



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

PEDRO HENRIQUE PESSOA

Tese de Doutorado

**FABRICAÇÃO DE NANOESTRUTURAS LONGADAS DE GRANADA DE ÍTRIO E
FERRO ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) EM MEMBRANAS POROSAS DE ALUMINA ATRAVÉS DE
METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DE BAIXO CUSTO**

Recife
2024

PEDRO HENRIQUE PESSOA

**FABRICAÇÃO DE NANOESTRUTURAS ALONGADAS DE GRANADA DE ÍTRIO E
FERRO ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) EM MEMBRANAS POROSAS DE ALUMINA ATRAVÉS DE
METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DE BAIXO CUSTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência de Materiais. Área de concentração: Materiais não metálicos.

Orientador: Profº. Dr. Eduardo Padrón Hernández

Coorientadora: Profª Drª. Lilian Kássia Cavalcante da Silva de Assis

Recife
2024

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Mônica Uchôa, CRB4-1010

P475f Pessoa, Pedro Henrique.

Fabricação de nanoestruturas alongadas de granada de ítrio e ferro ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) em membranas porosas de alumina através de metodologia de deposição de baixo custo / Pedro Henrique Pessoa.– 2024.

102 f.: il., fig.

Orientador: Eduardo Padrón Hernández.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-graduação em Ciência de Materiais. Recife, 2024.

Inclui referências e anexos

1. Nanofios. 2. Óxidos magnéticos. 3. Granada de ferro-ítrio. 4. YIG. 5. Propriedades magnéticas. I. Hernández, Eduardo Padrón (orientador). II. Título.

620.19

CDD (23. ed.)

UFPE - CCEN 2024 – 70

PEDRO HENRIQUE PESSOA

**FABRICAÇÃO DE NANOESTRUTURAS LONGADAS DE GRANADA DE ÍTRIO E
FERRO ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) EM MEMBRANAS POROSAS DE ALUMINA ATRAVÉS DE
METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DE BAIXO CUSTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência de Materiais.

Aprovada em: 29/02/2024.

BANCA EXAMINADORA

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

Profª. Drª. Glória Maria Vinhas (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Frederico Duarte de Menezes (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Profº. Dr. Ramón Raudel Peña García (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profº. Dr. Mohammad Reza Dousti (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar saúde e inteligência para o desenvolvimento desta tese de doutorado e dos resultados aqui obtidos.

Dedico esta tese de doutorado ao meu pai Francisco, que se foi em março de 2021 acometido pela Covid-19. À minha mãe e aos meus irmãos pelo apoio e por todo carinho que me deram durante esse período. À Tobby e Luna, que foram companhias maravilhosas durante as noites em claro em todas as etapas da minha pós-graduação.

Ao meu orientador, Professor Doutor Eduardo Padrón Hernandez, por todo o aprendizado que continua me passando todos os dias, assim como sua compreensão devido aos problemas pessoais que enfrentei durante a pandemia. À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro, à CAPES, ao CNPq, ao FINEP, à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais pela estrutura física e suporte fornecidos a mim durante a realização desta pesquisa. Aos professores que me transmitiram excelente conhecimento durante as disciplinas cursadas no doutorado.

Aos meus colegas de laboratório do grupo Mesomag – Lilian, Laurertan, Adriana, Roberta, Alexsandro, Elias e muitos outros – por toda a ajuda que me deram durante a realização dos procedimentos experimentais e a avaliação dos resultados obtidos. Aos meus amigos de longa data pelo apoio e amizade depositados em mim ao longo de muitos anos, assim como pelas palavras de ânimo.

O meu muito obrigado a todos vocês!

“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua produção ou a sua construção”. (FREIRE, 2002, p. 12).

RESUMO

A granada de ferro-ítrio ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$), também conhecida por YIG, tem atraído bastante atenção devido a sua facilidade de magnetização, alta resistividade elétrica e baixa largura de linha de ressonância ferromagnética, tornando-o, assim, um excelente material para a fabricação de dispositivos de armazenamento magnético-ótico e de micro-ondas. Poucos são os estudos encontrados na literatura, utilizando nanofios de YIG, em especial, sintetizados com métodos químicos. Desta maneira, a proposta deste trabalho visa a deposição de nanofios de YIG em membranas porosas de alumina pelo método sol-gel, um método relativamente barato e prático, por meio de um processo de síntese constituído de materiais de baixo custo. Assim, nanoestruturas alongadas de YIG foram produzidas através de um sol composto de reagentes metálicos precursores, depositadas em membrana porosa de alumina e submetidas a tratamento térmico em forno elétrico a 900 °C por 2h. Nanopartículas de YIG também foram produzidas sob as mesmas condições para efeitos comparativos. Os resultados obtidos através de medidas de difração de raios-X e espectroscopia Raman, confirmaram a composição química do YIG e a presença de uma fase secundária de óxido de ítrio de ferro YFeO_3 , relativa a um dos componentes precursores formadores da granada. Análises de composição elementar, através de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), confirmaram proporções adequadas dos elementos constituintes da granada. Através de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível observar a formação de nanoestruturas alongadas no interior dos poros, de até 5 μm de comprimento. As amostras foram submetidas a análise magnética por VSM, apresentando efeito ferromagnético, com campos coercitivo e remanentes de 21 Oe e 0,03 emu/g, respectivamente. Por meio de medidas de ressonância ferromagnética foi possível observar baixa anisotropia nas amostras. Ensaio de blindagem magnética na banda X permitiram observar uma baixa blindagem média efetiva, sugerindo estudos futuros sobre o comportamento da blindagem em faixas eletromagnéticas mais baixas.

Palavras-chave: nanofios; óxidos magnéticos; granada de ferro-ítrio; YIG; propriedades magnéticas.

ABSTRACT

The yttrium iron garnet ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$), also known as YIG, has attracted a lot of attention due to its ease of magnetization, high electrical resistivity, and narrow ferromagnetic resonance line width, thus making it an excellent material for the development of magnetic-optical storage devices and microwave devices. There are few studies found in the literature using YIG nanowires, in particular, synthesized using chemical methods. Therefore, the purpose of this work aims to deposit YIG nanowires in porous anodic alumina membranes using the sol-gel method, a relatively inexpensive and practical one, through a synthesis process made up of low-cost materials. Thus, elongated YIG nanostructures were produced using a sol composed of precursor metallic reagents, deposited on a porous alumina membrane and subjected to heat treatment in an electric oven at 900 °C for 2h. YIG nanoparticles were also produced under the same conditions for comparative purposes. The results obtained through x-ray diffraction and Raman spectroscopy measurements confirmed the chemical composition of YIG and the presence of a secondary phase of yttrium iron oxide, YFeO_3 , related to one of the garnet's forming precursor components. Elemental composition analysis through energy dispersive spectroscopy (EDS) confirmed adequate proportions of the garnet's constituent elements. Through scanning electron microscopy (SEM) images, it was possible to observe the formation of elongated nanostructures inside the pores, up to 5 μm in length. The samples were subjected to magnetic analysis by VSM, showing a ferromagnetic effect, with coercive and remnant fields of 21 Oe and 0.03 emu/g, respectively. Through ferromagnetic resonance measurements, it was possible to observe low anisotropy in the samples. Magnetic shielding tests in the X band allowed observing a low average effective shielding, suggesting future studies on the behavior of shielding in lower electromagnetic bands.

Keywords: nanowires; magnetic oxides; yttrium-iron garnet; YIG; magnetic properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Orientação dos dipolos magnéticos para materiais diamagnéticos (superior) e paramagnéticos (inferior) em: campo nulo (a), campo aplicado (b) e diagrama magnetização versus campo aplicado (c).....	20
Figura 2 -	Esquema de domínios ferromagnéticos individuais existentes em um cristal não magnetizado(a), orientação dos íons magnéticos em uma rede antiferromagnética (b), e orientação dos íons magnéticos em uma rede ferrimagnética (c).....	22
Figura 3 -	Curva de histerese característica de uma ferrita dura.....	28
Figura 4 -	Esquema da estrutura cristalina de um espinélio na magnetita	29
Figura 5 -	Estrutura de magnetoplumbita da ferrita de bário.....	30
Figura 6 -	Estrutura cristalina do YIG, com sítios octaédricos em azul e sítios tetraédricos em verde. Partículas pretas são ítrio, enquanto que partículas vermelhas são oxigênio.....	31
Figura 7 -	Arranjo de cátions na célula unitária do YIG.....	32
Figura 8 -	Curva de histerese da magnetização de um fio de YIG paralelo e perpendicular a um campo magnético externo.....	38
Figura 9 -	Nanofios simples de diferentes diâmetros (a-b); nanofio segmentado (c) e nanofio com modulação de diâmetro (d).....	40
Figura 10 -	Processo de litografia óptica por aplicação de luz ultravioleta...	44
Figura 11 -	Processo de galvanização para obtenção de eletrodo de cobre revestido com níquel.....	45
Figura 12 -	Processo de galvanização sem eletrodo.....	46
Figura 13 -	Processo de deposição por camada atômica.....	47
Figura 14 -	Esquema de um processo de eletrofiação simples.....	48
Figura 15 -	Síntese sol-gel e suas principais ramificações e produtos finais obtidos.....	49
Figura 16 -	Esquema de um magnetômetro de amostra vibrante.....	51
Figura 17 -	Equipamento de FMR.....	53
Figura 18 -	Esquema do processo de medição por MFM.....	54

Figura 19 -	Representação esquemática de um magnetômetro SQUID....	55
Figura 20 -	Esquema do processo de medição por AGM.....	56
Figura 21 -	Componentes de uma onda eletromagnética, no mesmo sentido e perpendiculares entre si.....	58
Figura 22 -	Efeito de blindagem magnética em um circuito revestido por um material protetor.....	59
Figura 23 -	Esquema de síntese de solução precursora pelo método sol-gel.....	61
Figura 24 -	Esquema de deposição em membranas através do método sol-gel.....	63
Figura 25 -	Ângulo de contato de 35,4 ° uma gota de solução precursora em contato com membrana porosa de alumina.....	66
Figura 26 -	Difratograma de amostra de controle de membrana de alumina.....	67
Figura 27 -	Difratograma de amostra de nanopartículas de YIG submetidas a tratamento térmico da solução precursora a 900 °C por 2h.....	68
Figura 28 -	Difratograma de amostra de nanoestruturas alongadas de YIG submetidas a tratamento térmico a 900 °C por 2h.....	68
Figura 29 -	Espectros Raman de nanopartículas de YIG após tratamento térmico a 900 °C por 2h.....	71
Figura 30 -	Espectro Raman de nanoestruturas alongadas de YIG depositadas em membranas porosas de alumina após tratamento térmico a 900 °C por 2h.....	72
Figura 31 -	Microscopia eletrônica de varredura de vista superior de membrana de controle após tratamento térmico.....	74
Figura 32 -	Microscopia eletrônica de varredura de nanopartículas YIG, após tratamento térmico a 900 °C por 2h.....	75
Figura 33 -	Microscopia eletrônica de varredura de estruturas alongadas de YIG depositadas em membrana porosa de alumina após tratamento térmico a 900 °C por 2h.....	76

Figura 34 -	Imagens de espectroscopia por energia dispersiva para o oxigênio, ítrio e ferro em amostra de nanopartículas de YIG.....	78
Figura 35 -	Imagens de espectroscopia por energia dispersiva para o oxigênio e alumínio em amostra de membrana de alumina sem deposição.....	78
Figura 36 -	Imagens de espectroscopia por energia dispersiva para o oxigênio, alumínio, ferro, e ítrio de amostra de nanoestruturas alongadas depositadas em membrana porosa de alumínio.....	79
Figura 37 -	Curva de histerese de nanopartículas de YIG obtidas através de VSM.....	80
Figura 38 -	Curva de histerese de nanoestruturas alongadas de YIG depositadas em membrana porosa de alumina obtidas através de VSM.....	81
Figura 39 -	Ressonância ferromagnética de estruturas alongadas de YIG depositadas em membrana de alumina na direção paralela e perpendicular ao campo aplicado.....	82
Figura 40 -	Campo de ressonância (a) e largura de linha (b) de nanoestruturas alongadas depositadas em membrana porosa de alumina de acordo com a variação de ângulo.....	83
Figura 41 -	Curva de blindagem efetiva para membrana de alumina não depositada (controle), e duas amostras distintas de alumina depositadas com nanoestruturas alongadas de YIG.....	84
Figura 42 -	Gráfico de colunas das medidas de blindagem efetiva média para membrana de alumina não depositada (controle), e duas amostras distintas de alumina depositadas com nanoestruturas alongadas de YIG.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais unidades magnéticas no S.I. e no CGS.....	23
Tabela 2 -	Principais propriedades observadas na granada de ferro e ítrio (YIG).....	33
Tabela 3 -	Parâmetros estruturais e magnéticos de nanopartículas de YIG puro e dopadas com neodímio.....	35
Tabela 4 -	Parâmetros estruturais e magnéticos de nanopartículas de YIG dopadas com cobalto e zinco.....	36
Tabela 5 -	Parâmetros magnéticos para filmes de YIG com diferentes espessuras.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1	CONCEITOS BÁSICOS DO MAGNETISMO.....	19
3.2	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS.....	22
3.2.1	Momento magnético e magnetização.....	23
3.2.2	Susceptibilidade e permeabilidade magnética.....	24
3.2.3	Anisotropia magnética.....	25
3.2.3	Curva de histerese.....	27
3.3	ÓXIDOS MAGNÉTICOS.....	29
3.4	GRANADA DE ÍTRIO-FERRO (YIG).....	31
3.5	NANOFIOS.....	38
3.6	TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE NANOFIOS.....	43
3.6.1	Método Sol-gel.....	48
3.7	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA.....	50
3.7.1	Magnetômetro de amostra vibrante (VSM).....	50
3.7.2	Ressonância ferromagnética (FMR).....	52
3.7.3	Microscopia de força magnética (MFM).....	53
3.7.4	Magnetometria SQUID.....	54
3.7.5	Magnetometria de força gradiente alternante (AGFM).....	56
3.7.6	Blindagem magnética.....	57
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1	MATERIAIS.....	60
4.2	MÉTODOS.....	60
4.2.1	Preparação da solução precursora.....	60
4.2.2	Preparação das nanopartículas de YIG.....	61
4.2.3	Preparação dos nanofios de YIG.....	61
4.3	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO.....	63
5	RESULTADOS.....	65

5.1	ÂNGULO DE CONTATO.....	65
5.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	66
5.3	ESPECTROSCOPIA RAMAN.....	71
5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	74
5.5	ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS).....	77
5.6	MAGNETOMETRO DE AMOSTRA VIBRANTE (VSM).....	80
5.7	RESSONÂNCIA FERROMAGNÉTICA (FMR).....	82
5.8	BLINDAGEM MAGNÉTICA.....	84
6	CONCLUSÕES.....	86
6.1	PERSPECTIVAS.....	87
	REFERÊNCIAS.....	88
	ANEXO A – Produção científica.....	102

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento da nanotecnologia, com o desenvolvimento de estruturas na escala nanométrica em pelo menos uma de suas dimensões, manipulando a matéria a nível atômico e molecular a fim de se obter materiais com propriedades diferentes daquelas apresentadas quando em escala macro (GODDARD III *et al.*, 2018). A síntese permite a obtenção de materiais mais duráveis, leves, resistentes e com maior facilidade de processamento e armazenamento de informações (ZHANG, 2018).

Quando abordamos o magnetismo, as propriedades magnéticas dos materiais em macroescala já são bem conhecidas. Quando diminuimos o tamanho dessas partículas para a escala nanométrica, a física quântica passa ditar as propriedades das mesmas, modificando características como reatividade química, ponto de fusão, anisotropia, remanência, saturação de magnetização, campo coercitivo e condutividade elétrica, quando comparadas as mesmas propriedades para o mesmo material maciço (CABALLERO-CALERO; MARTÍN-GONZÁLEZ, 2020; FERNÁNDEZ-PACHECO *et al.*, 2017).

Dependendo do objetivo e se utilizando de diferentes técnicas de preparação, a nanotecnologia pode ser utilizada no desenvolvimento de diferentes estruturas. Assim, estas se tornam aptas a uma variedade de aplicações, como em dispositivos para tratamento de água e células solares, assim como no desenvolvimento de estruturas moleculares como tecidos, DNA/RNA e nanoestruturas biocompatíveis para tratamento de câncer e entrega de fármacos (HUANG *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2021; MENG; ZHANG; LI, 2020; SARAVANAN; SASIKUMAR, 2020; THAO; BAO, 2020; YILMAZ; SOYLAK, 2020).

