais com alta condutividade elétrica e características magnéticas específicas tendem a exibir maior eficiência na atenuação de ondas eletromagnéticas. Essa performance pode ser alcançada por meio de mecanismos combinados de reflexão, absorção e múltiplas reflexões internas, cuja predominância depende do tipo de material e da frequência da radiação incidente (AFILIPOPAEI;

TEODORESCU-DRAGHICESCU, 2020).

Segundo Guan *et al.* (2024), uma das abordagens mais eficazes para potencializar a blindagem é a modulação micro e macroestrutura do material, permitindo a customização da direção da blindagem e a amplificação do desempenho, com valores que chegam a 90 dB. Isso reforça a importância de se considerar não apenas a composição química, mas também a organização estrutural dos materiais, especialmente em compósitos contendo nanoestruturas condutoras.

Nesse sentido, materiais como nanofios metálicos de Ni, Cu ou Fe, quando organizados de maneira orientada dentro de matrizes como membranas de polycarbonato ou alumina, possibilitam a formação de trajetórias de condução otimizadas, promovendo altas taxas de absorção de ondas eletromagnéticas (YANG *et al.*, 2021).

A escolha do tipo de matriz polimérica ou cerâmica, influencia diretamente a flexibilidade, durabilidade e adaptabilidade dos dispositivos de proteção EMI. A literatura também destaca que propriedades como tamanho e alinhamento dos poros, orientação dos nanofios e estrutura multicamada impactam significativamente a performance da blindagem (GUAN *et al.*, 2024; YANG *et al.*, 2021).

Por exemplo, compósitos impressos em 3D com microestruturas projetadas demonstraram capacidades superiores de blindagem ao promoverem reflexões múltiplas internas e caminhos labirínticos para dissipação da radiação. Dessa forma, a seleção criteriosa dos materiais utilizados na blindagem, considerando aspectos como condutividade, magnetismo, estrutura dos poros e capacidade de integração com substratos funcionais é determinante para a obtenção de sistemas eficazes em proteger equipamentos eletrônicos sensíveis contra interferências externas.

O presente trabalho se apoia nesse princípio, optando pelo uso de membranas de polycarbonato eletrodepositadas com nanofios metálicos, com base nos bons resultados relatados na literatura e em experimentos realizados.

2.5 MODELAGEM MICROMAGNÉTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADAS À RESSONÂNCIA FERROMAGNÉTICA (FMR)

A modelagem micromagnética constitui uma ferramenta teórica fundamental para a compreensão e previsão do comportamento de materiais magnéticos em escalas nanométricas, sendo particularmente útil para a interpretação de dados experimentais obtidos por meio da técnica de ressonância ferromagnética (FMR).

Esta técnica, que permite analisar as propriedades dinâmicas de sistemas ferromagnéticos, depende de forma crucial do entendimento das respostas espectrais associadas a diferentes modos de excitação magnética.

Em materiais ferromagnéticos nanoestruturados, como os nanofios metálicos, a presença de anisotropia de forma e confinamento geométrico acentua os efeitos de ressonância localizados, levando ao aparecimento de múltiplos modos de excitação.

Conforme demonstrado por Smith *et al.* (2023), o uso de simulações micromagnéticas permite identificar modos de volume, de superfície e de borda, os quais são responsáveis pelas variações no espectro de FMR observado experimentalmente. De acordo com Chen *et al.* (2019), ao se analisar a resposta magnética de estruturas com domínios estáveis e confinados, a modelagem numérica é essencial para identificar os parâmetros críticos que asseguram a estabilidade das regiões magnetizadas. Tais modelagens são particularmente relevantes em sistemas como filmes finos, partículas magnéticas isoladas e compósitos nanoestruturados, onde a interação entre anisotropias pode resultar em regimes de resposta não linear.

Além disso, a técnica tem sido empregada na previsão do comportamento dinâmico de ferritas e materiais baseados em granadas de ferro, conforme estudos desenvolvidos por Zhang *et al.* (2024). Nessas estruturas, os domínios de faixa exibem modos ressonantes altamente sensíveis às condições de contorno e às propriedades estruturais, sendo a modelagem micromagnética uma abordagem essencial para a previsão das frequências naturais de oscilação magnética.

Em trabalhos recentes, como o de Lopes (2023), a aplicação de simulações numéricas foi utilizada para analisar a influência do diâmetro, orientação cristalográfica e tensão interna na modulação da resposta espectral de nanofios metálicos. O autor demonstrou que alterações micrométricas na geometria dos fios resultam em mudanças significativas nos modos de ressonância, validando os resultados experimentais observados por FMR.

Do ponto de vista computacional, os softwares como OOMMF (Object Oriented MicroMagnetic Framework) e MuMax3 têm se mostrado eficazes na resolução das equações micromagnéticas, possibilitando a visualização da dinâmica de magnetização em tempo real e o ajuste fino dos parâmetros simulados com os dados experimentais (GARCIA *et al.*, 2015; ZHU *et al.*, 2021).

A integração da simulação micromagnética aos dados de FMR representa, portanto, um avanço metodológico que tem contribuído para o aprofundamento da análise de materiais magnéticos. Tal abordagem permite não apenas a explicação de resultados empíricos, como também a predição de novas arquiteturas e funcionalidades em sistemas magneticamente ativos. A simulação numérica, nesse contexto, torna-se não apenas um suporte interpretativo, mas também uma ferramenta de projeto para o desenvolvimento de novos materiais com aplicações em blindagem eletromagnética, armazenamento magnético e sensores de alta sensibilidade.

2.6 TEORIA POR TRÁS DA RESSONÂNCIA FERROMAGNÉTICA (FMR) EM NANOFIOS

A ressonância ferromagnética (FMR) constitui uma ferramenta espectroscópica amplamente utilizada para caracterização das propriedades magnéticas dinâmicas de materiais ferromagnéticos, especialmente em estruturas de baixa dimensionalidade, como os nanofios metálicos. Essa técnica permite a análise precisa de parâmetros como anisotropia magnética, magnetização de saturação, campo coercivo e fator de amortecimento, todos fundamentais para o desempenho de materiais em aplicações como blindagem eletromagnética (EMI).

A equação de Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) permanece como base teórica fundamental para a compreensão da dinâmica da magnetização em materiais magnéticos, especialmente em estudos de ressonância ferromagnética (FMR). Essa equação descreve o comportamento temporal da magnetização vetorial sob a influência de um campo magnético efetivo, incorporando um termo de amortecimento responsável pela dissipação energética do sistema.

Estudos recentes, como o de Akhtar et al. (2023), destacam a relevância da equação de LLG na simulação e interpretação de respostas dinâmicas em sistemas nanomagnéticos, reforçando sua aplicabilidade em contextos onde a anisotropia, a interação de troca e o amortecimento desempenham papéis críticos na configuração espectral da FMR. O artigo enfatiza ainda a importância da parametrização precisa da equação para modelagens micromagnéticas avançadas, sobretudo na análise da largura de linha e do deslocamento do campo de ressonância em nanofios e multicamadas magnéticas.

Em nanofios, o formato alongado e o confinamento das dimensões geram comportamentos distintos no movimento dos campos magnéticos internos, o que torna a técnica de ressonância ferromagnética (FMR) altamente sensível às características estruturais e à composição dos materiais.

Estudos com filmes magnéticos formados por pequenas partículas demonstraram a presença de vários sinais de ressonância, que estão relacionados

à presença de diferentes regiões internas com propriedades magnéticas variadas. A frequência de ressonância, assim como a largura da linha espectral, pode ser ajustada por meio do controle de variáveis como diâmetro dos fios, orientação cristalina, composição e campo externo aplicado.

Avaliações comparativas entre modos de varredura em campo e em frequência, realizadas em arranjos de nanofios, evidenciam a influência da orientação e da densidade dos fios na dinâmica da precessão magnética (SAMUELSEN *et al.*, 2024).

Outro aspecto relevante refere-se ao parâmetro de amortecimento (α), associado à dissipação de energia durante a precessão. Materiais com valores mais elevados de α tendem a apresentar maior absorção de radiação eletromagnética, característica desejável para aplicações de blindagem. Por outro lado, amortecimentos reduzidos são indicativos de coerência magnética prolongada, favorecendo aplicações em dispositivos magnônicos ou de spintrônica.

Dessa forma, a FMR fornece uma base sólida para correlacionar propriedades estruturais e magnéticas de nanofios com sua funcionalidade em sistemas de absorção eletromagnética. A análise criteriosa desses parâmetros permite o desenvolvimento de materiais otimizados para proteção EMI, especialmente quando integrados a matrizes porosas que favorecem o alinhamento e a homogeneidade estrutural dos nanofios.