Dentre as nanoestruturas magnéticas estudadas e suas diferentes geometrias, os arranjos de nanofios magnéticos permitem uma compreensão sobre o efeito das propriedades quânticas em função de sua forma. Propriedades magnéticas como a reversão de magnetização e configurações de mínima energia podem ser controladas variando parâmetros geométricos como diâmetro, espessura e comprimento dos nanofios (POGGIO, 2020; RAVIOLO *et al.*, 2020). Entre as aplicações mais utilizadas estão a spintrônica, equipamentos de processamento e armazenamento de dados, equipamentos médicos, dispositivos ópticos, entre outros (ATITOAIE *et al.*, 2016; RAJSKA *et al.*, 2020; ZHANG; ZHENG; LIEBER, 2016).

Dependendo dos seus átomos constituintes, os nanofios podem ter composição amorfa ou cristalina, e, diferente de nanofilmes e nanopartículas, sua morfologia proporciona uma energia estrutural constante no eixo paralelo ao comprimento do fio, indicando boa condutividade elétrica nesta direção, enquanto que ela se torna bastante sutil na direção de crescimento do diâmetro. Alterações no diâmetro destas nanoestruturas ocasionam mudanças nos níveis de energia existentes, logo, a razão entre seu comprimento e diâmetro, assim como sua estrutura química, impactam fortemente as propriedades apresentadas, os tornando materiais de interesse para estudos magnéticos (HSU *et al.*, 2023; JACOBSSON *et al.*, 2016).

No campo dos materiais magnéticos a spintrônica surge utilizando a dinâmica quântica do spin do elétron e a relação com o seu momento magnético associado. Nela, o controle eficaz na geração de corrente de spin é de fundamental importância para o desenvolvimento de nanodispositivos que apresentem uma maior capacidade de armazenamento e processamento de informações associados a um menor consumo de energia (DIEZ *et al.*, 2019; HIROHATA, 2018; HIROHATA *et al.*, 2020).

Segundo os autores Staño e Fruchart, as técnicas de fabricação de nanoestruturas alongadas podem ser classificadas em top-down, quando uma estrutura maior passa por etapas de refinamento até ter dimensões em nanoescala; e em bottom-up, quando a estrutura é formada através da deposição de nanopartículas de forma similar a tijolos no muro para construção da geometria desejada (HUANG *et al.*, 2012; STAÑO; FRUCHART, 2018). Técnicas de síntese como litografia, eletrodeposição, deposição por camada atômica e sol-gel são usadas na fabricação de nanofios/nanotubos, muitas delas se utilizando de *templates* com a geometria da estrutura que se deseja produzir (CHOI *et al.*, 2020; RAMADAN *et al.*, 2020; SHIMIZU *et al.*, 2020).

Nanofios metálicos utilizam a eletrodeposição como meio de síntese, sendo uma técnica comumente assistida pelo uso de um *template* poroso, geralmente membranas de alumina anódica porosa ou membranas de policarbonato, que permitem o controle do tamanho dos nanofios formados devido as suas dimensões de poros (GARCÍA *et al.*, 2020; YILMAZ; SOYLAK, 2020). Entre os mais comuns estão estudos envolvendo fabricação de nanofios envolvendo ferro, cobalto e níquel (BAI; HU, 2003; GARCIA *et al.*, 2015; MANSOURI *et al.*, 2020).

Nanofios de óxidos metálicos de estruturas mais simples também podem ser produzidos por crescimento anisotrópico através de métodos químicos, como

crescimento espontâneo por vapor ou solução química. Controlando parâmetros como pressão e temperatura, o material tende a crescer seguindo uma direção de menor energia e maior estabilidade, formando assim, fios ou tubos (DUAN *et al.*, 2021; HSU *et al.*, 2023; ZHANG, *et al.*, 2020).

Contudo, óxidos de geometrias mais complexas não podem ser produzidos por essas técnicas, pois necessitam passar por múltiplos processos de oxidação durante sua formação, necessitando geralmente de métodos químicos que possam ser associados a uma etapa de aquecimento térmico. Dentre as técnicas disponíveis, o método sol-gel é uma técnica bottom-up conhecida pela sua praticidade e baixo custo (YILMAZ; SOYLAK, 2020).

O processo envolve duas reações principais, uma reação de hidrólise, com o uso de precursores químicos a base de metais ou semimetais, e uma reação química de condensação/polimerização hidrólise seguida de condensação/polimerização dos produtos hidrolisados de forma a se obter um gel úmido, que é calcinado a fim de se obter o material final (D'ARIENZO *et al.*, 2017). Além disso, o sol-gel permite a fabricação não somente de material particulado, assim como de diversas nanoestruturas, como aerogéis, xerogéis, filmes finos, nanofios, nanotubos, entre outros (ALI; EMRAN, 2022; HU *et al.*, 2023; JANUSKEVICIUS *et al.*, 2022; KLEIN, 2005; SONG *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2023).

Dentre os grupos de óxidos existentes, os óxidos magnéticos, em especial as ferritas, são bastante utilizados no desenvolvimento de nanofios/nanotubos devido a existência de camadas eletrônicas semipreenchidas e ao momento magnético de spin dos elétrons que ocupam essas camadas. Estes são aplicados na fabricação de sensores, atuadores, dispositivos biocompatíveis, dispositivos magneto-óticos, de micro-ondas e de armazenamento de dados (DIONNE, 2009; HSU *et al.*, 2023; RANA *et al.*, 2021; SHEVCHENKO; BARABASH, 2019).

Um óxido ferrimagnético muito pesquisado pela comunidade científica nos últimos anos é a granada de ítrio e ferro (YIG), apresentando alta resistividade elétrica, alta magnetização e baixa largura de linha de ressonância ferrimagnética. Isso o torna um candidato promissor na formulação de dispositivos na área de spintrônica, dispositivos de micro-ondas e de armazenamento de dados. No YIG, os íons férricos (Fe^{+3}) ocupam dois sítios octaédricos e três sítios tetraédricos, porém, com spins diferentes em cada um dos sítios de coordenação, resultando, assim, em um

comportamento magnético (KANG *et al.*, 2021; KIM *et al.*, 2022; KURODA *et al.*, 1999; WU, 2010).

Devido a sua complexidade molecular e estrutural, o YIG, em seus variados formatos, não consegue ser produzido por métodos como a eletrodeposição ou crescimento anisotrópico, sendo comumente sintetizado através de métodos químicos, como sol-gel, co-precipitação ou decomposição metalorgânica (ASSIS *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2018; SOUSA *et al.*, 2022).

Muitas das investigações realizadas pela comunidade científica atualmente em nanodispositivos estão associadas a simulações computacionais, onde nem sempre os parâmetros estudados se apresentam fáceis de reproduzir experimentalmente. Para fins práticos, é de extrema importância o conhecimento do comportamento magnético dos nanomateriais para um melhor direcionamento de suas aplicações (PUSIOL *et al.*, 2023).

Poucos estudos experimentais em relação a nanofios de YIG vêm sendo desenvolvidos no que tange a otimização de metodologias de deposição e avaliação de suas propriedades físico-químicas e magnéticas (HAYATI *et al.*, 2018, 2020). Além disso, devido a sua geometria particular, muitos processos de síntese são pouco detalhados na literatura ou necessitam de um aparato custoso para realização do procedimento de deposição, o que torna o tema promissor para novos estudos na área visando a obtenção de um procedimento experimental de baixo custo associado a fabricação de um nanomaterials de interesse (PAN *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho busca desenvolver nanoestruturas alongadas de YIG depositadas em membranas porosas de alumina através do método sol-gel, utilizando uma metodologia de deposição baixo custo e fácil utilização, avaliando suas características morfológicas, químicas e magnéticas. Assim, pretende-se desenvolver uma técnica de baixo custo para deposição para óxidos de estequiometria mista assistida por vácuo, que forneça um material com qualidade que supra as necessidades para uso em dispositivos que utilizam o magnetismo para dispositivos de micro-ondas, processamento ou armazenamento de dados, assim como ser uma porta de entrada para futuros estudos envolvendo sínteses de nanofios de outros óxidos metálicos de estequiometria mista em laboratório.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Essa pesquisa tem como objetivo geral desenvolver nanoestruturas alongadas de YIG depositadas em membranas porosas de alumina através de métodos químicos por processo de deposição de baixo custo desenvolvido em laboratório, avaliando suas propriedades morfológicas e magnéticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos estão:

- i) Fabricar nanofios de YIG em membranas porosas de alumina a partir do método sol-gel e avaliar a morfologia dessas nanoestruturas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-x (DRX);
- ii) Fabricação de nanopartículas de YIG através da solução precursora utilizada, para efeitos comparativos;
- iii) Caracterizar quimicamente as amostras produzidas através de espectroscopia Raman e espectroscopia por energia dispersiva (EDS);
- iv) Avaliar as propriedades magnéticas das nanoestruturas alongadas utilizando ensaios de magnetometria de amostra vibrante (VSM) e ressonância ferromagnética (FMR);
- v) Realizar ensaio de blindagem magnética nas nanoestruturas alongadas produzidas;
- vi) Confirmar a eficiência de metodologia de baixo custo adaptada para deposição de fios de óxidos magnéticos de estequiometria mista com auxílio de vácuo fabricados a partir de métodos químicos em laboratório;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE MAGNETISMO

Por pelo menos vinte séculos a capacidade de materiais com propriedades magnéticas serem capazes de atrair outros corpos magneticamente carregados vêm despertando a curiosidade de diversos estudiosos através da história. Um dos mais rudimentares aparatos produzidos pelo homem, um dispositivo magnético conhecido como “ponteiro sul”, foi bastante usado na geomancia chinesa pela sua capacidade de se alinhar ao eixo do campo magnético terrestre, sendo até hoje conhecido com o precursor da bússola que conhecemos (COEY, 2001).

O magnetismo ocorre devido a interação de troca entre átomos, levando em consideração a antissimetria existente nas funções de onda dos elétrons. A função de onda característica de um par de elétrons (ψ) é zero se os elétrons estiverem no mesmo lugar no espaço. Logo, sendo o elétron um férmion, devido ao princípio de exclusão de Pauli não é possível encontrar nas mesmas coordenadas dois elétrons de mesmo spin. (BINNS, 2014; TAYLOR, 2021). O cálculo da interação de troca entre dois átomos vizinhos com spins S_1 e S_2 , a partir do uso da constante de troca J pode energeticamente ser demonstrada através da equação 1 (BINNS, 2014)

$$E_{\text{ex}} = -2JS_1.S_2. \quad (1)$$

As propriedades magnéticas observadas nos materiais estão diretamente relacionadas ao movimento dos elétrons de seus átomos de origem. Os momentos eletrônicos ao redor do átomo e ao redor de si próprio, chamados respectivamente de momentos orbital e spin, vão possuir momentos magnéticos individuais. Assim, para obtermos o momento magnético total de um átomo, temos que somar as contribuições desses dois momentos (GETZLAFF, 2007; KRONMÜLLER, 2007).

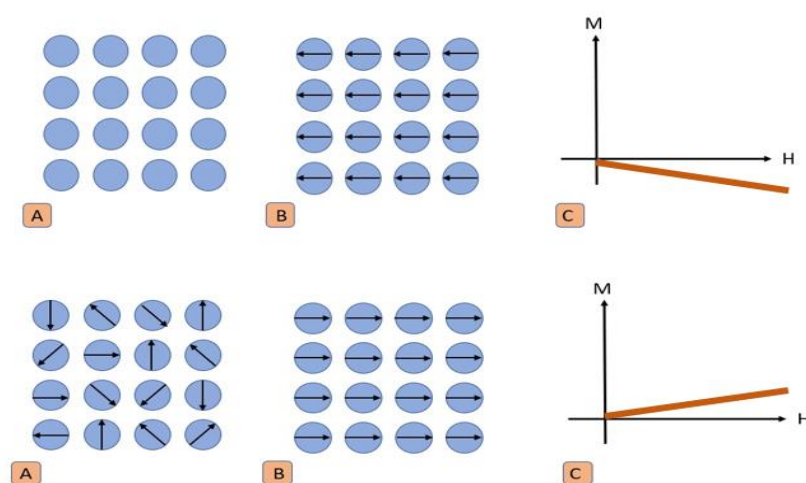
Por meio de grandezas de interesse como a permeabilidade magnética (μ_0), que quantifica a intensidade do campo magnético B no interior de um material por um campo aplicado H , e a susceptibilidade magnética (χ), que é a capacidade de um material tornar-se magnetizado após passagem de um campo aplicado, é possível determinar como os sistemas vão se comportar em contato com um campo magnético

aplicado e, conseqüentemente, classificar os mesmos (GETZLAFF, 2007; KRONMÜLLER, 2007).

Os materiais diamagnéticos apresentam um momento magnético igual a zero, pois os momentos eletrônicos existentes em seus átomos se anulam. Isso ocorre devido a seus átomos possuírem camadas eletrônicas completamente preenchidas, o que os torna incapazes de se manterem magnetizados sem a presença de um campo magnético externo. Quando um campo magnético é aplicado, a direção do momento magnético induzido se opõe ao campo aplicado, resultando assim numa susceptibilidade magnética reduzida e menor que zero (LEAL, 2018; SOLER; PATERNO, 2017).

Quando os materiais apresentam em sua composição átomos que possuem elétrons de spins desemparelhados, possuindo momentos de dipolo magnéticos resultantes orientados aleatoriamente, é observado um efeito conhecido como paramagnetismo. Quando submetidos a presença de um campo magnético, os dipolos se alinham no mesmo sentido do campo, gerando assim uma susceptibilidade reduzida e maior que zero (LEAL, 2018; SOLER; PATERNO, 2017). A figura 1 mostra a orientação dos dipolos magnéticos para estruturas diamagnéticas e paramagnéticas em diferentes aplicações de campo magnético.

Figura 1 - Orientação dos dipolos magnéticos para materiais diamagnéticos (superior) e paramagnéticos (inferior) em: campo nulo (a), campo aplicado (b) e diagrama magnetização versus campo aplicado (c).



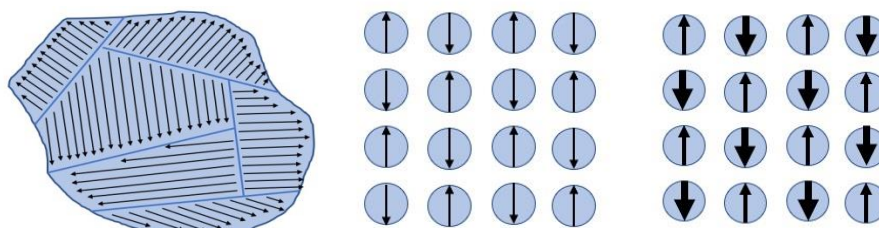
Fonte: Adaptado de (LEAL, 2018).

O efeito conhecido como ferromagnetismo é observado quando ocorre o alinhamento de grande quantidade de spins próximos, devido à forte interação entre os dipolos magnéticos vizinhos, em regiões chamadas de domínios ferromagnéticos ou domínios de Weiss. Em um material não magnetizado, os domínios possuem direções aleatórias, mas com a aplicação de um campo magnético externo, os domínios tendem a se alinhar com o campo e o material passa a apresentar susceptibilidade magnética alta e positiva. Quando aquecidos acima da temperatura de Curie, temperatura na qual o material perde suas propriedades magnéticas permanentes e sofre o efeito apenas da indução magnética, passam a apresentar comportamento paramagnético. Cobalto, ferro e níquel são alguns dos metais que apresentam ferromagnetismo à temperatura ambiente (GALSIN, 2019).

Quando os átomos vizinhos existentes no material apresentam orientações de spin antiparalelas, ocasionando momento magnético resultante nulo, observamos um fenômeno conhecido como antiferromagnetismo. Quando em contato com um campo magnético externo, observa-se uma magnetização reduzida e positiva. De forma similar aos materiais ferromagnéticos, quando aquecidos a uma temperatura onde passam a apresentar um estado de desordem magnética, chamada de temperatura de Néel, passam a apresentar comportamento paramagnético (GALSIN, 2019).

O fenômeno de ferrimagnetismo foi observado e descrito por Néel em 1948 (NÉEL, 1948). Os materiais ferrimagnéticos, também chamados de ferritas, apresentam magnetização espontânea a baixas temperaturas e comportamento similar ao dos materiais ferromagnéticos, se tornando paramagnéticos quando aquecidos acima da temperatura de Curie. Os átomos vizinhos apresentam orientações de spin antiparalelas, mas, devido a questões microestruturais, os momentos possuem intensidades diferentes, ocasionando assim uma magnetização resultante não nula. São óxidos cerâmicos que apresentam susceptibilidade magnética positiva e magnetização remanente na ausência de um campo magnético. (SPALDIN, 2010). A figura 2 mostra a orientação dos dipolos magnéticos observados em um cristal ferromagnético não magnetizado (esquerda), estruturas antiferromagnéticas (central) e ferrimagnéticas (direita).

Figura 2 - Esquema de domínios ferromagnéticos individuais existentes em um cristal não magnetizado(a), orientação dos íons magnéticos em uma rede antiferromagnética (b), e orientação dos íons magnéticos em uma rede ferrimagnética (c).



Fonte: O autor.

A teoria clássica do ferrimagnetismo de Néel pode ser explicada, de modo genérico, levando em consideração interações entre espécies iônicas X - X , Y - Y , e X - Y , onde X e Y são elementos atômicos distintos, e que interações entre íons semelhantes levam a um comportamento ferromagnético enquanto que as de íons diferentes um comportamento antiferromagnético. As magnetizações individuais de cada um desses íons e suas respectivas sub redes, vistas através das equações 2 e 3, assim como a magnetização total, vista na equação 4, podem ser calculadas tendo como base os momentos magnéticos dos íons X e Y (μ_X e μ_Y), (SPALDIN, 2010).

$$M_x = \alpha n \mu_X, \quad (2)$$

$$M_y = \beta n \mu_Y, \quad (3)$$

$$M_T = \alpha n \mu (X + Y) \quad (4)$$

3.2 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

Antes de serem abordadas as principais grandezas envolvidas na caracterização magnetiza dos materiais, é necessário esclarecer os sistemas de unidades utilizadas para cada uma das principais grandezas magnéticas, pois embora o sistema internacional (S.I.) seja atualmente utilizado pela comunidade científica, muitos estudos continuam utilizando o CGS (centímetro-grama-segundo) em suas

medições (PULLAR, 2012). Na tabela 1 estão listadas as principais grandezas e suas conversões de CGS para o S.I.:

Tabela 1: Principais unidades magnéticas no S.I. e no CGS.

Unidades magnéticas	S.I.	CGS
Densidade de fluxo	T	G
Campo magnético	A m ⁻¹	Oe
Momento magnético	A m ²	emu
Magnetização	A m ² kg ⁻¹	emu g ⁻¹
Magnetização de saturação	A m ⁻¹	emu cm ⁻³
Fluxo magnético	Wb	Mx

Fonte: Adaptado de (PULLAR, 2012).

3.2.1 Momento magnético e magnetização

Em termos de átomos e seus constituintes, podem ser calculadas várias propriedades magnéticas diretamente vinculadas ao comportamento dos materiais, como o momento magnético e a magnetização. Nos materiais, os elétrons existentes em suas camadas internas semi preenchidas geram o fenômeno que conhecemos como momento magnético (KITTEL; HOLCOMB, 1967; SKOMSKI, 2003). O íon férrico (Fe⁺³) possui cinco elétrons desemparelhados em seu orbital 3d. Em um determinado campo magnético H, a contribuição total de momentos magnéticos μ em um átomo é medido através da equação de energia de Zeeman

$$U = - \mu \cdot H. \quad (5)$$

Nos metais de transição de série do ferro e em alguns constituintes do grupo de elementos terras raras, o momento magnético é dado em maior contribuição pelo de spin do mesmo, μ_S , que também pode ser mensurado em termos de Magneton de

Bohr, correlacionando valores como a massa e carga do elétron, assim como a constante de Plank (BAND; AVISHAI, 2013)

$$\mu_B = \frac{e \cdot h}{4\pi \cdot m_e} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ A m}^2. \quad (6)$$

As contribuições dos momentos orbitais angulares dos elétrons, embora existentes, tendem a ser reduzidos devido ao campo elétrico proveniente das interações de rede cristalina existentes nos materiais, que geralmente são manipulados em sua forma sólida (GRISCOM, 2001). Outros fenômenos interatômicos, como as contribuições magnéticas de prótons e nêutrons, costumam ser muito menores em relação ao comportamento magnético geral do material de interesse, quando comparados às contribuições eletrônicas de spin (MOSKOWITZ; JACKSON; CHANDLER, 2015).

Quando aplicamos um campo magnético externo a um determinado material, os spins de seus átomos tendem a se alinhar na direção do campo. Esse fenômeno é conhecido como magnetização. A magnetização M envolve tanto os vetores de indução/fluxo magnético B quanto o campo magnético H na equação de indução magnética

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}). \quad (7)$$

Quando o campo é removido, alguns materiais, como os diamagnéticos e paramagnéticos, voltam aos seus estados de spin originais, contudo, os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos são capazes de se manterem magnetizados, gerando o fenômeno conhecido como magnetização espontânea. (MOSKOWITZ; JACKSON; CHANDLER, 2015).

3.2.2 Susceptibilidade e permeabilidade magnética

A partir da susceptibilidade magnética é possível observar o quão magnetizável um determinado material pode ser quando submetido a campo magnético externo. A susceptibilidade magnética está relacionada com a magnetização e o campo magnético aplicado através da seguinte equação

$$\vec{M} = |\chi| \cdot \vec{H}. \quad (8)$$

Uma dependência linear será observada caso a magnetização produzida seja paralela ao campo magnético aplicado (GETZLAFF, 2007).

A permeabilidade magnética, por outro lado, mensura a densidade de fluxo magnético que um determinado material é capaz de suportar. A permeabilidade magnética relativa está relacionada ao espaço livre μ_0 de tal forma que

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0, \quad (9)$$

onde μ_r é a permeabilidade relativa e μ_0 é a permeabilidade do espaço livre. Levando em consideração a relação entre a indução magnética B e o campo magnético aplicado H, é possível expressar a permeabilidade magnética de forma que

$$\vec{B}i = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}i = \mu \cdot \vec{H}i. \quad (10)$$

Os parâmetros de susceptibilidade magnética e permeabilidade magnética, naturalmente, são diferentes para os variados tipos de materiais existentes, assim como as substâncias químicas que os constituem, onde elementos conhecidamente magnéticos irão possuir os maiores valores apresentados por essas propriedades (FITTERMAN, 2015; GETZLAFF, 2007).

3.2.3 Anisotropia magnética

Dependendo da forma como são estruturados, os materiais magnéticos vão possuir uma ou mais propriedades em que a magnetização tende a uma única direção, visando uma orientação de mínima energia para o sistema. Essa propriedade é conhecida como anisotropia magnética. A direção que a magnetização percorre leva em consideração alguns fatores, que estão diretamente relacionados com a estrutura

cristalina e a forma do material que está sendo analisado (MOSKOWITZ; JACKSON; CHANDLER, 2015).

A anisotropia magneto-cristalina é um fenômeno de interações spin-orbital da rede cristalina de um material, onde os eixos de um cristal influenciam na direção de menor energia que a magnetização tende a escolher. Valores de anisotropia magneto cristalina mais discretos são encontrados nos materiais magnéticos leves, enquanto que materiais magnéticos que se mantêm continuamente magnetizados apresentam uma maior intensidade dessa contribuição, como os ímãs (MOSKOWITZ; JACKSON; CHANDLER, 2015; SKOMSKI, 2003).

Para materiais de estrutura cristalina mais simples, a correlação entre o volume V e o ângulo de magnetização pode ser dado em termos de energia magneto cristalina pela equação

$$E_a = K_1 \cdot V \cdot \text{Sen}^2\theta, \quad (11)$$

onde K_1 é a constante de anisotropia uniaxial. Para materiais magnéticos de estrutura cristalina mais complexa, como os de simetria cúbica, a expressão em termos de volume é dada por

$$E_a = K_1 \cdot V (S_x^2 \cdot S_y^2 + S_y^2 \cdot S_z^2 + S_x^2 \cdot S_z^2) + K_2 \cdot V (S_x^2 S_y^2 S_z^2), \quad (12)$$

onde, K_1 e K_2 são constantes de anisotropia magneto-cristalina cúbica, distintas entre si e S_x , S_y e S_z são os cossenos relativos ao eixo fácil de magnetização. Os valores das constantes de anisotropia alteram consideravelmente as direções de fácil magnetização. As direções de fácil magnetização alteram consideravelmente os valores das constantes de anisotropia obtidos. Para K_1 e $k_2 > 0$, a direção preferencial é a (1 0 0) (KRONMÜLLER, 2007; SKOMSKI, 2003).

Por outro lado, quando falamos em anisotropia de forma, precisamos saber que ela tem profunda relação com a energia magneto estática (KIRCHMAYR, 2001). Como a grande parte dos materiais não tem formato esférico uniforme, a anisotropia de forma ganha mais relevância nas contribuições totais de anisotropia nas estruturas em que o eixo de fácil magnetização é paralelo ao sentido de crescimento do material, como nanofios e nanotubos, visando diminuir a energia magneto-estática existente nas interações de momentos de dipolo magnético (GRUSZECKI *et al.*, 2019)

A anisotropia de superfície está sempre presente em materiais de dimensões reduzidas, apresentando pequenas espessuras, como filmes finos nanocristalinos. A simetria reduzida, assim como outros fenômenos de superfície apresentados por esse espalhamento geométrico uniforme causam alterações tanto fora quanto na direção do plano de superfície, resultando em uma constante de anisotropia efetiva (K_{eff}), mostrada na equação a seguir

$$K_{eff} = K_v + \left(\frac{2K_s}{d}\right), \quad (13)$$

onde K_v é a constante de volume e K_s é a constante de anisotropia de superfície. A relação entre as duas constantes gera um efeito conhecido como espessura crítica (d_c), onde valores maiores forçam a magnetização na direção do plano da superfície (GRUSZECKI *et al.*, 2019)

$$d_c = -2K_s/K_v. \quad (14)$$

3.2.4 Curva de histerese

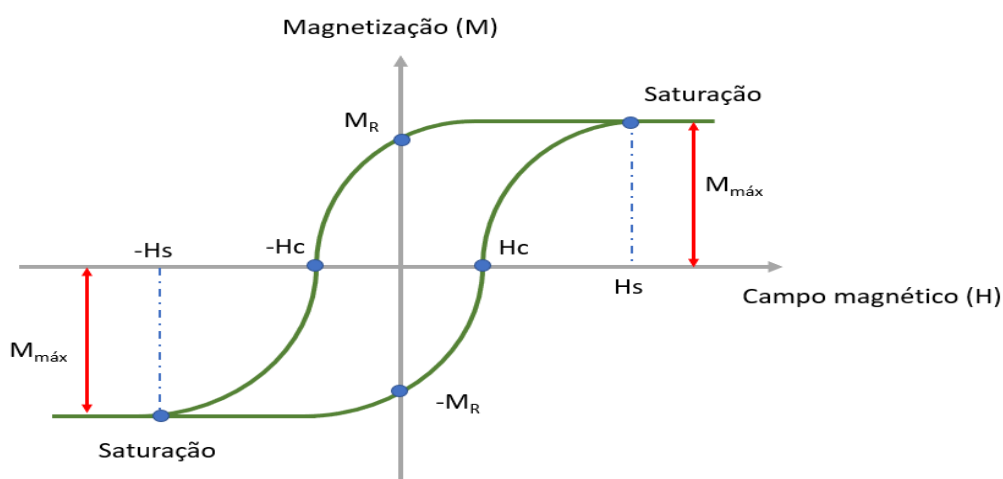
A histerese magnética estuda o efeito do comportamento da magnetização em função de um campo magnético externo aplicado, sendo o fenômeno mais estudado pela comunidade científica nos materiais. Tal magnetização, quando produzida em função dos processos cíclicos de variação nos limites positivos e negativos atribuídos para o campo magnético H , produz o que chamamos de curva de histerese magnética, um loop fechado que fornece informações importantes a respeito do comportamento magnético. O formato da curva possui direta relação com parâmetros microestruturais do cristal, distribuição de partículas na célula unitária, forma do material analisado, assim como a anisotropia magnética. (MOSKOWITZ; JACKSON; CHANDLER, 2015; SKOMSKI, 2003).

Quando aplicamos um campo magnético externo em um determinado material, seus momentos individuais irão se alinhar na direção desse campo, ocasionando uma magnetização positiva. Porém, quando todos os momentos estão devidamente alinhados na direção do campo, o aumento da intensidade do campo incidente não conseguirá aumentar a magnetização observada, ela é então chamada de

magnetização de saturação (M_s). Mudando a direção do campo magnético aplicado, conforme sua diminuição ocorre em direção ao zero, também ocorre a diminuição da magnetização de saturação. Quando o campo externo é zerado ($H = 0$), a magnetização do material retém um valor positivo chamado de magnetização remanente (M_r) (MOHAMED; PALEOLOGOS, 2018; PULLAR, 2012)

Aumentando a intensidade do campo, a magnetização remanente, eventualmente, reduz até o zero, onde o campo magnético nesse ponto específico é chamado de campo coercitivo (H_c). A magnetização então tende a decrescer com o campo até atingir o valor $-M_s$ e o processo é invertido até a magnetização alcançar novamente o valor $+M_s$, fechando o ciclo. Ferritas moles apresentam curvas de histerese estreitas, devido aos seus baixos valores de coercividade e magnetização remanente, sendo facilmente desmagnetizadas, enquanto que as ferritas duras necessitam de uma maior intensidade de campo magnético para se desmagnetizarem, possuindo assim, maiores valores para seus parâmetros de coercividade e magnetização remanente (MOHAMED; PALEOLOGOS, 2018; PULLAR, 2012). A figura 3 mostra o gráfico característico de curva de histerese para material ferromagnético.

Figura 3 - Curva de histerese característica de uma ferrita dura.



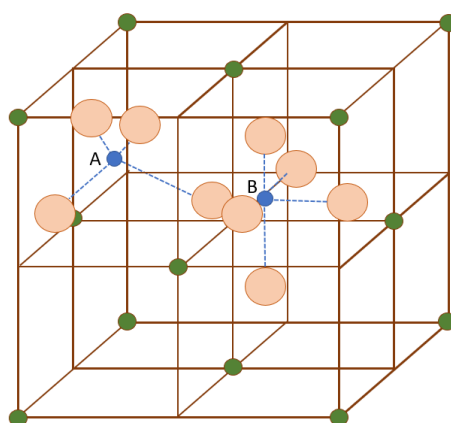
Fonte: Adaptado de (HOLANDA et al., 2020).

3.3 ÓXIDOS MAGNÉTICOS

Como o magnetismo surge dos momentos magnéticos oriundos dos spins de elétrons desemparelhados, é necessário dar atenção para os metais de transição. Tais elementos possuem camadas eletrônicas internas semipreenchidas, enquanto que os elétrons das camadas externas realizam as interações com elétrons de outros átomos formando ligações químicas. A força do acoplamento spin-orbital é de vital interesse em determinar o quanto o momento orbital contribui para as propriedades magnéticas observadas e consequentemente, da forma como o spin interage com a rede cristalina (DIONNE, 2009).

Entre os compostos cerâmicos de maior interesse tecnológico conhecidos temos os óxidos magnéticos. São formados por metais de transição e são eletricamente isolantes, utilizados na fabricação de dispositivos de alta frequência, pois quando submetidos a campos oriundos de correntes alternadas não irão sofrer a ação de correntes indesejadas devido a suas propriedades isolantes (TEIXEIRA *et al.*, 2020; ZUBOV, 2022).

Figura 4 - Esquema da estrutura cristalina de um espinélio na magnetita.



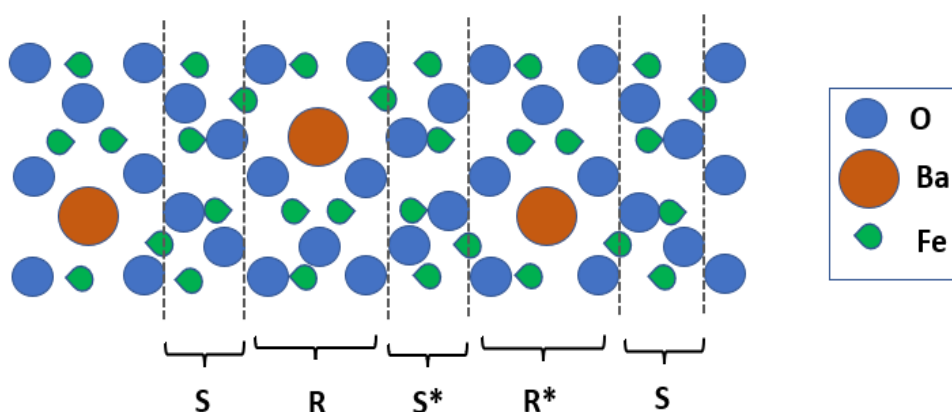
Fonte: Adaptado de (SPALDIN, 2010).