2.7 IMPORTÂNCIA DA APLICAÇÃO DA CAMADA DE OURO NA ELETRODEPOSIÇÃO

A aplicação de uma camada metálica de ouro sobre membranas de policarbonato antes da eletrodeposição constitui uma etapa crítica no preparo de sistemas condutores eficientes para a síntese de nanofios metálicos. Essa camada funciona como eletrodo de trabalho, viabilizando o acoplamento elétrico entre o substrato polimérico isolante e o eletrólito metálico, condição indispensável para o crescimento eletroquímico controlado das estruturas nanométricas.

A elevada condutividade elétrica e a inércia química do ouro favorecem uma interface estável, o que minimiza reações parasitas e assegura a formação de

nanofios com alta pureza e uniformidade morfológica.

Conforme evidenciado por Ning *et al.* (2021), a inserção de uma camada de ouro sobre membranas poliméricas isolantes permite a nucleação homogênea e o preenchimento completo dos poros, otimizando a deposição axial dos nanofios. Esse fator é particularmente relevante em aplicações que exigem alta reprodutibilidade estrutural, como sensores magnéticos e dispositivos de blindagem eletromagnética (EMI). Xie *et al.* (2025) também reforçam a importância da continuidade da camada metálica, destacando sua influência direta na eficiência da nucleação e na estabilidade da estrutura resultante durante o crescimento eletroquímico.

Além disso, estudos recentes demonstram que o desempenho eletroquímico do sistema é intensamente favorecido pela presença do revestimento metálico de ouro. Weber, Strom e Simoska (2024) apontam que essa camada proporciona elevada estabilidade frente a eletrólitos agressivos, assegurando longevidade funcional aos dispositivos.

Do ponto de vista estrutural, Colón Quintana *et al.* (2024) evidenciam que a superfície dourada promove a orientação alinhada dos nanofios, fator determinante para a maximização das propriedades magnéticas e elétricas dos materiais obtidos.

A adesão eficaz entre os nanofios e a superfície metálica também contribui para a integridade mecânica dos compósitos produzidos.

Complementarmente, Lu, Han e Dai (2020) verificaram que substratos recobertos com ouro produzem nanofios mais condutivos e com menor densidade de defeitos superficiais. A uniformidade dos fios e a menor dispersão na distribuição de diâmetros observadas nas amostras com camada metálica são atribuídas à estabilidade eletroquímica do ouro durante os processos de nucleação e crescimento. Tais características são desejáveis em dispositivos de blindagem EMI, onde a continuidade estrutural e a eficiência na dissipação de ondas eletromagnéticas são requisitos fundamentais.

Em síntese, a camada de ouro exerce um papel multifuncional nos sistemas de eletrodeposição de nanofios metálicos, oferecendo condutividade superficial elevada, estabilidade química, controle morfológico e aderência aprimorada. A partir

da literatura recente, observa-se um consenso técnico sobre sua importância como componente essencial para a obtenção de dispositivos eficientes e com desempenho superior em aplicações emergentes de nanomateriais funcionais.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 PREPARAÇÃO DAS MEMBRANAS POROSAS

As membranas porosas de polycarbonato utilizadas neste trabalho apresentavam poros com diâmetro médio de aproximadamente 200 nm. Essas membranas foram selecionadas devido à sua flexibilidade mecânica, boa compatibilidade com o processo de eletrodeposição e viabilidade para aplicações em síntese de nanofios. Para permitir sua atuação como eletrodo de trabalho na célula eletroquímica, uma das faces foi recoberta com uma fina camada de ouro (~50 nm), depositada por evaporação térmica em alto vácuo, com o objetivo de conferir condutividade elétrica à superfície da membrana.

3.2 PREPARAÇÃO DO ELETRÓLITO

Dois tipos de eletrólitos foram preparados para a síntese dos nanofios: Nanofios de níquel: solução contendo 0,5 mol/L de sulfato de níquel hexahidratado ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich, 99% pureza), 0,5 mol/L de ácido bórico (H_3BO_3 , Sigma-Aldrich, 99% pureza) em água destilada. O pH da solução foi ajustado para 4,0 com HCl diluído, e a temperatura de trabalho foi mantida em $25 \pm 1^\circ\text{C}$, sem agitação mecânica.

Nanofios de cobalto: solução composta por 0,5 mol/L de sulfato de cobalto heptahidratado ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich, 99% pureza), mantendo os demais componentes e parâmetros constantes em relação à solução anterior.

3.3 ELETRODEPOSIÇÃO DOS NANOFIOS

Os nanofios metálicos foram obtidos por eletrodeposição utilizando um potenciostato modelo INVIUMSTAT.XR (Invium Instruments), em uma célula de três eletrodos. O eletrodo de referência foi Ag/AgCl, o contra eletrodo (ânodo) foi uma

lâmina de platina de alta pureza, e o eletrodo de trabalho foi a membrana metalizada com ouro.

Para os nanofios de níquel, foi aplicada uma tensão constante de -1,00 V por 600 segundos, no modo cronoamperométrico. Para os nanofios de cobalto, o potencial aplicado foi de -1,20 V, com o mesmo tempo de deposição. As eletrodeposições foram realizadas em temperatura ambiente (25 ± 1 °C).

3.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E ESTRUTURAL

3.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e EDS

As análises morfológicas e composicionais foram realizadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura TESCAN MIRA 3, operando com tensão de aceleração de 15 kV e equipado com detector EDS (Oxford Instruments). As imagens foram obtidas em modo de elétrons secundários (SE) e retroespalhados (BSE). Os mapeamentos elementares foram realizados com software Aztec, com tempo de aquisição de 60 segundos por região.

3.4.2 Difração de Raios X (DRX)

A caracterização estrutural foi realizada com um difratômetro Rigaku SmartLab, operando com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,541874$ Å), com tubo a 40 kV e 30 mA. A varredura foi realizada no intervalo de 2θ entre 40° e 70°, com passo de 0,01° e velocidade de varredura de 1°/min.

3.5 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

3.5.1 Ressonância Ferromagnética (FMR)

As medidas de FMR foram realizadas com um espectrômetro de micro-ondas X-band ($\sim 9,5$ GHz), com campo DC variável de até 10 kOe. As amostras foram analisadas com o campo magnético aplicado em duas direções: paralela ($\theta_H = 0^\circ$) e perpendicular ($\theta_H = 90^\circ$) ao eixo dos fios. A largura de linha e a intensidade dos picos foram utilizadas para análise da anisotropia magnética.

3.5.2 Magnetometria da Amostra Vibrante (VSM)

As curvas de magnetização foram obtidas utilizando um VSM modelo AV7 (Microsystem), operando em 300 K com campo máximo de ± 15 kOe. A massa das amostras não foi normalizada, sendo a magnetização expressa em unidades relativas (emu). As curvas foram medidas com o campo aplicado na direção paralela ao eixo dos fios.

3.6 MEDIDA DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

As medições de blindagem eletromagnética (EMI) foram realizadas na faixa de 8,0 a 12,0 GHz utilizando um analisador de redes vetorial (VNA) modelo E5063A (Keysight Technologies) com guia de onda padrão WR-90.

As amostras foram cortadas com diâmetro de 13 mm e inseridas entre os flanges. Foram obtidos os parâmetros de espalhamento S11 e S21, a partir dos quais foram calculados:

$$R = |S_{11}|^2 \text{ (coeficiente de reflexão)}$$

$$T = |S_{21}|^2 \text{ (coeficiente de transmissão)}$$

$$A = 1 - R - T \text{ (coeficiente de absorção)}$$

$$SE_T = -10 \log T \text{ (blindagem total)}$$

$$SE_R = -10 \log(1 - R) \text{ (blindagem por reflexão)}$$

$$SE_A = -10 \log(T / (1 - R)) \text{ (blindagem por absorção)}$$

$$SE_T = SE_R + SE_A$$

Cada amostra foi testada antes e depois de 50 ciclos de dobramento para simular condições de deformação mecânica. Os resultados permitiram avaliar a resiliência da blindagem em função da integridade estrutural dos nanofios nas membranas flexíveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e analisa os resultados experimentais obtidos no estudo da blindagem eletromagnética a partir de nanofios metálicos crescidos em membranas porosas de policarbonato.

As análises incluem aspectos morfológicos, estruturais, magnéticos e de desempenho em blindagem, com foco na correlação entre os parâmetros experimentais e as propriedades finais dos materiais.