As ferritas podem apresentar estruturas cristalinas cúbicas ou hexagonais. A ferrita cúbica apresenta estrutura $X.Fe_2O_4$, onde X é um íon bivalente como Fe^{+2} , Co^{+2} , Zn^{+2} e Ni^{+2} , etc. No seu processo de cristalização, ela forma uma estrutura de espinélio, mostrada na figura 4, onde os íons oxigênios são organizados em um arranjo

cúbico de face centrada, formando um sítio tetraédrico distinto (A) para alocação dos cátions bivalentes. As ferritas cúbicas são materiais que tanto se magnetizam facilmente assim como perdem a orientação de seus dominós magnéticos quando afastadas de um campo eletromagnético incidente, sendo classificadas como ferritas moles. Possuem estrutura cristalina de espinélio e devido a facilidade de serem orientadas magneticamente, são muito utilizadas em dispositivos de alta frequência, pois possuem baixos valores de condutividade elétrica associados a valores consideravelmente altos de magnetização de saturação e resistividade elétrica (DASGUPTA *et al.*, 2016; QIN *et al.*, 2021; SPALDIN, 2010).

A ferrita de bário $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, ou ferrita M, é a mais conhecida dentre as que possuem estrutura cristalina hexagonal. No seu processo de cristalização, forma uma estrutura formada de quatro seções distintas que se intercalam, conhecida como magnetoplumbita, que pode ser observada na figura 5. Nela, duas seções S e S* são espinélios férricos, que as sessões R e R* são estruturas onde o átomo central é um átomo de bário. Ferritas de estrutura hexagonal são magneticamente duras, sendo dificilmente desmagnetizadas e por isso são usadas como ímãs permanentes. Na ferrita de bário, a célula unitária possui magnetização de $20\mu\text{B}$ (SPALDIN, 2010).

Figura 5 - Estrutura de magnetoplumbita da ferrita de bário.



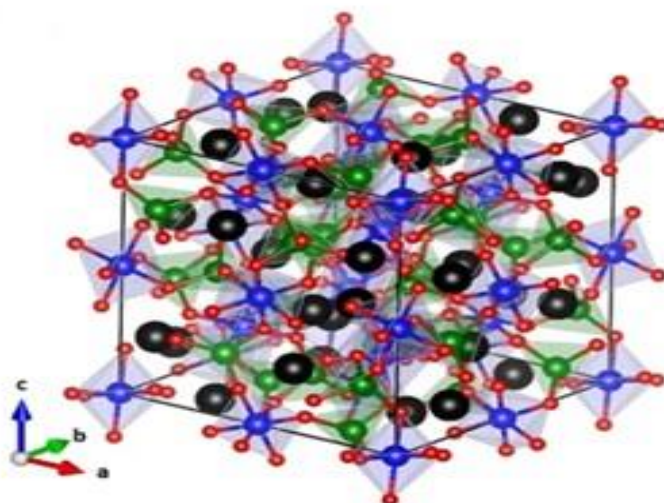
Fonte: Adaptado de (SPALDIN, 2010).

3.4 GRANADA DE ÍTRIO-FERRO (YIG)

A granada de ferro e ítrio, de fórmula molecular $Y_3Fe_5O_{12}$, foi inicialmente descoberta em 1956 por Bertaut e Forrat (BERTAUT; FORRAT, 1956). É um óxido ferrimagnético isolante composto por cátions trivalentes, com baixo amortecimento de magnons (ondas de spin quantizadas) e estreita largura de linha de ressonância ferromagnética, a menor observada quando comparado com outros óxidos metálicos. Nas duas décadas seguintes após sua descoberta, muitos dispositivos foram desenvolvidos utilizando o YIG com aplicações voltadas para a área de processamento de sinal, devido aos fenômenos de ondas de spin em frequências de micro-ondas (PRINCEP *et al.*, 2017; SERGA; CHUMAK; HILLEBRANDS, 2010).

A figura 6 mostra a célula unitária do YIG enquanto que a figura 7 mostra o arranjo de cátions nos três sítios cristalinos existentes na granada:

Figura 6 - Estrutura cristalina do YIG, com sítios octaédricos em azul e sítios tetraédricos em verde. Partículas pretas são ítrio, enquanto que partículas vermelhas são oxigênio.

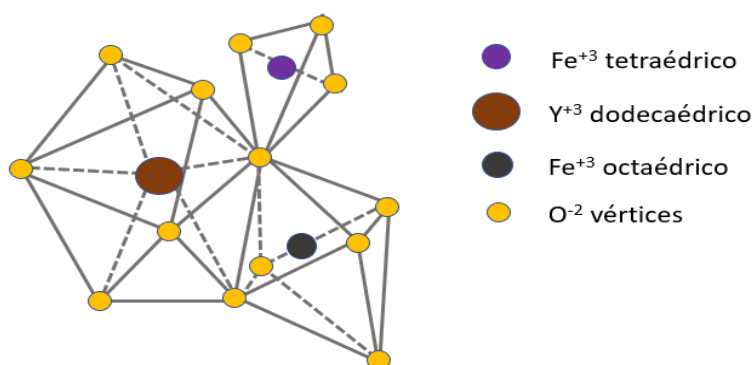


Fonte: Imagem retirada de (PRINCEP *et al.*, 2017).

O YIG apresenta estrutura cristalina cúbica, produzido através da reação de dois óxidos intermediários Fe_2O_3 e $3YFeO_3$, e sua célula unitária possuindo parâmetro de rede de $12,376 \pm 0,004 \text{ \AA}$ (GILLES; GELLER, 1958; SUN; WU, 2013). Dentro de

sua estrutura unitária, estão presentes 24 íons Y^{3+} , 40 íons Fe^{+3} e 96 íons O^{-2} , o equivalente ao total de oito fórmulas moleculares. Todos esses íons se distribuem na célula unitária em 3 organizações cristalinas: Uma octaédrica, com seus 16 sítios “a” ocupados por íons férricos circundados por seis íons O^{-2} ; uma tetraédrica, com seus 24 sítios “d” preenchidos por íons férricos cercados por 4 íons O^{-2} , e uma dodecaédrica, com seus 24 sítios “c” ocupados pelos íons Y^{3+} ligados a oito íons O^{-2} . Em termos cristalográficos, a granada faz parte do grupo espacial $Ia3d$ (IBRAHIM; NORATIQA, 2020; LEAL, 2018; SUN; WU, 2013).

Figura 7 - Arranjo de cátions na célula unitária do YIG.



Fonte: Adaptado de (SHENG *et al.*, 2021).

O magnetismo no YIG é oriundo da presença de íons do metal de transição ferro Fe^{+3} , onde interações de super troca ocorrem entre os íons férricos dos sítios “a” e os íons férricos dos sítios “d”, utilizando um átomo de oxigênio como “ponte”. O íon ítrio Y^{+3} , proveniente de uma classe de materiais conhecidos como terras raras, é diamagnético a temperatura ambiente, logo não é responsável pelo momento magnético permanente observado na granada. (SUN; WU, 2013).

A tabela 2 mostra as principais propriedades de interesse observadas na granada de ferro e ítrio:

Tabela 2: Principais propriedades observadas na granada de ferro e ítrio (YIG).

Parâmetros	Valores
Constante de rede a (0 °C)	$12,376 \pm 0,004 \text{ \AA}$
Coeficiente de expansão térmica (25 °C)	$8,3 \times 10^{-6}$
Densidade	$5,17 \text{ g/cm}^3$
Band gap	2,85 eV
Indução de saturação $4\pi Ms$	1750 G
Constante de anisotropia cúbica K1	- 6100 erg/cm ³
Constante de anisotropia cúbica K2	- 260 erg/cm ³
Temperatura de Currie T_c	286 °C
Constante de troca α	$3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$
Constante intrínseca de amortecimento α	3×10^{-5}

Fonte: Adaptado de (SUN; WU, 2013).

Também conhecida como magneto-eletrônica, a spintrônica foi a responsável pelas inovações observadas na área de dispositivos eletrônicos que conhecemos hoje. Na spintrônica, os dispositivos possuem geralmente aplicações voltadas para dispositivos de armazenamento de dados, transmissão ou processamento através da capacidade de manipulação do elétron e seu grau de liberdade de spin. Esses dispositivos, têm alcançado rápida velocidade de operação e diminuição de tamanho, além de muitas outras vantagens quando comparadas aos materiais semicondutores que costumavam ser utilizados nas últimas décadas (HIROHATA *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2016).

As altas constantes de amortecimento de magnetização Gilbert que estão presentes nas excitações de spin observadas principalmente nos metais, ocasionam um gasto considerável de energia perdida através de processos dissipativos (BRATAAS *et al.*, 2020). Apenas isolantes magnéticos, como o YIG, conseguem ser capazes de solucionar essa problemática, evitando o desperdício de energia na forma de calor, pois possuem valores mínimos de constante de amortização originados de suas ondas de spin (BRATAAS *et al.*, 2020; DZYAPKO *et al.*, 2013).

Além disso, na fotônica, as granadas magnéticas são muito utilizadas devido a apresentarem não-recicidade óptica, indicando que a luz pode apresentar diferentes intensidades, polarizações e mudança de fase ao se propagar em um material magnetizado (BI, 2018; SONG; KALARICKAL; PATTON, 2003).

Dentro da spintrônica temos a magnônica, responsável pelo estudo do comportamento das ondas de spin existentes em nanomateriais, é a principal área onde o YIG vem sendo continuamente estudado para uso em novas aplicações. A partir da correlação entre o deslocamento do elétron e a dinâmica de spin envolvida faz com que sistemas híbridos de isolantes magnéticos e semicondutores entrem em cena. Nesse cenário, a magnônica vem sendo muito utilizada e é atualmente uma área crescente em estudos de magnetismo no mundo (BRATAAS *et al.*, 2020; SERGA; CHUMAK; HILLEBRANDS, 2010).

Dispositivos que utilizam ondas de spin vêm sendo desenvolvidos para aplicações em sistemas lógicos, sensores magnéticos de alta sensibilidade, reconhecimento de padrões magnéticos e processamento de sinais de micro-ondas, muitos deles utilizando estruturas de YIG, devido a sua baixa constante de amortecimento de ondas de spin. Como os dispositivos que trabalham em baixas frequências de micro-ondas geralmente estão na faixa de 1 a 10 GHz, o YIG é um promissor material para dispositivos de ferritas que operam em frequências abaixo de 2GHz (CAPKU; YILDIZ, 2021; KHIVINTSEV *et al.*, 2022; KLINGLER *et al.*, 2015; LUO *et al.*, 2020; SOKOLOV *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2012).

No que tange a manipulação de propriedades de interesse em nanopartículas de YIG, alguns estudos ao longo dos últimos anos vêm correlacionando o efeito da dopagem na granada ferrimagnética, com pequenas modificações nos parâmetros de rede do cristal em todos os estudos, característicos da substituição do íon ferro por outro elemento químico. O íon neodímio foi utilizado por (SHARMA; KUANG, 2018) e medições da constante de amortecimento e tempo de relaxamento. A constante de amortecimento α sofreu aumento de $2,45 \times 10^{-3}$ para $3,8 \times 10^{-3}$, tornando o material um propenso candidato a fabricação de filtros de micro-ondas para tecnologias de banda larga 5g. O tempo de relaxamento com a dopagem diminuiu de 38,45 para 22,3 nanossegundos, tornando o material dopado promissor para fabricação de dispositivos de memória de alta velocidade. A tabela 3 mostra os principais parâmetros estruturais e magnéticos obtidos:

Tabela 3: Parâmetros estruturais e magnéticos de nanopartículas de YIG puro e dopadas com neodímio.

Amostra	Parâmetro de rede (Å)	Tamanho cristalito (nm)	Volume (Å ³)	Magnetização de saturação (emu/gm)	Coercividade Hc (Oe)
YIG	12,3829	45,27	1898,74	24,42	1,75
YNG	12,3957	43,78	1904,64	26,23	2,95

Fonte: Retirado de (SHARMA; KUANR, 2018)

Em outro estudo, (PEÑA-GARCIA *et al.*, 2018) avaliou a dopagem de íons cobalto na estrutura da granada, o que ocasionou mudança nos valores de magnetização de saturação e coercividade com o aumento do teor de cobalto nas amostras. A magnetização de saturação em (emu/g) reduziu de 26,63 para 24,92 na amostra com maior teor de cobalto, enquanto que o campo coercitivo em (Oe) aumentou de 82,21 para 94,57 na amostra com maior teor do íon dopante. (PEÑA-GARCIA *et al.*, 2016) também avaliou o efeito da dopagem com zinco na granada, obtendo diminuição na magnetização de saturação e coercividade com o aumento do íon dopante.

Para variadas concentrações dos dopantes, o tamanho de cristalito médio e parâmetros magnéticos são observados na tabela 4:

Tabela 4: Parâmetros estruturais e magnéticos de nanopartículas de YIG dopadas com cobalto e zinco.

Amostra	Tamanho de cristalito (nm)	Magnetização de saturação (emu/g)	Coercividade Hc (Oe)
Co0	43	26,63	82,21
Co1	63	26,48	78,97
Co2	67	25,10	75,68
Co3	58	24,99	87,32
Co4	54	24,92	94,57
Zn0	65	38,89	43,4
Zn1	69	35,50	26,5
Zn2	63	33,00	22,0
Zn3	62	32,57	35,5

Fonte: Retirado de (PEÑA-GARCIA *et al.*, 2016, 2018).

De modo geral, em filmes de YIG, a relação competitiva entre a anisotropia de forma e a anisotropia de superfície vão determinar o tipo de anisotropia determinantes em filmes finos. Anisotropia de forma em filmes espessos contribuem mais para a anisotropia perpendicular ao plano, já que os efeitos magneto-elásticos reduzem devido ao relaxamento das distorções de rede com o aumento da espessura do filme. (CAPKU; YILDIZ, 2021) avaliaram as propriedades magnéticas de filmes finos de YIG de espessuras de 40-120 nm fixados em um substrato de sílica. Os modos de ondas de spin foram avaliados através do uso de ressonância ferromagnética (FMR), indicando que com o aumento da espessura do filme, os campos de ressonância perpendicular e paralelos ficam mais próximos um do outro. A tabela 5 mostra as principais propriedades magnéticas observadas no estudo mencionado:

Tabela 5: Parâmetros magnéticos para filmes de YIG com diferentes espessuras.

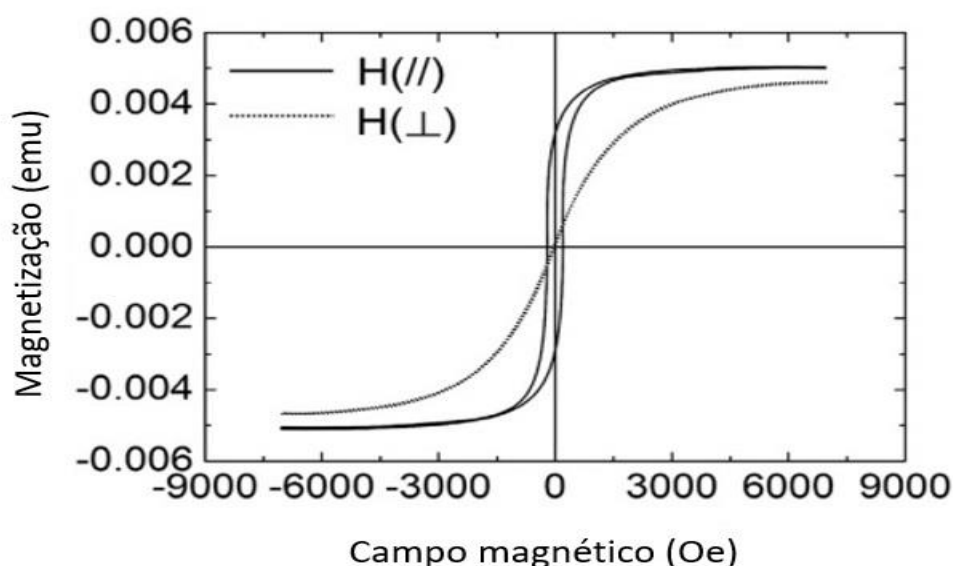
Espessura (nm)	Volume de magnetização de saturação (G)	Coercividade (Oe)	Constante de anisotropia perpendicular (erg.cm ⁻³)	Constante de anisotropia de forma (erg.cm ⁻³)
40	1249,72	-2778,17	1382,14	621,73
90	1331,36	-2736,65	1450,42	705,62
120	1733,28	-2434,59	1679,86	1195,96

Fonte: Retirado de (CAPKU; YILDIZ, 2021).