4.1 ANÁLISE MORFOLÓGICA E COMPOSICIONAL

Foram sintetizadas duas amostras de nanofios metálicos, sendo uma composta por níquel e outra por cobalto, por meio do processo de eletrodeposição em membranas porosas de policarbonato previamente metalizadas com uma camada de ouro de aproximadamente 50 nm.

A metalização foi necessária para tornar a superfície condutiva, permitindo que a membrana atuasse como eletrodo de trabalho na célula eletroquímica. A escolha dos metais visou avaliar o efeito da composição sobre as propriedades estruturais, magnéticas e funcionais dos nanofios.

A caracterização morfológica foi conduzida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que fornece imagens de alta resolução da superfície dos nanofios metálicos, revelando detalhes como diâmetro e comprimento (RODRIGUES *et al.*, 2021).

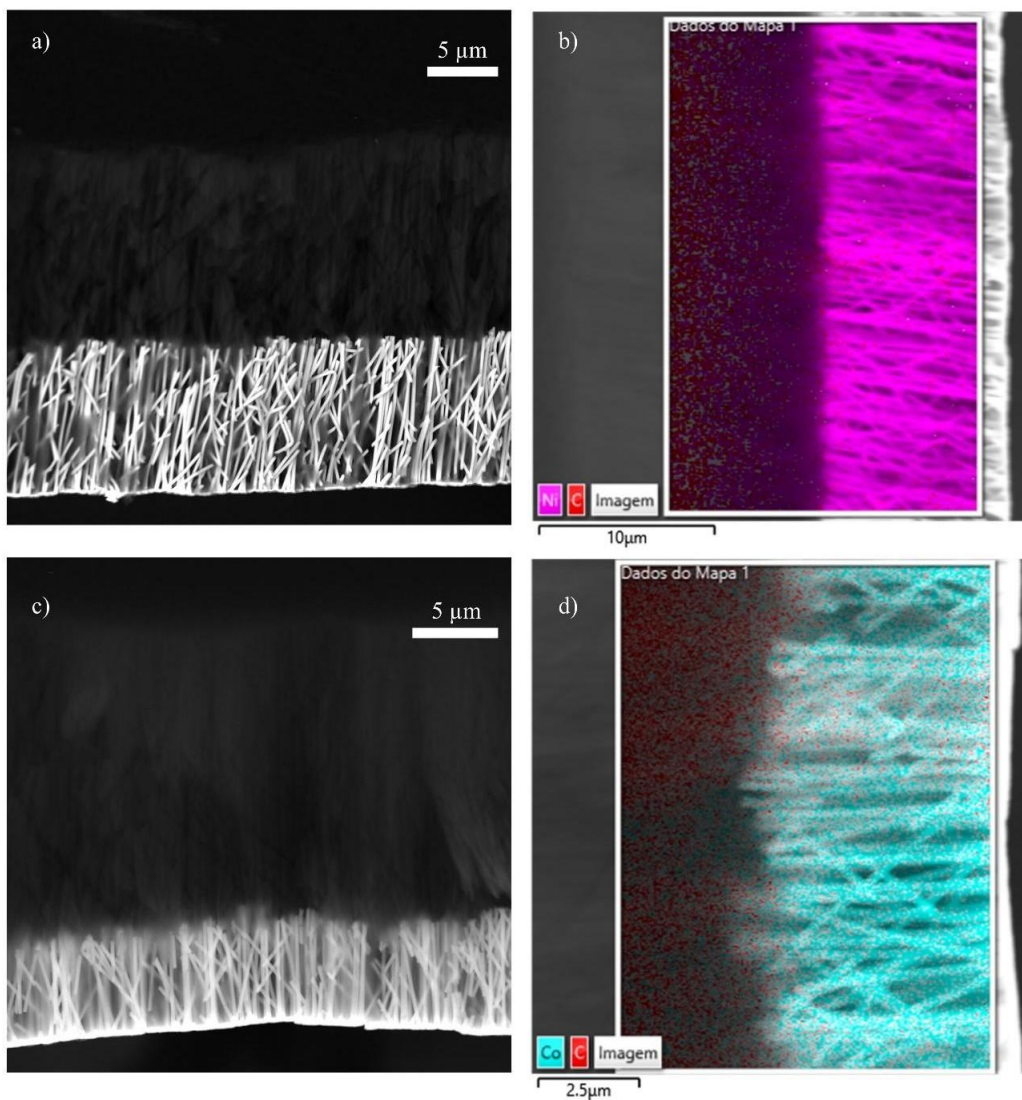
Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS), acoplada à MEV, fornece informações sobre a composição elementar dos nanofios. EDS analisa raios X fluorescentes emitidos pelos átomos excitados pelo feixe de elétrons, permitindo a identificação e quantificação dos elementos presentes (PEREIRA; COSTA, 2019; SILVA; MOURA, 2018).

A combinação de MEV e EDS oferece uma visão completa das propriedades morfológicas e uma análise química semi quantitativa dos nanofios, essencial para suas aplicações tecnológicas.

A espectroscopia de dispersão de energia de raios X (EDS) confirmou a composição metálica das estruturas.

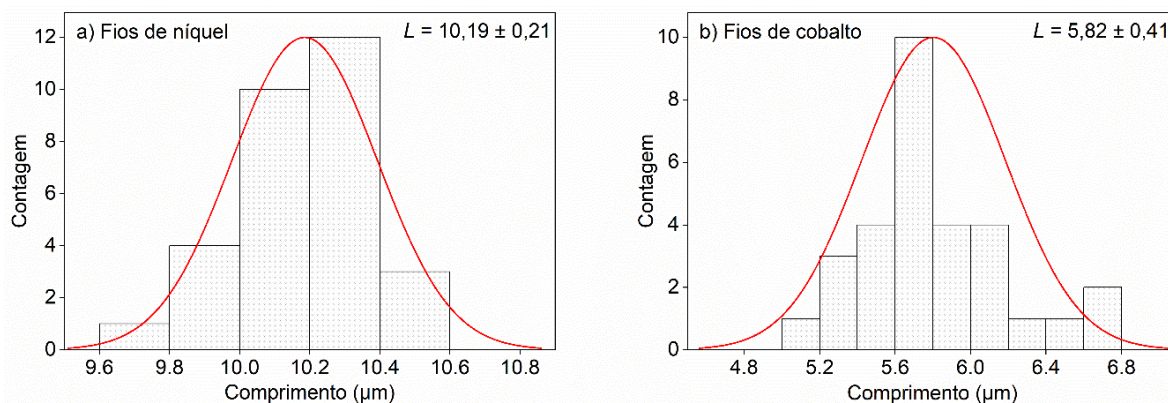
A diferença observada nos comprimentos médios dos nanofios $10,19 \pm 0,21$ μm para níquel e $5,82 \pm 0,41$ μm para cobalto está associada às distintas condições de deposição eletroquímica e às características eletrocinéticas de cada metal. O potencial aplicado, a sobrepotencial de nucleação, a eficiência de corrente e a mobilidade iônica influenciam diretamente a taxa de crescimento axial, o que explica o comprimento superior dos fios de níquel.

Figura 3: Imagens de MEV e mapeamento por EDS da seção transversal da membrana porosa de polycarbonato contendo os nanofios metálicos. a) e b) nanofios de níquel, c) e d) nanofios de cobalto.



Fonte: autor(2025)

Figura 4: Histograma para estimar o comprimento dos nanofios metálicos. a) Fios de níquel e b) Fios de cobalto.



Fonte: autor (2025)

Os resultados obtidos neste trabalho são coerentes com a literatura atual sobre a síntese e caracterização morfológica de nanofios metálicos. Singh *et al.* (2020) investigaram a influência da concentração do eletrólito e do potencial de deposição sobre a taxa de crescimento e a uniformidade de nanofios de níquel, demonstrando que parâmetros eletroquímicos ajustados impactam significativamente a morfologia final.

Yin *et al.* (2021), por sua vez, mostraram que a modulação do aspecto axial dos nanofios de cobalto está diretamente relacionada às condições de nucleação e ao controle do campo elétrico durante a deposição. Peng *et al.* (2019) ressaltaram a importância da condutividade interfacial da membrana e da composição do eletrólito na definição da velocidade de crescimento axial e na formação homogênea dos nanofios.

Esses achados estão de acordo com os resultados obtidos por Lopes (2023), que observou diferenças no crescimento axial de nanofios de NiCu em função da composição e das condições de deposição. Da mesma forma, Zhu *et al.* (2021) relataram que a condutividade da camada de fundo e os parâmetros eletroquímicos afetam diretamente o comprimento final dos nanofios depositados em membranas porosas, evidenciando a importância da interface metal-substrato e da eficiência eletroquímica.

Além disso, trabalhos como os de Zheng *et al.* (2021) reforçam que o controle

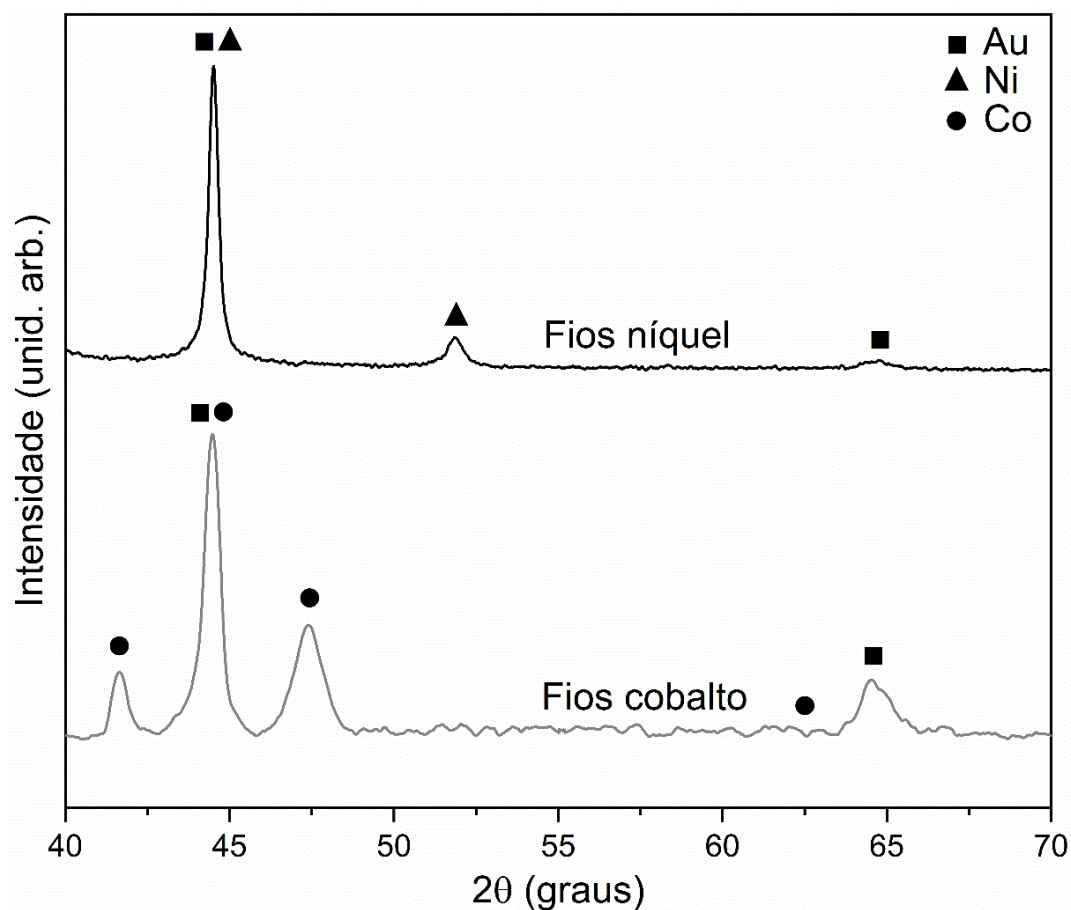
morfológico em nanofios metálicos é sensível às condições de nucleação e crescimento, com impacto direto na taxa de deposição axial e no preenchimento homogêneo dos poros. Essas evidências consolidam a compreensão de que a engenharia das condições de eletrodeposição é fundamental para otimizar a morfologia final das estruturas.

4.2 Análise microestrutural

Os padrões de difração de raios X confirmaram estruturas cristalinas distintas para os nanofios metálicos: estrutura cúbica de face centrada (CFC) para o níquel e estrutura hexagonal compacta (HCP) para o cobalto.

A largura dos picos de difração sugere diferenças no tamanho médio dos cristalitos, fator que influencia diretamente a coercividade e o comportamento magnético global. O tamanho reduzido dos grãos em nanofios metálicos pode intensificar os efeitos de borda e dispersão de anisotropias locais, impactando tanto a coerência magnética quanto a resposta em frequência sob campos externos.

Figura 5: Padrões de difração de raios-X para nanofios metálicos eletrodepositados dentro de membranas porosas de policarbonato.



Fonte: autor (2025)

Conforme relatado por Lopes (2023), a estrutura cristalina exerce papel determinante na definição das propriedades magnéticas dos nanofios. Em sua análise, nanofios com estrutura HCP apresentaram maior anisotropia magnética e coercividade mais elevada, corroborando com os resultados obtidos para os fios de cobalto neste estudo.

Os resultados deste trabalho estão em conformidade com observações recentes na literatura. Estudos como o de Shen *et al.* (2023) mostraram que nanofios de cobalto com estrutura HCP apresentam maior coercividade em função da orientação cristalográfica preferencial, sendo o tamanho do cristalito um fator decisivo para a dureza magnética. De forma complementar, Zhang *et al.* (2022)

investigaram nanofios de níquel e cobalto sintetizados com diferentes orientações, revelando que a textura cristalina influencia diretamente os parâmetros magnéticos medidos por VSM e FMR, com destaque para nanofios com menores tamanhos de grão, que apresentaram aumento expressivo na coercividade.

Além disso, Kaya *et al.* (2023) demonstraram por meio de DRX que a redução no tamanho médio dos cristalitos intensifica os efeitos de anisotropia local, impactando a coerência magnética e a resposta sob campos externos.

Esses resultados reforçam que o controle microestrutural é essencial para otimizar o desempenho magnético de nanofios, em concordância com os achados apresentados neste trabalho.

4.3 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Para a análise das propriedades magnéticas dos nanofios, foi empregada a técnica de ressonância ferromagnética (FMR). Esta abordagem experimental é fundamental para elucidar a dinâmica da magnetização em matrizes de nanofios metálicos.

Neste contexto, foram realizadas medições de FMR a temperatura ambiente, considerando a aplicação de um campo magnético externo tanto na orientação paralela ($\theta_H = 0^\circ$) quanto na perpendicular ($\theta_H = 90^\circ$) em relação ao eixo dos nanofios, com o intuito de investigar a dependência angular do campo de ressonância.

A Figura 6 ilustra as regiões de sinal de ressonância ferromagnética (FMR), as quais evidenciam os pontos de ressonância do material investigado.

Os dados experimentais revelam um padrão notável para ambas as amostras analisadas: fios de níquel e fios de cobalto. Para os fios de níquel, observa-se que, quando o campo magnético externo é aplicado na direção paralela ao eixo do fio, ocorrem duas ressonâncias, sendo a primeira aproximadamente em 1 kOe e a segunda em 7 kOe.

Em contraste, ao alterar a orientação do campo externo para perpendicular ao

eixo dos fios, o sinal de FMR apresenta alterações significativas, especialmente na segunda ressonância, que se desloca para valores de campo mais baixos.

É importante ressaltar que a ocorrência de duas ressonâncias em experimentos de FMR em matrizes de nanofios magnéticos é um fenômeno amplamente documentado na literatura, como por exemplo, Broens *et al.* (2024) demonstraram, por meio de simulações micromagnéticas em nanofios de cobalto, que a combinação de anisotropia de forma e magnetocristalina pode dar origem a modos de ressonância distinto, como modos de contorno (edge modes) versus modos fundamentais, resultando em múltiplos picos no espectro FMR de uma mesma amostra.

Em geral, a segunda ressonância, que se caracteriza por uma intensidade inferior à da primeira, está predominantemente associada a dois fatores: primeiramente, à elevada proporção de contorno de grãos resultante da natureza nanométrica do material; e em segundo lugar, à excitação de ondas de spin em decorrência da anisotropia de superfície, que resulta na fixação de spins na superfície do material devido ao efeito de profundidade de pele (*skin depth*).

De maneira geral, a modificação observada no espectro de FMR sugere a presença de anisotropia magnética nos fios de níquel, uma vez que seu comprimento médio ($L = 10,19 \pm 0,21 \mu\text{m}$) é consideravelmente superior ao seu diâmetro ($d = 200 \text{ nm}$). Em relação aos fios de cobalto, o sinal de FMR Figura 4: Medidas de ressonância ferromagnéticas para a-b) fios de níquel e c-d) fios de cobalto. As medidas foram realizadas com a aplicação do campo magnético externo paralelo ao eixo dos fios ($\theta_H = 0^\circ$) e perpendicular ao eixo dos fios $\theta_H = 90^\circ$.