Por fim no que tange a nanofios e outras estruturas alongadas de YIG, a anisotropia de forma governa a orientação do eixo fácil de magnetização, que é paralelo ao comprimento dos fios, e o campo de ressonância paralelo de FMR é maior que o campo perpendicular devido ao alinhamento do campo com o eixo do nanofio. Tal comportamento é corroborado por (HAYATI *et al.*, 2018), que estudou o comportamento da ressonância ferromagnética em nanofios de YIG, identificando a presença de uma energia de anisotropia magnética uniaxial devido ao arranjo de nanofios formado. A volume de saturação de magnetização $4\pi M_s$ obtido através de VSM foi de 85 G e o fator de carga obtido foi de 35%. O FMR para o campo H aplicado paralelamente ao plano do filme (plano xy) ocorreu a 3230 Oe, enquanto que o campo H aplicado na direção perpendicular ao filme (direção z) ocorreu em 3650 Oe.

Nanofios de YIG fabricados por (SHIN; SON, 2017) foram fabricados pelo processo de decoração por degrau, apresentando diâmetro médio de 70 ± 5.3 nm, e apresentaram curva de histerese ferromagnética M-H típica com magnetização remanente de $2,54 \times 10^{-3}$ emu, temperatura de Currie de 287 °C e campo coercitivo de aproximadamente 211 Oe. O domínio magnético estrutural dos nanofios foi avaliado e ele se apresentou paralelo ao comprimento dos mesmos. A figura 8 mostra o comportamento magnético de fios de YIG submetidos a um campo magnético paralelo e perpendicular:

Figura 8 - Curva de histerese da magnetização de um fio de YIG paralelo e perpendicular a um campo magnético externo.



Fonte: Imagem retirada de (SHIN; SON, 2017).

3.5 NANOFIOS

Nanofios são estruturas unidimensionais alongadas apresentando um disco ou outra forma geométrica simples com poucos nanômetros de comprimento em sua seção transversal (ZHANG; ZHENG; LIEBER, 2016). A base de sua construção consiste em deixar duas dimensões nanométricas enquanto que outra cresce em grande comprimento. Como suporte as técnicas de preparação geralmente são utilizadas *templates* como base para formação dos nanofios, com os *templates* de alumina anódica porosa e policarbonato sendo os mais utilizados (CABALLERO-CALERO; MARTÍN-GONZÁLEZ, 2020).

O *template* poroso de alumina anódica foi desenvolvido por Masuda e Fukuda, em 1995 (MASUDA; FUKUDA, 1995). O processo de formação envolve o uso de folhas de alumínio e passa por duas etapas de anodização, produzindo assim templates porosos de óxido de alumínio. Modificando-se os parâmetros de anodização, é possível obter *templates* com diâmetros variados de poro (ABAD; MAIZ; MARTÍN-GONZÁLEZ, 2016; MASUDA; FUKUDA, 1995; SULKA, 2008). Além disso, o processo de anodização é capaz de produzir poros altamente organizados na

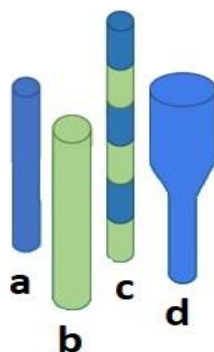
estrutura desejada. Variando o tipo de eletrólito utilizado é possível obter diâmetros de poro variando chegando até algumas centenas de nanômetros (ABAD; MAIZ; MARTIN-GONZALEZ, 2016). Ácido sulfúrico, ácido oxálico, ácido fosfórico costumam ser os eletrólitos mais utilizados em estudos para fabricação desse tipo de material (MARTÍN; MANZANO; MARTÍN-GONZÁLEZ, 2012).

Os *templates* poliméricos são geralmente feitos à base de policarbonato, poli(etileno tereftalato) ou poliamida. O polímero sob um processo de irradiação por feixe de íons para ocasionar danos em sua superfície. Posteriormente é feito um processo de ataque químico é feito para obtenção dos poros. A técnica, porém, produz poros não organizados e com ângulos de inclinação diferentes (CHEN; LIU, 2011; MEDINA *et al.*, 2018).

Também é possível se obter nanofios sem o uso de *templates* por meio da técnica de eletrofiação, deposição por vapor químico, e métodos a base de soluções como crescimento solução-líquido-sólido e fluido-líquido-sólido supercrítico. Zeng e colaboradores (2018), produziram nanofios compósito a base de duas perovskitas, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) e $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ (LSCO) utilizando-se a eletrofiação com diâmetro médio de 220 nm (ZENG *et al.*, 2019). Wang e colaboradores (2018) sintetizaram nanofios híbridos de grafite e carbeto de silício utilizando o método, obtendo nanofios com diâmetros variando entre 300 e 500 nm (WANG *et al.*, 2018). Altay e Eroglu (2020) produziram nanofios de germânio a partir de dióxido de germânio e metano como precursores utilizando o método de deposição por vapor químico. Os nanofios obtidos possuíam diâmetro médio de 105 ± 60 nm (ALTAY; EROGLU, 2020).

Dependendo da técnica e do *template* utilizado, podemos ter diferentes formatos de nanofios. Mudanças realizadas na fabricação dos templates podem ser usadas para obter nanofios com modulações no diâmetro dos poros, já mudanças realizadas na composição química, como alterar o tipo de solução precursora utilizada durante o crescimento das nanoestruturas, podem produzir nanofios apresentado segmentos contendo diferentes componentes (ZHANG; ZHENG; LIEBER, 2016). A figura 9 mostra exemplos dos principais nanofios estudados atualmente:

Figura 9 - Nanofios simples de diferentes diâmetros (a-b); nanofio segmentado (c) e nanofio com modulação de diâmetro (d).



Fonte: O autor.

No estudo de suas diferentes conformações, os nanofios têm grande potencial para fornecer respostas concernentes à relação entre as propriedades físicas e a dimensionalidade em nanoescala. Parâmetros como diâmetro e comprimento dos nanofios tem relação direta com propriedades como performance optoeletrônica, condutividade térmica e condutância elétrica (BERGIN *et al.*, 2012; LÜ; SHEN; CHU, 2002). Como a compreensão das propriedades magnéticas nos nanomateriais está em constante crescimento, os nanofios vêm sendo estudados ao longo dos anos principalmente no que tange a observação das paredes de domínio quando os mesmos estão curvados (SKORIC *et al.*, 2021). Entre as principais aplicações almejadas para os nanofios e seus respectivos arranjos temos: spintrônica, nanofotônica, pontas de sonda de microscopia, dispositivos nanoeletrônicos, sondas para detecção química e biológica, entre outros (AMBHORKAR *et al.*, 2018; HIROHATA *et al.*, 2020; ZHU *et al.*, 2018).

Estudos vêm sendo realizados nos últimos anos avaliando as características morfológicas e magnéticas de diferentes tipos de nanofios. Shapouri e colaboradores (2020) caracterizaram fisicamente nanofios de óxido de cobre (CuO) fabricados em uma folha de cobre a partir do processo de oxidação térmica em um forno adaptado com um campo magnético estático provenientes de ímãs de neodímio, com a direção de crescimento dos nanofios em posições paralelas e antiparalelas a direção do campo aplicado. Caracterização física incluiu difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de transmissão por emissão de campo (FESEM) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Análises realizadas por magnetômetro de amostra vibrante

(VMS) indicaram que as duas amostras de CuO apresentaram comportamento ferromagnético (SHAPOURI *et al.*, 2021).

Chen e colaboradores (2020) avaliaram a dependência de fase das propriedades magnéticas de arranjos de nanofios de CoFeB por deposição eletroquímica, observando mudanças na coercividade, a razão entre a magnetização remanente e a magnetização de saturação, e a forma dos laços de histerese antes do processo de tratamento térmico. Os nanofios produzidos apresentaram 250 nm de diâmetro e 20 μ m de comprimento. MET e DRX foram utilizados na caracterização morfológica, mostrando precipitação parcial dos nanocristalitos de Co em 573 K e completa cristalização no processo de recozimento a 773 K. Análises magnéticas indicaram que os arranjos de nanofios amorfos apresentaram anisotropia magnética com o eixo fácil de magnetização perpendicular ao eixo do nanofio. Interações magnetostáticas desempenharam efeito positivo no processo de reversão de magnetização observado (CHEN *et al.*, 2021).

Em 2019, Xu e colaboradores estudaram os efeitos do diâmetro de gradiente nas propriedades magnéticas de arranjos de nanofios de liga de ferro-níquel preparados por eletrodeposição com potencial constante em membrana de alumina. Caracterização física incluiu microscopia eletrônica de transmissão, difração de raios X e espectroscopia por energia dispersiva, mostrando gradiente de diâmetro variando entre 28 e 106 nm. Medidas de histerese das amostras com gradiente (GDNWs) foram comparadas com amostras com dimensões uniformes (UDNWs). Enquanto que as UDNWs apresentaram variação de estado de domínio de simples para múltiplos domínios com o aumento do diâmetro das amostras, as GDNWs apresentaram apenas estado de domínio simples (XU *et al.*, 2020).

Também em 2019, Zhang e colaboradores sintetizaram nanotubos de YIG de diferentes diâmetros utilizando o método de sol-gel em templates de alumina anódica e posteriormente suas propriedades magnéticas foram avaliadas. Uma fase pura de YIG foi obtida através do processo de recozimento a 800° C. Nanotubos de diâmetros variando de 80 a 200 nm e espessura variando de 20 a 30 nm foram produzidos. Apresentaram estrutura policristalina e sistema isotrópico sem a presença de um eixo fácil de magnetização. Medidas de magnetização à temperatura ambiente indicaram que a coercitividade diminuiu significativamente com o aumento do diâmetro dos nanotubos produzidos. Quando a temperatura fica acima dos 36,85 °C, os nanotubos migram do estado ferromagnético para o superparamagnético, indicando que os

nanotubos são constituídos em sua maioria por domínios simples não interagentes (ZHANG *et al.*, 2019).

Em 2020, Hayati e colaboradores sintetizaram fios de YIG de diâmetros médios de 2,5 μm em membranas de sílica utilizando o método sol-gel. Durante o processo de permeação dos poros, um sistema de vácuo foi aplicado de modo a facilitar a permeabilidade da solução e o sistema foi submetido a um tratamento térmico a 800° C por 2 horas. Investigações magnéticas por magnetômetro de amostra vibrante permitiu concluir que a saturação de magnetização foi menor comparada com o material maciço. Um campo de anisotropia uniaxial foi obtido pelas medições de ressonância ferromagnética, com valor de 398 Oe (HAYATI *et al.*, 2020).

Em 2017, Shin e Son fabricaram nanofios de YIG através da técnica de deposição de laser pulsado em substratos de grafite pirolítico altamente orientados pela técnica de deposição em degrau, obtendo nanofios de 70 nm de diâmetro. Eles apresentaram um loop de histerese ferromagnética na direção paralela aos nanofios e antiferromagnetismo na direção perpendicular ao crescimento dos nanofios. Imagens de microscopia de força magnética lateral e vertical obtidas mostraram que a direção de magnetização dos nanofios foi paralela a suas orientações, indicando a existência de um único domínio ferromagnético (SHIN; SON, 2017).

O estudo de nanofios de YIG é de promissor interesse devido a possuírem uma área específica superficial muito maior do que as suas contrapartes em macroescala, apresentar menor caminho livre, das variações que as propriedades magnéticas como largura de linha ferromagnética, magnetização de saturação e efeito da reversão de magnetização podem apresentar em função do diâmetro e comprimento dos nanofios, dos efeitos de dopagem com outro elemento químico de interesse, assim como apresentar potencial aplicação para uso em sensores, dispositivos magneto-ópticos, armazenamento de dados de alta densidade e dispositivos de micro-ondas (PAN *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2019).

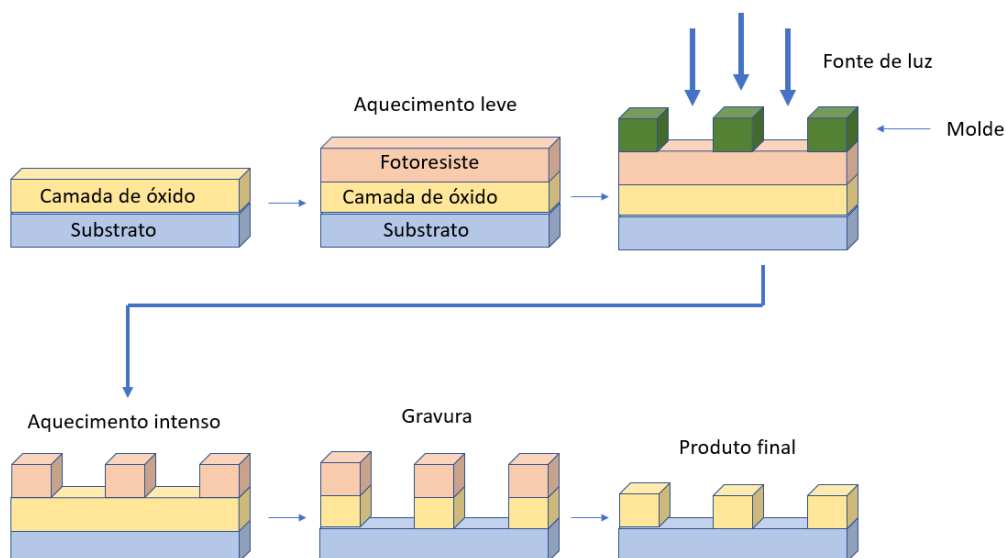
3.6 TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE NANOFIOS

Algumas técnicas vêm sendo utilizadas ao longo dos anos no que se refere a preparação de nanofios e são classificadas de diferentes formas, sendo a *top-down* e a *bottom-up* as mais observadas na literatura. Nas técnicas *top-down*, as nanoestruturas são formadas a partir da diminuição de tamanho de amostras bulk (geralmente *wafers* ou cristais) através de ataques químicos até a obtenção do formato desejado, enquanto que nas técnicas *bottom-up*, são formadas quando átomos ou moléculas se acomodam uns sobre os outros, geralmente com o auxílio de um template, e assim a nanoestrutura desejada é formada conforme o processo de deposição acontece (HUANG *et al.*, 2012; SCOTT *et al.*, 2016; STAÑO; FRUCHART, 2018).

A litografia é uma técnica *top-down* comumente utilizada na produção de materiais eletrônicos em pequenas dimensões para aplicações na área. Nela o material é parcialmente coberto por um material que possua resistência ao ataque químico que será realizado visando-se obter o padrão de nanoestrutura desejado. Devido ao processo de ataque químico não ser uniforme, os nanofios metálicos acabam apresentando morfologia cônica e não cilíndrica, embora o uso de um reagente químico que promova crescimento anisotrópico possa reduzir a formação desse tipo de estrutura (HILL; CAHOON, 2017).

Muito utilizada para produção de circuitos integrados, a litografia óptica utiliza luz ultravioleta para transferir o molde desejado de uma máscara para um material sensível à luz. Utilizando elétrons no lugar dos fótons, também é possível criar moldes utilizando a litografia de feixe de elétrons e a litografia de feixe de íons, muito utilizados para produzir moldes de nanoestruturas. Estudos recentes mostram que a litografia é muito utilizada na fabricação de nanofios de semicondutores e metais (LEE *et al.*, 2018; PARK *et al.*, 2010; RAMADAN *et al.*, 2020; ZA'BAH *et al.*, 2012). A figura 10 mostra as etapas de um processo de litografia por aquecimento e aplicação de luz ultravioleta, com a aderência do fotoresiste, a aplicação da fonte de radiação e a formação do molde com posterior gravura e produto final:

Figura 10 - Processo de litografia óptica por aplicação de luz ultravioleta.