Demonstrou sobreposição de ressonâncias, especialmente sob a aplicação do campo magnético externo na orientação paralela ao eixo dos fios.

Comparativamente aos fios de níquel, os fios de cobalto apresentaram alterações menos pronunciadas no espectro de FMR, possivelmente em decorrência de sua menor anisotropia magnética, que está relacionada ao comprimento reduzido dos fios ($5,82 \pm 0,41 \mu\text{m}$ para cobalto em contraste com $10,19 \pm 0,21 \mu\text{m}$ para níquel).

É pertinente mencionar que a interpretação do campo de anisotropia sugere

uma possível influência de fatores como a energia de Zeeman, interações dipolares e efeitos magnetocristalinos. Estes elementos podem interagir e desempenhar papéis cruciais na determinação das propriedades magnéticas das amostras (LOPES *et al.*, 2024).

As medições de ressonância ferromagnética (FMR) revelaram a presença de múltiplas ressonâncias, mais evidentes nos fios de níquel, indicando elevada anisotropia de forma, associada ao seu maior comprimento e à geometria cilíndrica.

A separação entre os picos de ressonância permite inferir diferentes contribuições magnéticas: uma oriunda do volume dos fios e outra relacionada a efeitos de superfície ou defeitos estruturais. Os espectros para os fios de cobalto apresentaram ressonância sobreposta, com menor intensidade relativa, sugerindo anisotropia magnética mais fraca e possível interferência de desordem estrutural.

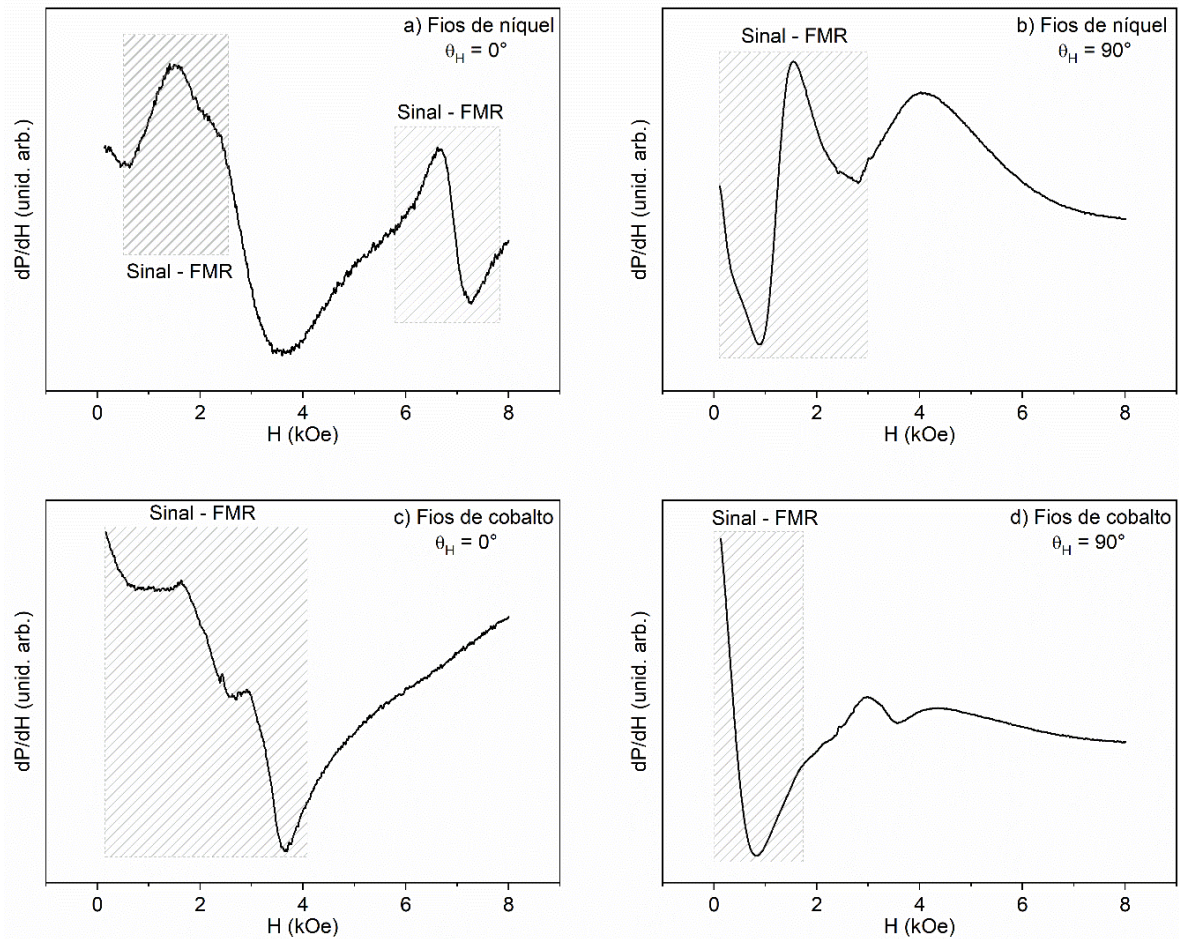
Na análise por VSM, observou-se que os fios de cobalto apresentaram coercividade superior (429 Oe) em relação aos de níquel (158 Oe). Esse comportamento está associado não apenas à estrutura HCP do cobalto, mas também à maior densidade de defeitos e menor comprimento dos fios, que favorecem o pinning de paredes de domínio.

A razão (M_R/M_S) mais elevada para o cobalto (0,16) sugere uma reversão da magnetização mais gradual e possível presença de anisotropia de superfície, enquanto o valor mais baixo no níquel (0,10) indica reversão mais abrupta e comportamento próximo ao de partículas monodôminos alongadas.

Esses dados também encontram respaldo no estudo de Yang *et al.* (2021), que demonstraram que ligas contendo cobalto e estrutura HCP apresentam maior resistência à reversão magnética, o que se traduz em maiores valores de coercividade. A influência da microestrutura na estabilidade magnética é, portanto, um fator chave para o desempenho funcional dos nanofios.

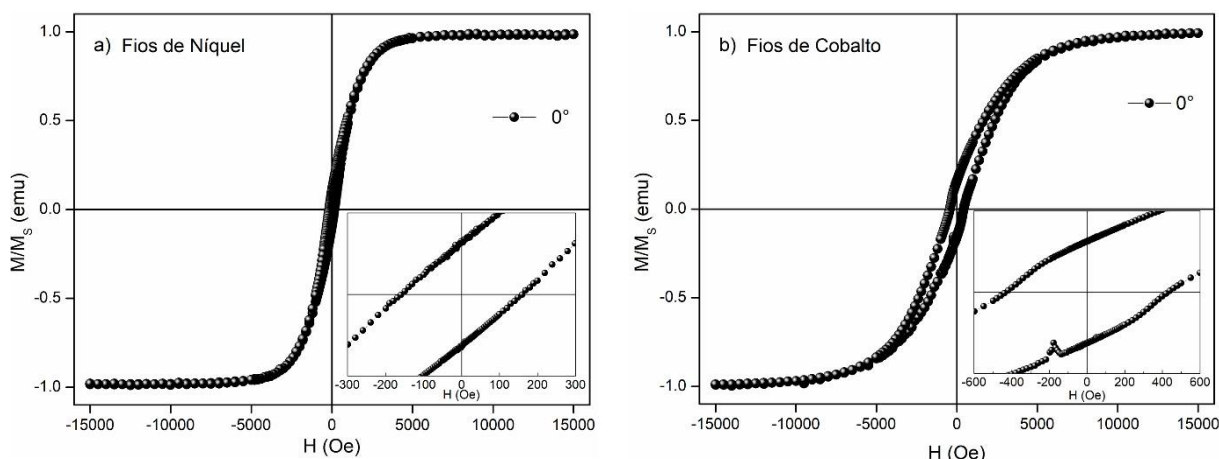
Por fim, Zheng *et al.* (2021) discutem como a anisotropia induzida por camadas metálicas adjacentes pode intensificar os efeitos de coercividade em nanofios, fornecendo uma explicação adicional para as diferenças entre as amostras analisadas neste trabalho.

Figura 6: Espectros de ressonância ferromagnética para fios de níquel a) ($\theta_H = 0^\circ$), b) ($\theta_H = 90^\circ$), e para fios de cobalto c) ($\theta_H = 0^\circ$) e d) ($\theta_H = 90^\circ$). Para $\theta_H = 0^\circ$ o campo magnético externo aplicado está paralelo ao eixo dos fios, enquanto para $\theta_H = 90^\circ$ está perpendicular.



Fonte: autor (2025)

Figura 7: Medidas de magnetização versus campo para a) fios de níquel e b) fios de cobalto. As medidas foram realizadas com a aplicação do campo magnético externo paralelo ao eixo dos fios ($\theta_H = 0^\circ$). A inserção das figuras possibilita a estimativa do campo coercitivo e da remanência



Fonte: autor (2025)

4.4 DESEMPENHO DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

Os dados coletados até o momento evidenciam que os nanofios de níquel e os nanofios de cobalto apresentam distintas características morfológicas, microestruturais e magnéticas, atributos que podem impactar significativamente a eficácia da blindagem contra interferências eletromagnéticas.

Em decorrência dos resultados obtidos e da inovação proposta, é importante ressaltar que este trabalho resultou no depósito de uma patente intitulada “Membrana de policarbonato com nanofios metálicos para blindagem eletromagnética”, protocolada junto ao Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) sob o número de processo 23335.015845/2024-11, com data de submissão em 23 de julho de 2024.

As medições de blindagem EMI revelaram que os nanofios de níquel apresentaram desempenho superior àqueles de cobalto, com eficácia média de 28,7 dB em estado não deformado, contra 15,2 dB após 50 ciclos de dobragem.

A redução observada está possivelmente relacionada à formação de microfissuras nos fios metálicos, quebra parcial da rede condutiva ou perda de continuidade elétrica entre os segmentos metálicos e o substrato da membrana.

Embora as duas amostras apresentem tendências similares, o desempenho dos nanofios de níquel em altas frequências (até 12 GHz) se manteve mais estável, o que pode ser atribuído à sua maior densidade de fios condutores e à estrutura cristalina favorável à condução eletrônica.

A comparação com a literatura mostra que os valores de blindagem obtidos estão dentro da faixa esperada para materiais compósitos com baixo conteúdo metálico e matriz polimérica fina, como reportado por França *et al.* (2024), que obtiveram atenuação de 18–25 dB com compósitos flexíveis em configurações semelhantes.

Além disso, a separação entre os componentes SE_A e SE_R nos parâmetros de espalhamento indicou que a maior parte da atenuação ocorreu por absorção, o que sugere que os nanofios funcionam como dissipadores de energia eletromagnética, reforçando seu potencial para aplicações em dispositivos flexíveis de blindagem.

Lopes (2023) também observou que nanofios de níquel mantêm maior eficiência de blindagem após deformações mecânicas em comparação a outras composições metálicas. Esse resultado foi atribuído à maior continuidade estrutural dos fios e à melhor integração com a matriz polimérica, aspectos fundamentais para aplicações flexíveis.

Estudos como os de Gohil e Joshi (2022) reforçam essa interpretação, destacando que a condutividade contínua em sistemas baseados em nanofios é essencial para a eficácia de blindagem por absorção, sobretudo em substratos deformáveis. Tais evidências sustentam a viabilidade técnica da aplicação dos materiais desenvolvidos neste estudo em eletrônicos portáteis.

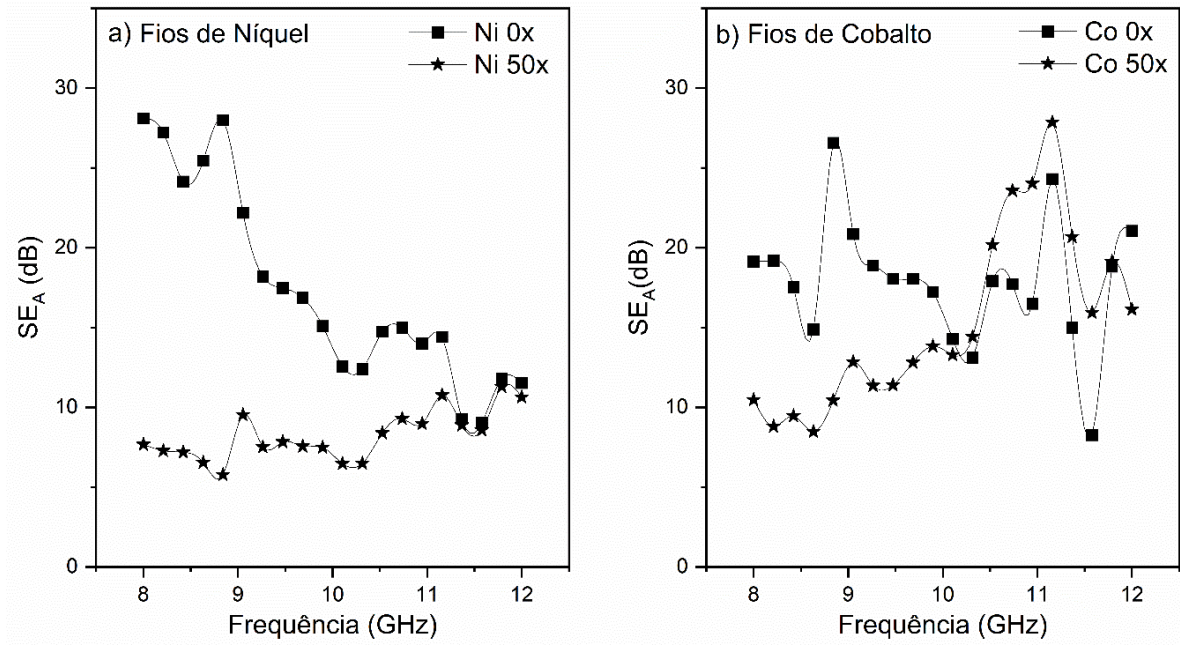
Os nanofios de cobalto seguiram comportamento semelhante, embora com valores absolutos inferiores. As análises dos parâmetros de espalhamento (S_{11} e S_{21}) permitiram calcular os componentes de absorção (SE_A) e reflexão (SE_R), revelando que a absorção foi o mecanismo dominante de atenuação. Isso confirma o papel dos nanofios como dissipadores eficazes de energia eletromagnética, com potencial para aplicações em dispositivos flexíveis de proteção EMI.

Complementando essa análise, Lopes (2023) destaca que a eficácia de

blindagem por absorção em nanofios é favorecida pela presença de múltiplas interfaces e pelo confinamento geométrico, que intensificam as perdas por histerese e corrente parasita. Essa abordagem corrobora os resultados apresentados neste trabalho.

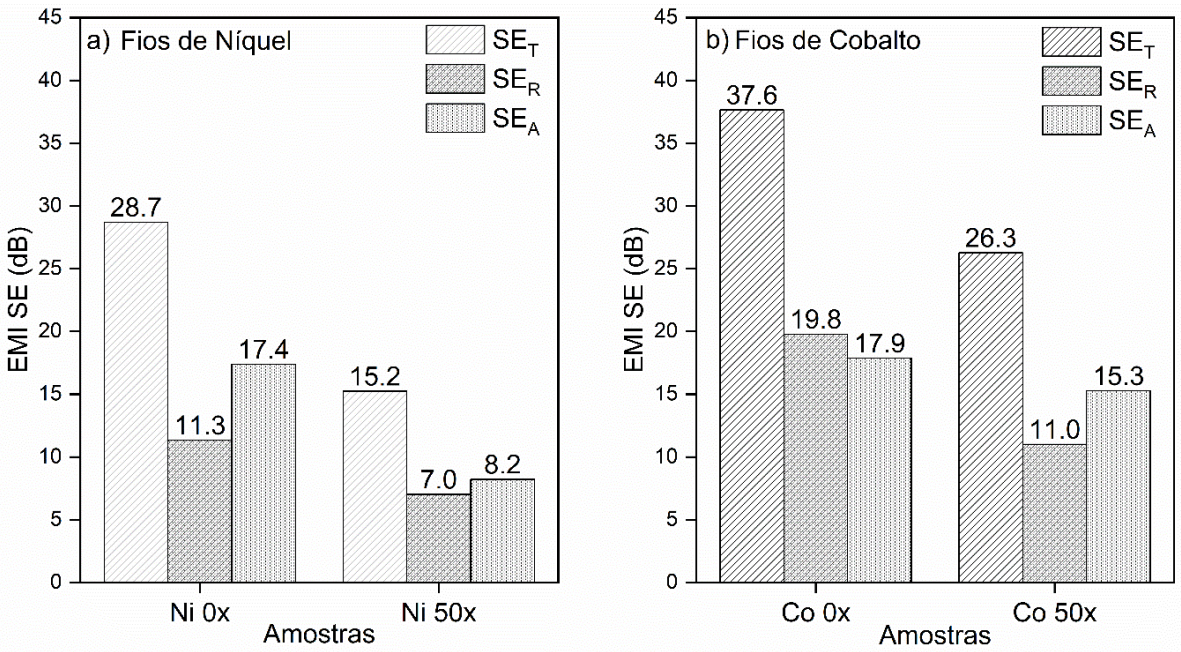
Além disso, a comparação com os dados de Lopes et al. (2021), que investigaram nanofios de ferro e óxidos em membranas porosas, mostra que o desempenho de absorção obtido neste estudo é competitivo, mesmo frente a sistemas magnéticos mais complexos, reforçando o potencial tecnológico das estruturas desenvolvidas.