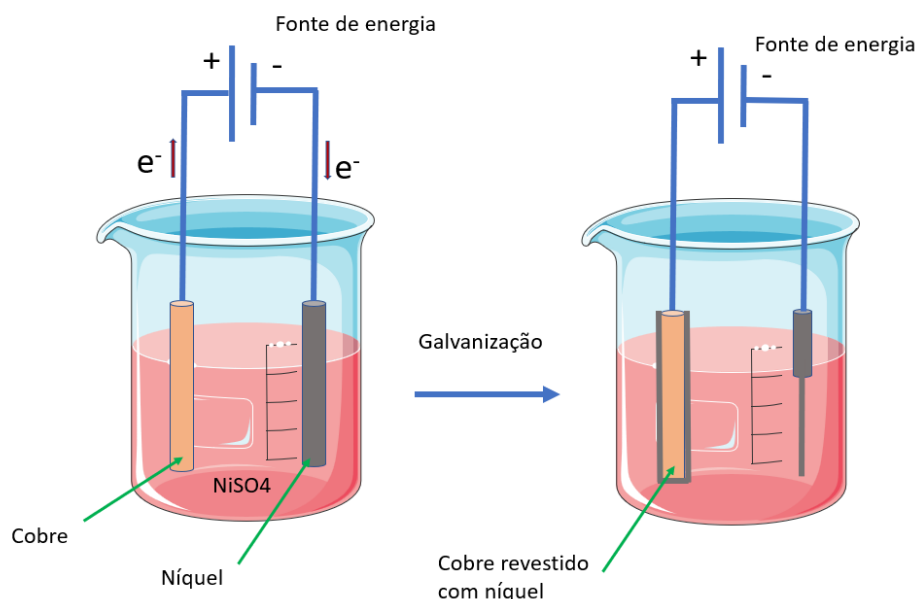


Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2021).

A galvanoplastia (eletroquímica) ou electroplating é uma técnica bottom-up utilizada na produção de nanofios consistindo na deposição de um revestimento metálico em outra superfície. Uma célula simples necessita de dois eletrodos, um eletrólito e uma fonte de elétrons externa (fonte de energia). O processo de deposição ocorre no cátodo por corrente contínua e pode ser realizada fixando-se a corrente ou o potencial (CHUANG; HONG; SANCHEZ, 2016; STAÑO; FRUCHART, 2018).

Com a corrente constante é possível controlar com mais eficiência o comprimento dos nanofios enquanto que o potencial constante permite um maior controle das propriedades magnéticas e da cristalografia, fator muito importante caso se trabalhe com estruturas segmentadas. Metais, ligas e semicondutores podem ser sintetizados pela técnica, com o produto final podendo ser aplicado em diferentes áreas (CHUANG; HONG; SANCHEZ, 2016; GUO *et al.*, 2020). A figura 11 mostra o processo de galvanoplastia utilizada no revestimento por níquel em um eletrodo de trabalho a base de cobre, visando aplicações para medição de valores de glucose obtidos através de amostras de urina:

Figura 11 - Processo de galvanização para obtenção de eletrodo de cobre revestido com níquel.

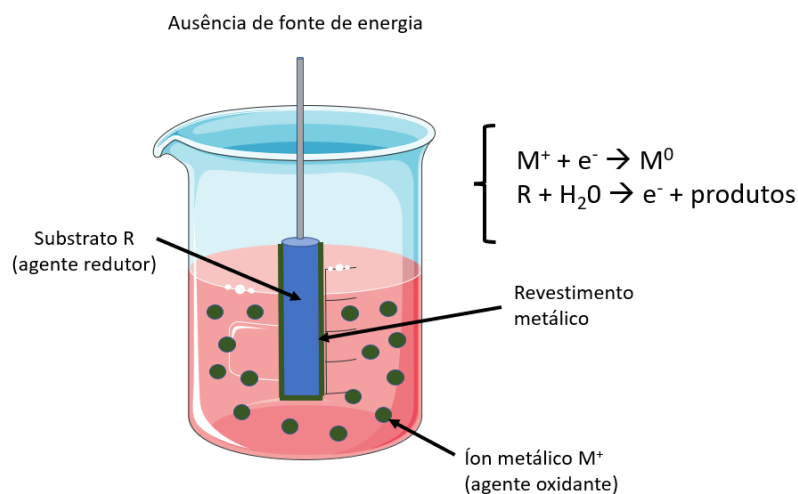


Fonte: Adaptado de (HAKIM; PANGESTU; RIYANTO, 2022)

A galvanização sem eletrodo, também conhecida como revestimento químico ou electroless plating, é uma técnica similar à galvanoplastia tradicional, mas que não necessita de uma corrente elétrica externa, ou seja, o processo de deposição acontece devido a uma reação química pela adição de um agente redutor a solução (CHUANG; CHANG; SANCHEZ, 2019; POGES *et al.*, 2018).

A escolha do agente redutor depende do material a ser revestido e da resistência química observada entre o template e o substrato. Soluções contendo boro ou fósforo, dependendo da concentração desses ativos, podem modificar características como tamanho de grão, condutividade elétrica e dureza mecânica (STAÑO; FRUCHART, 2018). Com o auxílio de templates é possível obter diâmetros menores que 100 nm. Nanofios de óxidos, metais e ligas podem ser produzidos pela técnica (CHUANG; CHANG; SANCHEZ, 2019; MUENCH *et al.*, 2017; POGES *et al.*, 2018; SCHAEFER *et al.*, 2016).

Um processo simples de galvanização sem eletrodo pode ser visto na figura 12, com seus respectivos componentes e reações:

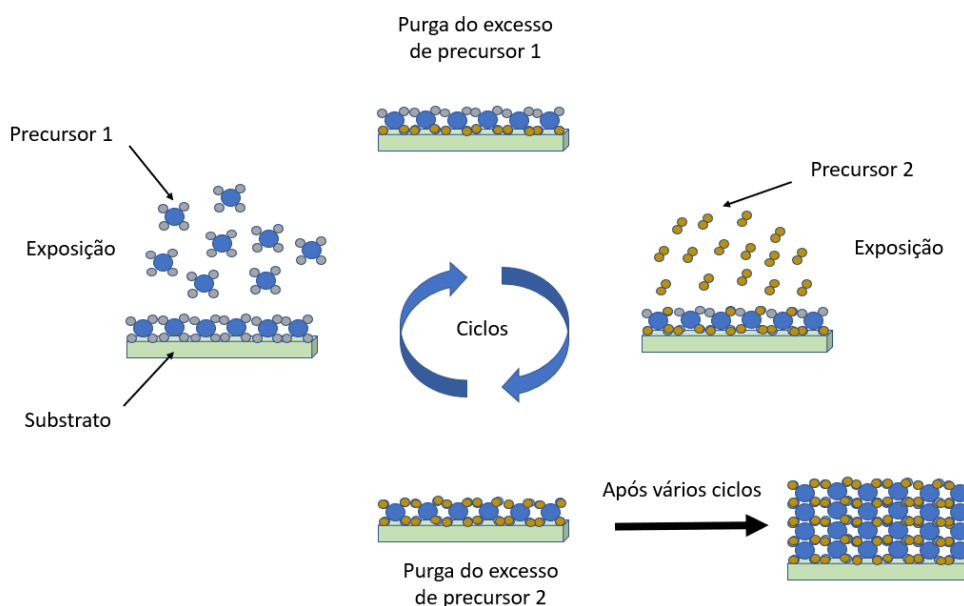
Figura 12 - Processo de galvanização sem eletrodo.

Fonte: Adaptado de (SHACHAM-DIAMAND *et al.*, 2015).

A deposição por camada atômica é uma técnica derivada da deposição por vapor químico que pode ser utilizada para produção de filmes finos, nanofios e nanotubos. O processo de deposição acontece em ciclos, iniciando com a amostra entrando em contato com um precursor gasoso, que se adere à superfície do substrato e em seguida ela entra em contato com um gás inerte, como nitrogênio ou argônio. Esse ciclo se repete dependendo do número de precursores utilizados, onde cada contato forma uma fina camada, o que torna o processo autolimitante (STAÑO; FRUCHART, 2018).

Com a técnica é possível controlar a espessura dos nanotubos formados, dependendo da quantidade de ciclos desejados. Óxidos como ZnO, TiO₂ já foram utilizados na síntese de nanotubos assim como uso de SnO₂ como camada ultra fina para revestimento de nanotubos de carbono para uso em ânodos de baterias de íon-lítio (DVORAK *et al.*, 2019; SURABHI *et al.*, 2018; ZHU; LIU; SUN, 2019). A figura 13 mostra um processo de deposição por camada atômica e suas etapas, mostrando o contato do substrato com os precursores gasosos:

Figura 13 - Processo de deposição por camada atômica.

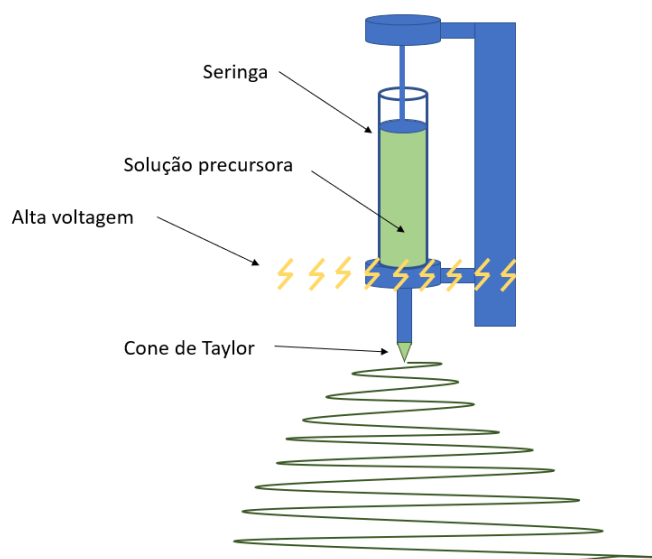


Fonte: Adaptado de (KIM *et al.*, 2019).

A eletrofiação é uma técnica utilizada na formação de nanofios poliméricos, tendo como base uma solução sol-gel precursora. Essa solução é inserida em uma seringa metálica com uma pequena abertura e uma alta voltagem é aplicada entre a seringa e o eletrodo coletor, geralmente um cilindro rotativo (STAÑO; FRUCHART, 2018).

A gota formada na ponta da seringa em contato com a alta voltagem forma o chamado cone de Taylor, e o campo elétrico proveniente dessa fonte de energia transforma a gota em fibra que é posteriormente coletada pelo cilindro rotativo. Um controle adequado da voltagem aplicada deve ser observado tendo em vista que voltagens muito grandes podem gerar uma densidade de cargas muito grande na gota causando instabilidade do fio formado. A taxa de vazão e a distância da seringa ao coletor também são parâmetros de interesse, pois influenciam diretamente no diâmetro e morfologia dos fios obtidos (LEE *et al.*, 2018; LEITE, 2019; WANG *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2007; XING *et al.*, 2020). A figura 14 mostra um processo simples de eletrofiação e seus principais componentes:

Figura 14 - Esquema de um processo de eletrofiação simples.



Fonte: Adaptado de (LURAGHI; PERI; MORONI, 2021).

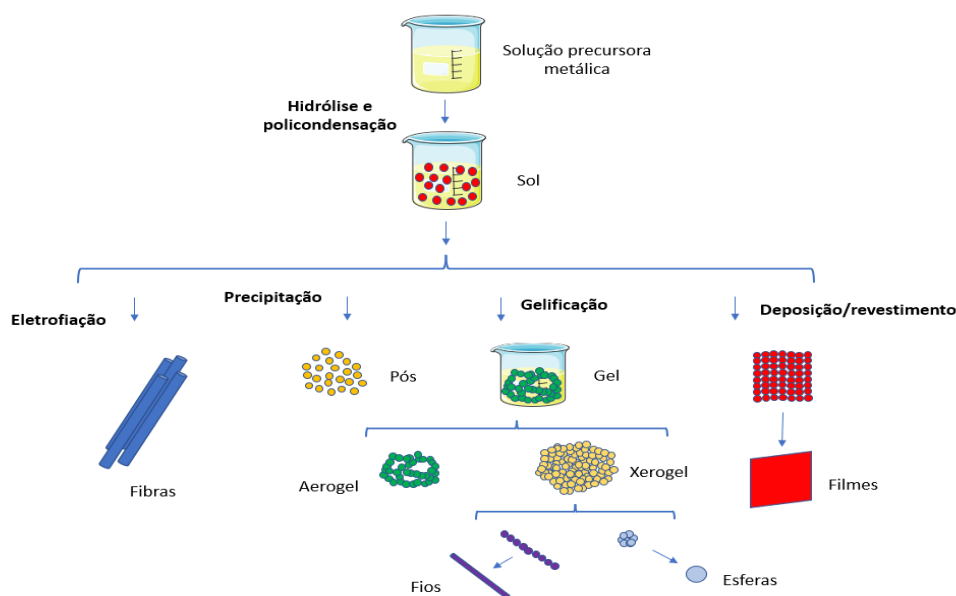
3.6.1 Método Sol-Gel

Embora extremamente versátil e podendo ser utilizado para se obter diversas estruturas com geometrias distintas, o método sol-gel também é utilizado na fabricação de nanofios e nanotubos, com auxílio de templates porosos, geralmente de alumina anódica ou sílica, que atuam como moldes para formação das nanoestruturas além de serem resistentes aos tratamentos térmicos em que as amostras são submetidas. Inicialmente é preparada uma solução coloidal (um sol) com o uso de reagentes precursores, visando-se obter partículas em tamanho nanométrico (BOKOV *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2019).

Em seguida, ocorre o processo de gelificação, que acontece sob agitação constante a temperatura ambiente. O controle do pH no processo é muito importante para se obter a fase desejada. Os templates porosos então são imersos na solução final obtida para preenchimento dos poros, após isso os templates são limpos superficialmente e seguem para processo de recozimento para evaporação do solvente e formação das estruturas unidimensionais nos poros. É um processo relativamente barato e prático, pode produzir nanofios e nanotubos de diâmetros variados dependendo das dimensões dos poros presentes nos templates (HAYATI *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019).

O método sol-gel também pode ser empregado junto ao processo de eletrofiação, também sendo utilizado para deposição de nanofibras cerâmicas, obtendo-se materiais porosos de alto teor de pureza (GEORGE *et al.*, 2021). A figura 15 mostra os principais processos de fabricação de materiais obtidos pelo método sol-gel:

Figura 15 - Síntese sol-gel e suas principais ramificações e produtos finais obtidos.



Fonte: Adaptado de (BOKOV *et al.*, 2021).

Estudos recentes utilizaram o método sol-gel para fabricação de nanofios de alta qualidade direcionados a diversas aplicações. Lin e colaboradores (2018) produziram carbeto de silício cúbico (3C-SiC) através de método de redução carbotérmica associado ao sol-gel. Os nanofios obtidos apresentaram diâmetro variando entre 80 – 100 nm e análise por difração de raios-X confirmou a estrutura cúbica desejada (LIN *et al.*, 2018).

Pirouzfar e colaboradores (2014) realizaram modificações nos parâmetros de pH e temperatura de calcinação do método sol-gel para obter nanofios de ferrita de cobalto. O pH foi testado em valores de 1, 3 e 7 e as temperaturas de calcinação entre 400 e 700 °C. Com o pH=7 foram observadas fraturas nos nanofios devido ao processo de autocombustão do gel em meio alcalino, indicando assim o uso de pH mais ácidos para otimizar a síntese. Foi possível obter uma fase única de ferrita de

cobalto em 600 °C. Os nanofios apresentaram maior coercividade na direção paralela ao comprimento dos fios do que na direção perpendicular (PIROUZFAR; SEYYED EBRAHIMI, 2014).

Zhang e colaboradores (2020) desenvolveram óxido de manganês lítio (LiMn_2O_4) pelo método sol gel e o caracterizaram eletroquimicamente para o uso em baterias recarregáveis. O eletrodo a base de nanofios com elevada área superficial conseguiu melhorar as propriedades cinéticas do material e os nanofios foram capazes de fornecer 0,8 mA/g a uma corrente de alta densidade com alta retenção de corrente após 99 ciclos. Foram observados por MET que após o teste de carga ganharam um aumento de volume entre 10-20 % (ZHANG *et al.*, 2020).

3.7 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

3.7.1 Magnetômetro de amostra vibrante (VSM)

O magnetômetro de amostra vibrante, desenvolvido por Simon Foner, é um dos sistemas mais comuns de caracterização magnética dos materiais pela sua simplicidade, aplicabilidade a diferentes tipos de materiais e precisão (FONER, 1959). A figura 16 mostra um sistema convencional de um magnetômetro de amostra vibrante, que possui um vibrador, um eletroímã, fonte de energia e um gaussímetro ou teslâmetro com uma sonda detectora.

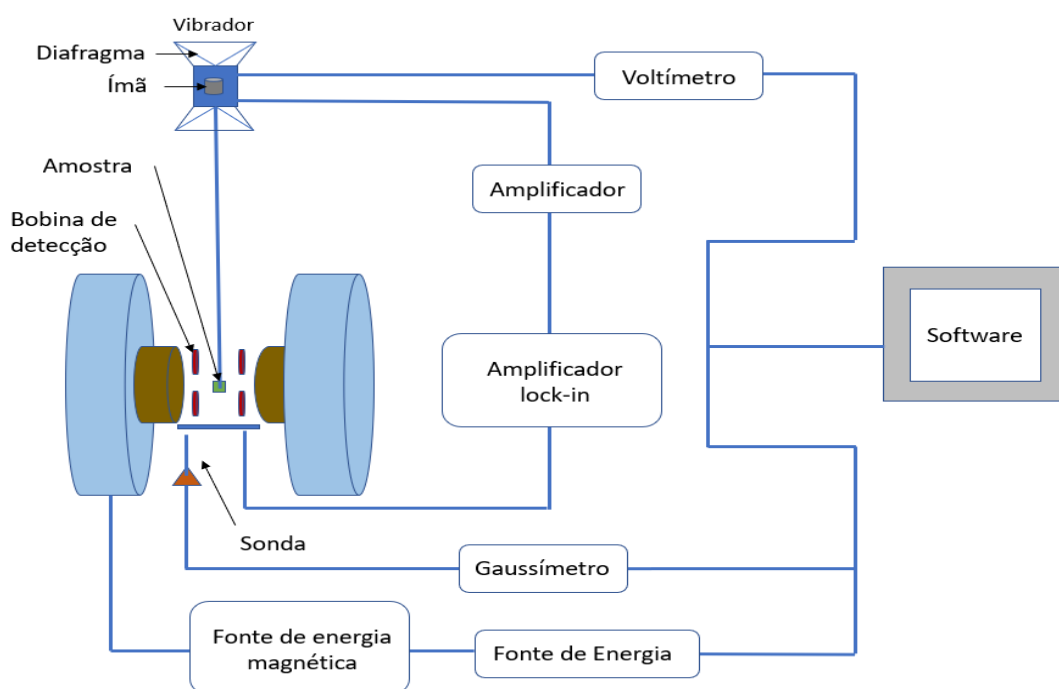
Em seu mecanismo, uma frequência definida e amplitude constante são aplicadas ao se acionar um oscilador onde a haste contendo a amostra é fixada, em um suporte não magnético onde amostras em qualquer formato podem ser posicionadas. Uma sonda Hall acoplada a um gaussímetro é estruturada de forma a garantir um melhor controle do campo magnético gerado próximo ao eletroímã. Conforme a amostra se desloca através do espaço existente entre as bobinas de captação, um campo eletromagnético é gerado, baseado na lei de Faraday. As bobinas, além de garantirem uma resposta linear dos dados medidos, são responsáveis por enviar o sinal obtido, que é processado através de um amplificador lock-in (THOMSON, 2014).

Para medições que desejem avaliar o impacto da temperatura nas propriedades magnéticas, um sistema de controle de temperatura, podendo variar

aproximadamente entre 2 e 1000k, pode também ser adicionado ao sistema (LOPEZ-DOMINGUEZ *et al.*, 2018; THONGDEE, 2020).

Entre os parâmetros que afetam negativamente a sensibilidade do VSM estão: o mal posicionamento das bobinas de captação em relação ao suporte amostral; presença de fontes externas de sons mecânicos ou elétricos; diminuição de valores de amplitude e frequência de vibração. Bobinas de captação em formatos inadequados para determinadas amostras também contribuem negativamente para a sensibilidade do equipamento (DODRILL; REICHARD, 2021). Através dos ensaios de VSM é possível determinar parâmetros de interesse como coercividade magnética e remanência e magnetização de saturação, através da curva de histerese.

Figura 16 - Esquema de um magnetômetro de amostra vibrante.



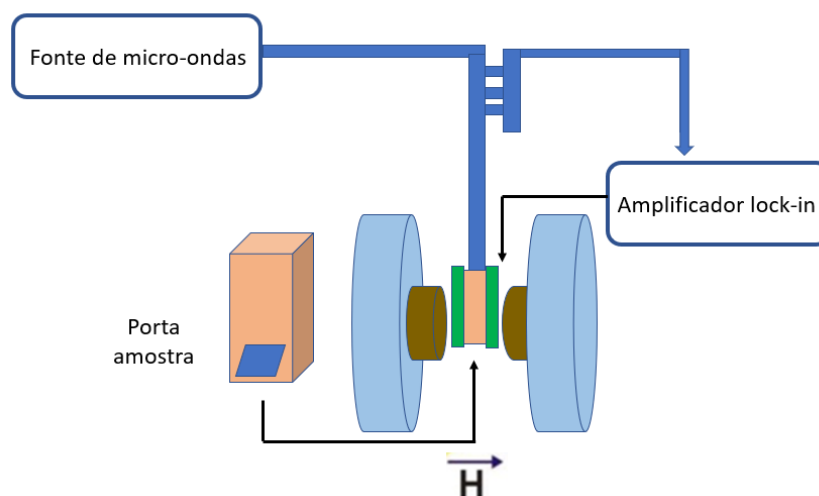
Fonte: Adaptado de (THONGDEE, 2020).

3.7.2 Ressonância ferromagnética (FMR)

Quando o campo magnético aplicado em um material magnético possuir uma direção diferente da magnetização produzida, um torque será gerado, criando um efeito conhecido como precessão de magnetização. Caso o campo aplicado seja removido, o ângulo oriundo dessa precessão tenderá a zero, originando um processo conhecido como amortização (SUN, 2014).

Em sua montagem experimental, o FRM, conforme visto na figura 17, possui um guia de onda que produz um campo magnético que tem como função promover uma perturbação na magnetização da amostra, já que ela se encontra previamente saturada por um campo magnético oriundo dos eletroímãs existentes no equipamento. As mudanças observadas na magnetização são oriundas dos processos de precessão ocasionados pelas perturbações. Após as medições, todo o processo de absorção é convertido em uma curva com a derivada da Lorentziana dos dados obtidos, sendo assim possível obter a largura de linha dos materiais para uma determinada frequência de ressonância, assim como parâmetros de interesse como a constante de amortecimento dos mesmos. As medidas são realizadas com variação de ângulo, para avaliação das modificações de ressonância apresentadas em diferentes direções (SILVA, 2022).

Parâmetros magnéticos dinâmicos de interesse como domínios de magnetização, tempo de relaxamento, assim como algumas propriedades magnéticas estáticas também podem ser medidas pela técnica. Em relação aos nanofios metálicos, parâmetros característicos que influenciam nas medidas de FMR incluem sua polarização elétrica e a dependência da impedância de superfície no diâmetro dos fios (KRAUS, 2015; SUN, 2014).

Figura 17 - Equipamento de FMR.

Fonte: Adaptado de (SUN, 2014).

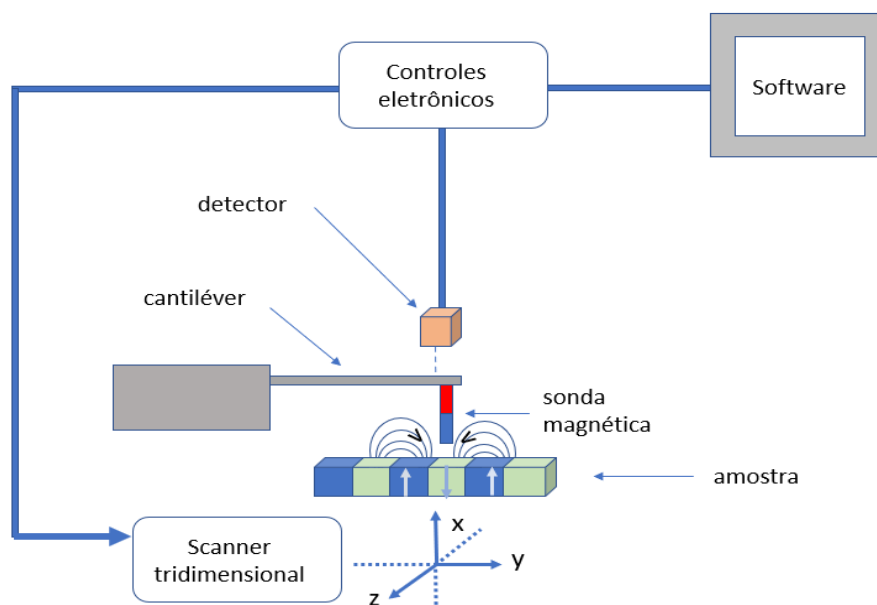
3.7.3 Microscopia de força magnética (MFM)

A microscopia de força magnética é uma técnica utilizada para medições de propriedades magnéticas de superfície, sendo uma de suas vantagens principais a facilidade de preparação das amostras a serem analisadas, sendo direcionada para medidas nano magnéticas em diferentes temperaturas e condições do meio (FOLKS; WOODWARD, 1998; HARTMANN, 1999; POGGIO, 2020).

Com ela é possível observar a distribuição de campos em escala microscópica, através do uso de forças magnéticas atuando entre a superfície magnetizada e a ponteira magnetizada. Interações magnéticas dipolo-dipolo podem ser medidas através da técnica. O MFM também é comumente utilizado para obtenção de imagens magnéticas de alta resolução e é bastante útil na identificação de interações moleculares. Análises de MFM são encontradas em muitas aplicações, como fenômenos de super-condução, física de estado sólido e estudos de gravação magnética (HARTMANN, 1999; HOPSTER; OEPEN, 2005). O MFM também é utilizado para estudos magnéticos de nanoestruturas buscando entender a relação entre os parâmetros estruturais dos materiais com as propriedades magnéticas que eles apresentam (HOPSTER; OEPEN, 2005).

A figura 18 mostra os principais componentes de um equipamento de MFM. Durante sua utilização, uma amostra plana e uniforme é posicionada abaixo de uma ponteira magnética acoplada a um cantiléver com ponta flexível. Um campo magnético é gerado entre a amostra e a ponteira, e através de interações magnéticas entre os dois objetos a ponteira é atraída em direção a amostra, gerando assim um sinal que é detectado de forma optica e direcionado ao software. O cantiléver escaneia a superfície da amostra de forma rasterizada, realizando medições que podem levar até 30 minutos, obtendo dessa maneira a imagem do campo desmagnetizante (ABELMANN, 2017).

Figura 18 - Esquema do processo de medição por MFM.



Fonte: Adaptado de (ABELMANN, 2017)

3.7.4 Magnetometria SQUID

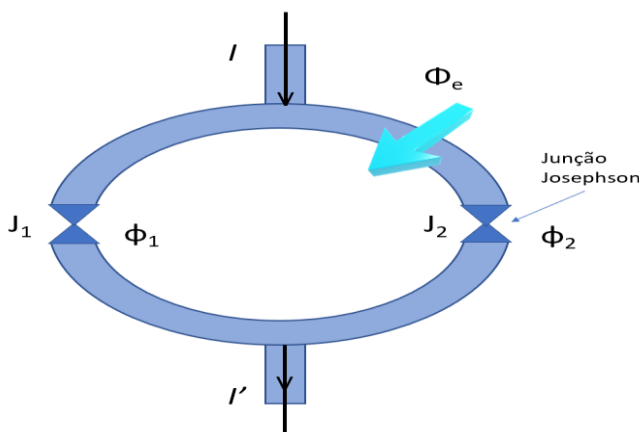
A magnetometria SQUID, sigla para dispositivo supercondutor de interferência quântica, é utilizado para medir momentos de dipolo magnético em amostras baseado em processos de supercondutividade e no efeito Josephson. O efeito Josephson, que foi descoberto por Brian Josephson em 1962, é um fenômeno que envolve super correntes quânticas. Junções Josephson convencionais são estruturas constituídas

de dois dispositivos supercondutores acoplados através de um canal de dimensões muito pequenas, por onde o processo conhecido como tunelamento de elétrons ocorre (HOU *et al.*, 2018; JOSEPHSON, 1962).

O magnetômetro SQUID, visto na figura 19, que consiste de um aparato circular que possui extensões diametricamente opostas em suas extremidades, a corrente I entra por uma das extremidades e se divide ao encontrar uma ramificação em duas correntes I_1 e I_2 . Uma mudança de fase ocorre quando estas correntes atravessam as junções Josephson, dispostas em paralelo no sistema, se tornando I'_1 e I'_2 , respectivamente. Todo esse processo ocorre enquanto um fluxo magnético Φ passa através do sistema, sendo, conseqüentemente, o responsável pela mudança de fase observada nas correntes. O sinal é medido em termos de outros parâmetros, como tensão. (PRANAV, 2021).

O SQUID é uma técnica magnética extremamente sensível, sendo utilizada como carro chefe nas medições realizadas pelo sistema de medição de propriedade magnética, devido a sua elevada precisão, podendo medir momentos magnéticos de valores muito baixos. A distância entre o detector e a amostra, assim com as dimensões do mesmo, podem impactar diretamente nos resultados obtidos. Pode ser utilizado como sonda em aplicações biológicas, sendo capaz de magneticamente monitorar drogas no sistema digestivo do corpo humano (HAO *et al.*, 2010; JOHNSON, 2014; POGGIO, 2020; PRANAV, 2021).

Figura 19 - Representação esquemática de um magnetômetro SQUID.

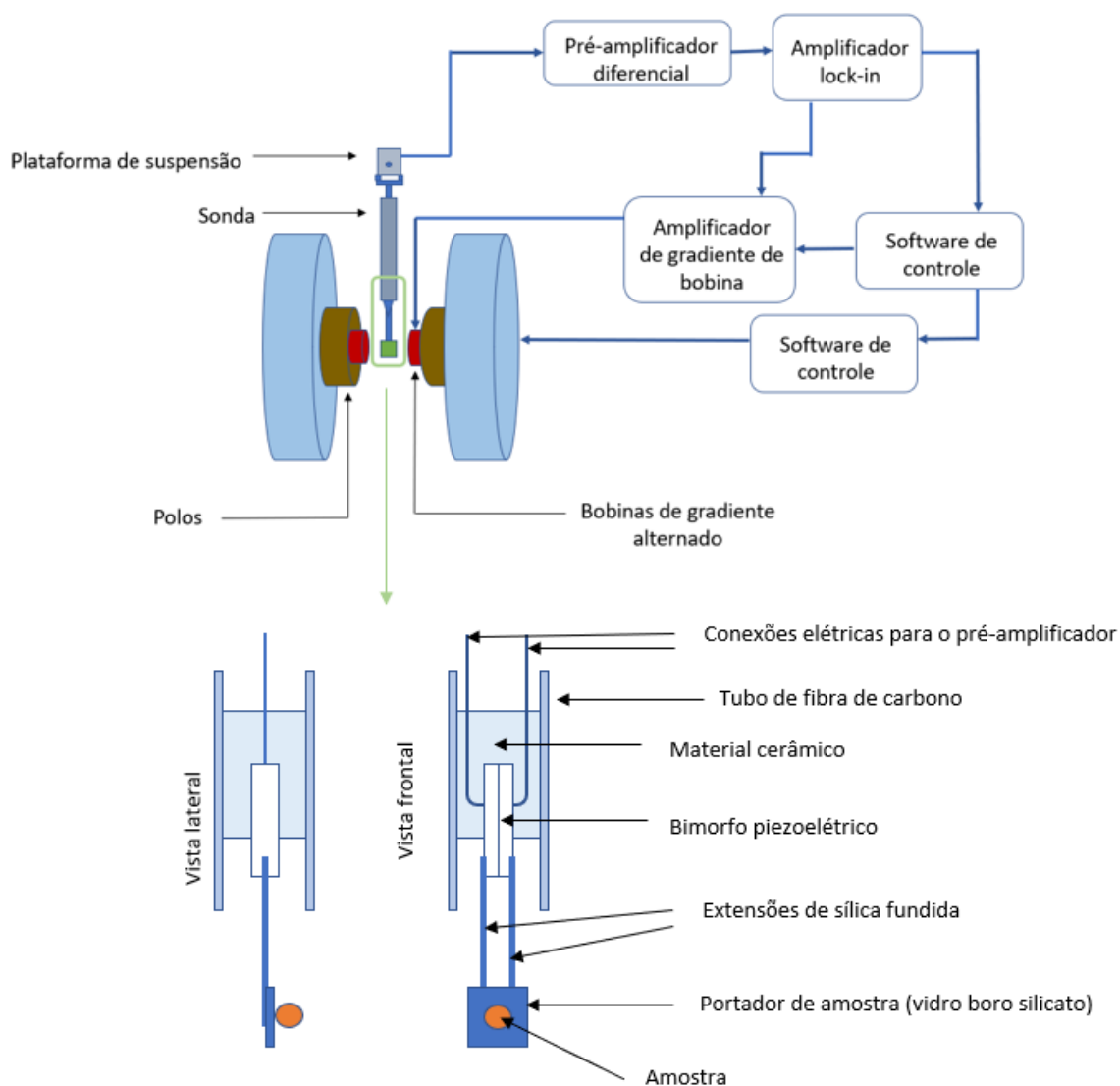


Fonte: Adaptado de (ASKERZADE; ASKERBEYLI, 2020).