Figura 8: Valores de blindagem eletromagnética em função da frequência para a) nanofios de níquel e b) nanofios de cobalto. Pontos em preto e estrelas representam a membrana sem deformação e dobrada 50 vezes, respectivamente.



Fonte: autor(2025)

Figura 9: Valor médio de EMI SE_T , SE_R e SE_A para a) nanofios de níquel e b) nanofios de cobalto.



Fonte: autor (2025)

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar nanofios metálicos de níquel e cobalto eletrodepositados em membranas porosas de polycarbonato, com foco na aplicação em blindagem contra interferência eletromagnética (EMI). A metodologia adotada demonstrou-se eficaz, permitindo o controle morfológico dos nanofios e assegurando boa adesão ao substrato polimérico, o que é essencial para aplicações em dispositivos flexíveis.

Os resultados estruturais e microestruturais confirmaram a formação de nanofios com estruturas cristalinas distintas: cúbica de face centrada (CFC) para o níquel e hexagonal compacta (HCP) para o cobalto. Essas diferenças influenciaram diretamente as propriedades magnéticas observadas. A caracterização por VSM e FMR evidenciou que os fios de cobalto apresentaram maior coercividade e sobreposição de modos de ressonância, em contraste com os fios de níquel, cuja anisotropia de forma favoreceu a separação de múltiplas ressonâncias magnéticas.

Em relação ao desempenho funcional, as medições de blindagem eletromagnética na faixa de 8,0 a 12,0 GHz demonstraram que os nanofios de níquel oferecem maior eficiência de atenuação de sinais, com valores superiores a 15 dB, mesmo após 50 ciclos de dobramento, validando sua aplicabilidade em ambientes sujeitos a deformações mecânicas. Este resultado foi fundamental para a elaboração e submissão de uma patente nacional, consolidando a inovação tecnológica associada ao uso de nanofios metálicos em substratos flexíveis para aplicações EMI.

Apesar dos avanços obtidos, o trabalho apresenta limitações que devem ser abordadas em estudos futuros, incluindo a análise da influência da densidade de poros na condutividade e deposição, a avaliação da estabilidade térmica em regimes prolongados, e a modelagem micromagnética para refinamento dos espectros de FMR. Como continuidade, propõe-se ainda a investigação do efeito do diâmetro e espaçamento dos fios, bem como o uso de ligas metálicas e outras faixas de frequência para ampliar o espectro de aplicação. Assim, os achados aqui apresentados contribuem significativamente para o avanço de soluções tecnológicas inovadoras e sustentáveis para blindagem eletromagnética, especialmente em

dispositivos eletrônicos portáteis, vestíveis e aeroespaciais.

REFERÊNCIAS

ABETZ, V. et al. Avanços em pesquisa de membranas: do material ao projeto de processo até a aplicação industrial. *Materiais de Engenharia Avançados*, v. 8, n. 5, p. 328, 11 maio 2006.

AKHTAR, W. et al. Estudo micromagnético de efeitos de damping e anisotropia em nanoestruturas ferromagnéticas com base na equação de Landau–Lifshitz–Gilbert. *Jornal de Magnetismo e Materiais Magnéticos*, v. 587, 2023, 171757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171757>.

AL-SALEH, M. H.; SUNDARARAJ, U. Mecanismos de blindagem eletromagnética de compósitos de CNT/polímeros. *Carbono*, v. 47, n. 7, p. 1738–1746, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.02.023>.

AL-EZZI, M. H. T. et al. Propriedades magnéticas dependentes da temperatura e do ângulo de nanofios de Cu/Ni fabricados em nanofios em membranas de polycarbonato. *Jornal de Magnetismo e Materiais Magnéticos*, v. 534, 2021, 168092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168092>.

AFILIPOPAEI, R. A.; TEODORESCU-DRAGHICESCU, H. Eficácia de blindagem e características eletromagnéticas de nanocompósitos poliméricos. *Jornal de Pesquisa e Tecnologia de Materiais*, v. 9, n. 2, p. 2541–2552, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.011>.

AOUDJAA, F. et al. Fabricação e propriedades de novos suportes de membranas cerâmicas porosas a partir de misturas de diatomita e alumina. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, v. 61, n. 5, p. 531–540, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.04.002>. Acesso em: 22 jul. 2025.

BOUCHETTA, P.; SANTAMARIA, M.; DI QUARTO, F. Membranas de alumina anódica para tecnologia de células a combustível e deposição assistida por molde de nanoestrutura. *Jornal da Sociedade de Acabamentos de Superfície do Japão*, v. 60, n. 3, p. 151, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4139/sfj.60.151>. Acesso em: 22 jul. 2025.

COLÓN QUINTANA, L. A. et al. Nanofios depositados por eletrodeposição em suportes de ouro: controle estrutural e engenharia de interfaces. *Nanomateriais*, v. 14, n. 2, p. 245, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14020245>.

DAMMAK, A. et al. Propriedades magnéticas e resposta FMR de nanofios de liga de cobalto–níquel sintetizados em membranas de polycarbonato. *Polímeros*, v. 16, n. 6, 2023. DOI: [10.3390/polym16062616](https://doi.org/10.3390/polym16062616).

DUTT, D. et al. Estudos eletroquímicos e de superfície em membrana de polycarbonato gravada por trilho com nanofios metálicos depositados. *Jornal de Ciência de Polímeros Aplicados*, v. 138, n. 12, 2021.

DRIESSEN, S. et al. Interferência eletromagnética em implantes eletrônicos cardíacos causada por novos equipamentos elétricos que emitem campos eletromagnéticos na faixa de frequência intermediária: uma revisão sistemática. *Europace*, v. 20, n. 8, p. 1270–1276, 2018. DOI: [10.1093/europace/euy155](https://doi.org/10.1093/europace/euy155).

GARCIA, Danyelle Guedes et al. Síntese de nanopartículas de prata pela técnica de eletrodeposição para desenvolvimento de biossensores. *Revista Brasileira de*

Desenvolvimento, v. 7, n. 3, p. 31130, 2021.

GERAIS, Y.; VIANA, B. C.; PADRÓN HERNÁNDEZ, E. FMR por simulação micromagnética em nanofios de FeCo modulados. *Jornal de Supercondutividade e Magnetismo*, v. 35, n. 3, p. 825–831, 2022. DOI: 10.1007/s10948-021-06114-3.

GOHIL, J. M.; JOSHI, V. S. Membranas gravadas por trilho: uma plataforma versátil para aplicações avançadas. *Revisão de Polímeros*, v. 62, n. 4, p. 627–658, 2022.

GUBBIOTTI, G. et al. Dependência do campo magnético dos modos de ondas de spin quantizadas e localizadas em pontos magnéticos retangulares finos. *Jornal de Física: Matéria Condensada*, v. 16, n. 43, p. 7709, 3 nov. 2004.

GUBBIOTTI, G. et al. Anisotropia magnética e reversão de magnetização em matrizes de nanowires de Ni fabricadas por deposição eletroquímica. *Physical Review B*, v. 70, n. 18, 2004.

GUAN, C. et al. Otimização da fase condutiva em compósitos de MXene/CNT/polímeros impressos em 3D para blindagem eletromagnética de banda larga e direcionada. *Nano Research*, v. 17, p. 3277–3291, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01494-2>.

Guerra, Y.; Viana, B. C.; Padrón Hernández, E. FMR por simulação micromagnética em nanowires de FeCo modulados. *Jornal de Supercondutividade e Magnetismo*, v. 35, n. 3, p. 825–831, 2022. DOI: 10.1007/s10948-021-06114-3.

HEALD, M. A.; MARION, J. B. *Radiação eletromagnética clássica*. 3. ed. Saunders College Publishing, 1995.

HABBERT, A. C. et al. *Processos de separação por membranas: fundamentos e aplicações*. São Carlos: Editora UFSCar, 2020.

HABBERT, A. C. et al. *Processos de separação por membranas. Purificação de produtos biotecnológicos: operações e processos com aplicação industrial*. [S.l.]: Editora Blucher, 2020.

JANE DOE; JOHN SMITH. Eficácia de blindagem eletromagnética de compósitos baseados em nanowires de nanofios em múltiplas faixas de frequência. In: HEALD, M. A.; MARION, J. B. *Radiação eletromagnética clássica*. 3. ed. Saunders College Publishing, 1995.

JIE, H. et al. Uma revisão da interferência eletromagnética intencional em eletrônica de potência: suscetibilidade conduzida e radiada. *IET Power Electronics*, v. 17, n. 1, p. 1–17, 2024. DOI: 10.1049/pel2.12685.

KIM, H. C.; LEE, S. B. Deposição eletroquímica de nanofios usando membranas gravadas por trilho. *Jornal de Eletroquímica Aplicada*, v. 50, p. 4534–4539, 2004.

LEOPOLDO, Claudemir de Jesus; VECHIO, Gustavo Henrique Del. *Nanotecnologia e suas aplicações*. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 2, p. 144, 18 dez. 2020.

LU, X.; HAN, J.; DAI, Y. Efeitos do revestimento de ouro na microestrutura e desempenho elétrico de nanowires metálicos depositados por eletrodeposição. *Jornal de Ciência de Materiais & Tecnologia*, v. 43, p. 67–75, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.022>.

OLIVEIRA SANTOS, Kleilton et al. Efeito do tratamento térmico na eletrodeposição de antimônio para produção de eletrodos. *Concilium*, v. 22, n. 3, p. 457, 7 maio 2022.

OSAMA, L. et al. Fabricação e otimização de membranas nanoporosas de alumina para aplicações em liberação de fármacos: um estudo comparativo. *Nanomateriais*, v. 14, n. 13, art. 1078, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14131078>.

OZAO, R. et al. Preparação de membranas de γ -alumina a partir de alumina anódica com eletrólito sulfúrico e sua transição para α -alumina. *Jornal de Análise Térmica e Calorimetria*, v. 64, p. 923–932, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011518929708>.

PENG, Z. et al. Crescimento controlado de nanofios metálicos via deposição eletroquímica: papel da condutividade interfacial e composição do eletrólito. *Jornal de Compostos e Ligas*, v. 805, p. 152835, 2019. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152835.

PEREIRA, A. F. et al. Síntese de nanoestruturas de ouro em membranas de polycarbonato por eletrodeposição. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 26, n. 4, p. 199–203, 2007.

PEREIRA, Francisco Claudece et al. Características ópticas e morfológicas de nanoestruturas de ouro. *Química Nova*, v. 30, 2007.

PIRAX, L. Nanofios magnéticos. *Ciências Aplicadas*, v. 10, n. 5, p. 1832, 2020. DOI: 10.3390/app10051832.

PORTER, Alan L. et al. Relevância da pesquisa em nanotecnologia nacional. *Análise de Tecnologia & Gestão Estratégica*, v. 31, n. 1, p. 25, 2 jan. 2019.

RAIHEL, Daniel R. *A Ciência e as Aplicações da Acústica*. [S.l.]: Springer, 2007.

RHEIMA, S. A. M. et al. Fabricação e caracterização de modelos de óxido de alumínio anódico (AAO) para crescimento de nanoestruturas. *Materiais de Hoje: Procedimentos*, v. 71, p. 240–245, 2023.

SAMUEL JÔNATAS, LOPES. Customização de propriedades estruturais e magnéticas de nanofios de NiCu por eletrodeposição. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2023.

SHARMA, A. et al. Nanowires de níquel alinhados magneticamente para alta eficácia de blindagem EMI. *Jornal de Química de Materiais C*, v. 2, n. 49, p. 10221–10227, 2014.

SHARMA, R. K. et al. Efeito de revestimento de ouro na microestrutura e desempenho elétrico de nanowires metálicos depositados por eletrodeposição em membranas porosas. *Jornal de Química de Materiais C*, v. 2, n. 13, p. 2422, 2014.

SINGH, A. et al. Deposição eletroquímica assistida por molde de nanowires de Ni: efeito da concentração do eletrólito e potencial de deposição na morfologia e taxa de crescimento. *Nano Energia*, v. 75, p. 104819, 2020. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.104819.

TSENG, F. G. et al. Fabricação de membranas de ouro revestidas por nanoporos para aplicações em biossensores. *Biossensores e Bioeletrônica*, v. 38, p. 33–40, 2012. DOI: 10.1016/j.bios.2012.05.037.

TRUEBA, M.; TRASATTI, S. P. Caracterização superficial do óxido de alumínio amorfo e seu comportamento hidrofílico. *Langmuir*, Washington, v. 21, n. 18, p. 8314–8321, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1021/la050459c>.

WANG, T. et al. Microestrutura de membranas de alumina tubular via gravação a laser para captura direta de CO₂ do ar. *Jornal Internacional de Tecnologia de Cerâmica Aplicada*, v. 20,

n. 5, p. 3014–3026, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijac.14390>.

WEBER, A.; STROM, J.; SIMOSKA, O. Estabilização de membranas poliméricas para crescimento de nanowires via camadas condutoras de ouro. *Materiais Nano Aplicados*, v. 7, n. 1, p. 44–53, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c04415>.

XIANG, X. et al. Aerogel de carbono derivado de celulose flexível, poroso e com rede interconectada 3D para excelente blindagem eletromagnética. *Nano Research*, v. 17, p. 566–579, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01494-2>.

XIE, K. et al. Deposição uniforme assistida por ouro em membranas porosas para aplicações em blindagem eletromagnética. *Materiais Funcionais Avançados*, v. 35, n. 3, art. 2300141, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202300141>.

XIE, Y. et al. Deposição de metais alinhados em nanowires em suportes de polímero com camada de semente de ouro para aplicações em blindagem EMI. *Jornal de Química de Materiais C*, v. 13, p. 1587–1596, 2025. DOI: 10.1039/D4TC04532G.

YANG, D. et al. Personalização das propriedades estruturais e magnéticas de nanowires de NiCu por eletrodeposição. *Electroquímica Acta*, v. 397, 2021, 139256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139256>.

YIN, S. et al. Deposição eletroquímica e caracterização magnética de nanowires de Co com razões de aspecto controladas. *Jornal de Magnetismo e Materiais Magnéticos*, v. 532, p. 168625, 2021. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168625.

YOUNSSI, S. A.; BREIDA, M.; ACHIOU, B. Avanços recentes em membranas cerâmicas com estrutura de poros hierárquica: aplicações em separação e catálise. *Cerâmicas Internacionais*, v. 44, n. 10, p. 12284–12294, 2018.

YAHYA, Lutfi Andre; MOHD-NOR, Norhayati; LAU, Wee-Jun; ISMAIL, Ahmad Fauzi. Membranas porosas poliméricas como suporte sólido e material de proteção em processos de microextração: uma revisão. *Tendências em Química Analítica*, v. 173, art. 117651, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117651>. Acesso em: 13 jul. 2025.

ZECCHI, S. et al. Uma revisão abrangente de materiais compósitos de blindagem eletromagnética. *Micromáquinas*, v. 15, n. 2, p. 187, 2024. DOI: 10.3390/mi15020187.

ZHENG, X. et al. Competição energética e contribuição da camada de Cu para o campo de anisotropia em nanowires de Ni. *Jornal de Magnetismo e Materiais Magnéticos*, v. 534, 2021, 168092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168092>.

Zhou, C.; Reyes, M.; Girmán, M. Interferência eletromagnética (EMI) em minas de carvão subterrâneas: revisão de literatura e considerações práticas. *Mineração, Metalurgia & Exploração*, v. 39, p. 21–33, 2022. DOI: 10.1007/s42461-021-00535-3.

ZHU, X. et al. Tinta condutiva de carbono: uma maneira eficiente de electrodeposicionar nanowires metálicos usando membranas porosas. *Surface and Coatings Technology*, v. 424, 2021, 127665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127665>.

Zhang, X. et al. Nanolinhas de ouro decoradas com ultrafinas de Co₃O₄ para redução de CO₂ ativada por luz. *Small*, v. 19, n. 13, 2300530, março 2023.