3.7.5 Magnetometria de força gradiente alternante (AGFM)

É uma técnica de caracterização de amostras magnéticas através da aplicação de um campo magnético externo e a consequente medição da força exercida na amostra pelo mesmo. O momento magnético pode ser estimado através do valor de força alternante e da magnitude de gradiente do campo magnético (DODRILL; REICHARD, 2021; PÉREZ *et al.*, 2015).

Figura 20 - Esquema do processo de medição por AGM.



Fonte: Adaptado de (DODRILL; REICHARD, 2021).

A figura 20 mostra os principais componentes de um AGM convencional. Um suporte de vidro quadrado é conectado a uma base feita de sílica, onde a amostra é posicionada. Um gradiente alternante é então aplicado ao sistema, proveniente de um eletroímã. A sonda piezoelétrica, que atua de forma similar a um receptor de som, é utilizada para realizar as medições, convertendo a força aplicada na amostra em um sinal elétrico correspondente de mesma frequência, que é posteriormente recebido por um amplificador. (DODRILL; REICHARD, 2021).

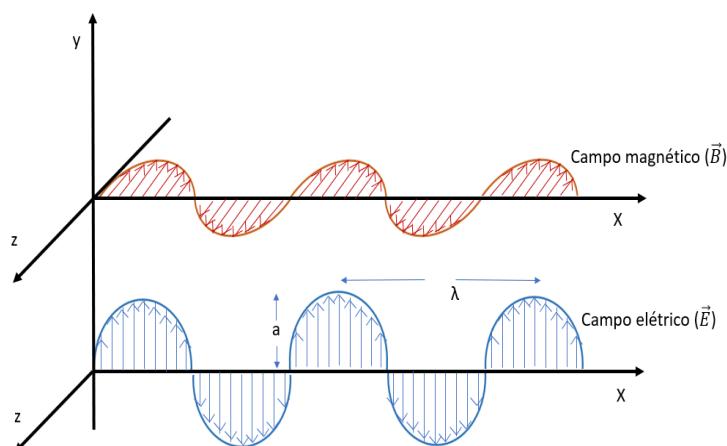
Devido a sua elevada sensibilidade e precisão, o AGFM pode ser aplicado desde materiais que apresentem baixas propriedades magnéticas assim como também a ímãs, tendo sido encontrado em estudos avaliando nanocompósitos, nanofios e nanopartículas (HEDAYATI *et al.*, 2017; MUÑOZ-NOVAL *et al.*, 2012; RAMZAN *et al.*, 2014).

3.7.6 Blindagem magnética

Ondas eletromagnéticas são formadas quando um campo elétrico e um campo magnético associados oscilam na mesma direção e perpendicularmente entre si. Elas podem ter efeito não ionizante, variando da região da corrente direta até a luz visível (entre 0 e 10^{15} Hz), assim como serem capazes de ionizar átomos, removendo elétrons de sua estrutura, indo do ultravioleta até os raios gama (entre 10^{16} e 10^{22} Hz) (CHANDRA *et al.*, 2019).

Grande parte dos equipamentos eletrônicos são capazes de produzir esse fenômeno ondulatório, e uma vez produzido, podem se espalhar em todos os meios físicos, inclusive no vácuo. Quando em contato com outros dispositivos ou seres vivos, este efeito é conhecido como interferência eletromagnética ou poluição eletromagnética (GUO *et al.*, 2021). O comportamento da onda eletromagnética pode ser observado na figura 21:

Figura 21 - Componentes de uma onda eletromagnética, no mesmo sentido e perpendiculares entre si.

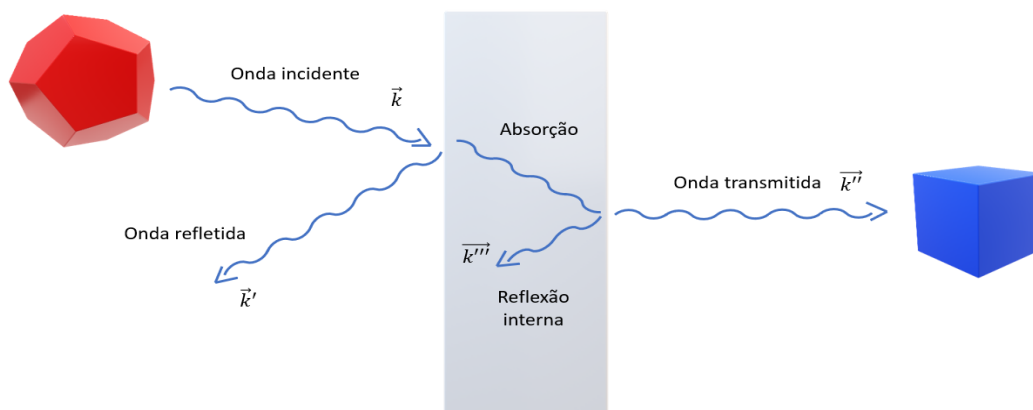


Fonte: O autor.

Uma vez em contato com outros dispositivos eletrônicos, essa interferência pode causar problemas que vão desde causar alterações em seu funcionamento até danos físicos no mesmo. O mesmo também pode ocorrer quando a radiação produzida interage com seres humanos, penetrando no nosso organismo e podendo ocasionar lesões nos sistemas neurológicos e cardiovasculares, infertilidade, queimaduras e aumentarem as chances do surgimento de diversos cânceres (KARABUL; İÇELLI, 2021).

Porém, uma série de materiais, geralmente condutores e magnéticos, possuem a propriedade de absorver e refletir parte dessa radiação emitida, servindo assim como uma barreira de proteção a equipamentos e ao contato humano. Esse fenômeno é conhecido como blindagem magnética. Um dos exemplos mais comuns e estudados atualmente envolvendo o efeito da blindagem magnética está associada ao desenvolvimento de nanoestruturas magnéticas para aplicações em diferentes níveis do espectro eletromagnético. A engenharia espacial também segue atuante no desenvolvimento de materiais capazes de proteger os astronautas de equipamentos das fontes de radiação oriundas dos corpos celestes (FERRONE *et al.*, 2021; SANKARAN *et al.*, 2018). O efeito da blindagem magnética na presença de um material emissor de ondas eletromagnéticas é mostrado na figura 22:

Figura 22 - Efeito de blindagem magnética em um circuito revestido por um material protetor.



Fonte: O autor.

O comportamento das ondas eletromagnéticas durante um processo de blindagem pode ser avaliado através das medidas de absorção ou reflexão da radiação incidente no material protetor. A reflexão interna observada na figura 22 ainda pode gerar novas reflexões e transmissões para a radiação incidida, dependendo do tipo de material utilizado para blindagem e a intensidade da onda eletromagnética. Dentre os fatores de maior impacto nas medidas de blindagem eletromagnética estão a frequência utilizada nas medições, assim como as propriedades elétricas, magnéticas e dimensões de interesse do material utilizado, como a sua espessura (CHANDRA *et al.*, 2019).

A blindagem magnética efetiva pode ser calculada através do somatório das contribuições da radiação de absorção, reflexão e múltiplas reflexões, dependendo do caso, e é dada pela equação

$$SE = A + R + M. \quad (15)$$

No caso específico da granada de ítrio e ferro, como sua aplicabilidade em dispositivos spintrônicos gira em torno da região de frequência de micro-ondas, como limitadores de energia, geradores, etc. (ZAINI *et al.*, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para síntese do sol precursor foram utilizados os reagentes nitrato de ítrio hexahidratado ($\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), com 99,95% de pureza, nitrato de ferro nonahidratado ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), com 98% de pureza, ambos da Sigma-Aldrich, água deionizada e ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$). Membranas porosas de alumina anódica, com espessura de 47 mm e possuindo poros de aproximadamente 200 nm de diâmetro, vendidas comercialmente pela Sigma-Aldrich, foram utilizadas como templates para auxiliar na formação das nanoestruturas.

4.2 MÉTODOS

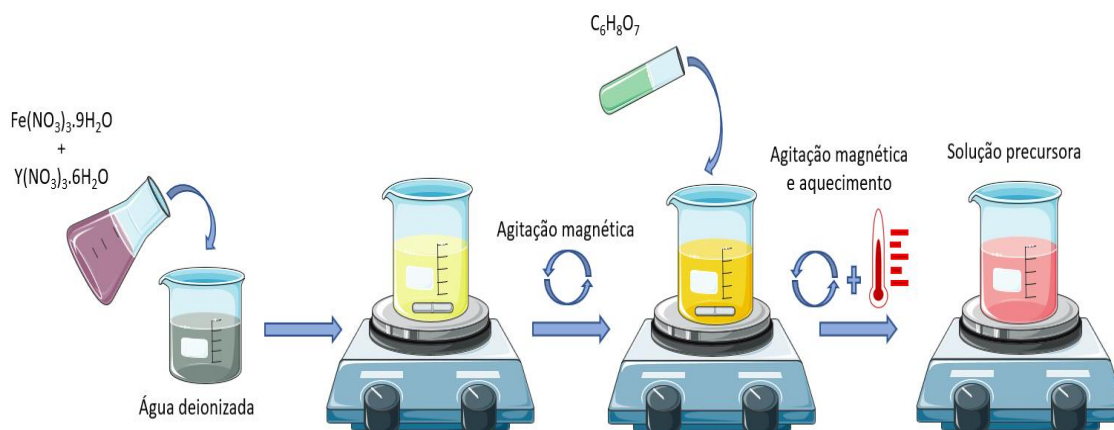
4.2.1 Preparação da solução precursora

O procedimento utilizado para obtenção das nanoestruturas alongadas foi realizado utilizando-se o método sol-gel, segundo metodologia similar a utilizada por (HAYATI *et al.*, 2020).

Quantidades estequiométricas de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ numa razão de 5:3, respectivamente, foram dissolvidas em água deionizada de modo a se obter uma solução de 8 mL de volume com agitação constante durante 1h à temperatura ambiente. Posteriormente, ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) foi adicionado à mistura, onde a mesma passou por posterior agitação por 1h a uma temperatura de 60 °C, de modo a evaporar fração do solvente e a consequente formação do gel. Após a adição do ácido cítrico, a solução foi mantida em pH 3.

A solução precursora foi acondicionada em microtubos tipo Eppendorf e armazenada longe da luz e umidade. Medições foram realizadas em balança analítica Shimadzu ATY224. A figura 23 a seguir detalha o esquema de síntese da solução precursora pelo método sol-gel:

Figura 23 - Esquema de síntese de solução precursora pelo método sol-gel.



Fonte: O autor.

4.2.2 Preparação de nanopartículas de YIG

Para uma melhor compreensão do efeito das propriedades alongadas que são o foco deste estudo, a solução precursora produzida foi utilizada para a fabricação de nanopartículas de YIG. Para isto, 2 mL da solução precursora foi acondicionada em um cadinho de alumina e seguiu para tratamento térmico, em forno elétrico para anéis 3000 10P, da marca EDG, sendo submetida a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Após alcançar 900 °C, a amostra permaneceu nessa temperatura por um período de 2h, de modo a se obter nanopartículas como produto final.

4.2.3 Preparação dos nanofios de YIG

Para a solução precursora produzida anteriormente, a metodologia utilizada para síntese dos nanofios de YIG necessitou do auxílio de uma membrana porosa de alumina (Al_2O_3), comercializada pela empresa Sigma-Aldrich, possuindo poros de diâmetro médio de 200 nm e seguiu metodologia adaptada de (HAYATI *et al.*, 2020), porém com a utilização de materiais de baixo custo e fácil obtenção.

Como tratamento preliminar, as membranas porosas passaram por tratamento térmico a 60 °C por 1h para expulsar o ar presente no interior dos nanoporos e facilitar a entrada da solução precursora.

Com o auxílio de um corpo de seringa de 10 mL, com êmbolo e agulhas devidamente retirados, uma mangueira de sucção a vácuo foi acoplada ao bico da seringa e uma rede circular fina de aço posicionada em sua entrada superior, de modo a servir como suporte para fixação da membrana, devido a sua fragilidade de manuseio e facilidade em se partir.

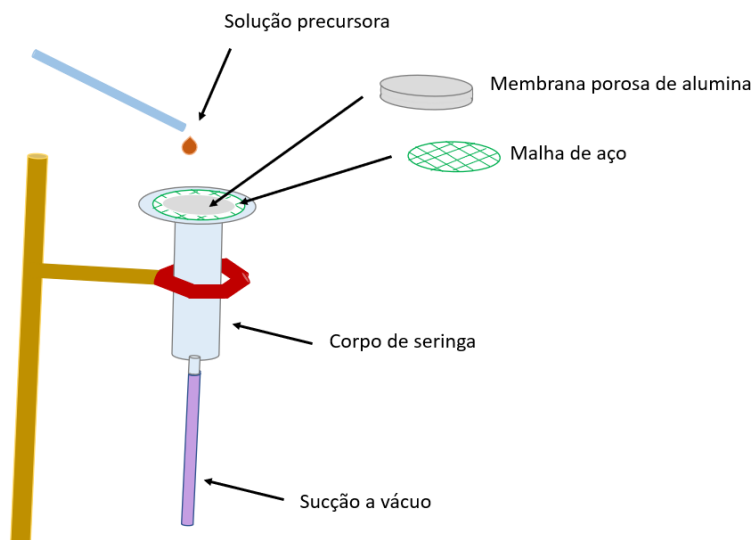
O sistema de vácuo foi então acionado e uma gota da solução precursora foi depositada na superfície superior da membrana, a 10^{-3} Torr. Passados alguns minutos, o vácuo foi desligado, a amostra devidamente retirada do suporte de aço, seu excesso de água removido com papéis de filtro e a amostra então seguiu para tratamento térmico, em forno elétrico para anéis 3000 10P, da marca EDG, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Ao atingir 900 °C, essa temperatura foi mantida por 2h, de modo a se obter a fase YIG dentro dos poros da membrana, já que durante o processo de tratamento térmico outros óxidos intermediários são formados.

Após a retirada do forno, as amostras foram acondicionadas em recipientes devidamente identificados e posteriormente seguiram para etapa de caracterização. Uma amostra de controle (membrana sem adição de solução) também passou pelo tratamento térmico. O sistema de deposição previamente descrito foi produto de um pedido de patente de número BR1020230054951 no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) de título: "PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DE NANOESTRUTURAS ALONGADAS DE ÓXIDOS METÁLICOS DE ESTEQUIOMETRIA MISTA", com data de depósito em 24/03/2023.

A figura 24 a seguir mostra o esquema do processo de síntese das nanoestruturas previamente mencionadas:

Figura 24 - Esquema de deposição em membranas através do método sol-gel.



Fonte: O autor.

É importante salientar que após a formação da fase final das nanoestruturas alongadas no interior da membrana porosa, toda a manipulação, desde o acondicionamento da amostra até a sua preparação para posteriores técnicas de caracterização, deve ser realizada através do uso de material não magnético, como pinças e instrumentos de plástico e/ou vidro. Dessa forma, evitam-se perdas do material, que pode ser atraído magneticamente para esses instrumentos e impactar negativamente nos resultados almejados.

4.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Através do software ImageJ, medidas de ângulo de contato foram realizadas para observar as interações sólido-líquido entre a membrana e a solução utilizada.

A técnica de difração de raios X (DRX) é utilizada para observar a presença de fases cristalinas de diferentes componentes presentes numa amostra. É uma técnica não destrutiva que é utilizada tanto para filmes como amostras em pó. As amostras depositadas foram analisadas em um difratômetro da marca Rigaku, modelo SmartLab, com radiação $\text{Cu}\alpha$ ($\lambda = 1,541874 \text{ \AA}$). Após a realização das medidas, o software HighScore Plus foi utilizado para interpretação dos dados obtidos. As

análises de DRX foram realizadas no laboratório multiusuário do departamento de Física da UFPE.

O uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu visualizar a superfície das amostras depositadas através da incidência de um feixe fino de elétrons. Previamente as medições, as amostras foram recobertas por uma camada de 10 nm de ouro e as microscopias foram obtidas através de um equipamento de microscopia eletrônica de varredura da marca Zeiss, modelo Auriga. A técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) forneceu informações a respeito da composição elementar dos componentes presentes nas amostras, em um microscópio eletrônico de varredura TESCAN, modelo MIRA3. As medidas de EDS foram realizadas no laboratório de microscopia do Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da UFPE.

Para complementar as informações químicas obtidas pela técnica de difração de raios X, medidas de espectroscopia Raman foram obtidas por meio do uso do equipamento OmegaScope™ 1000 (AIST-NT Technology) com lentes objetivas de resolução 100x, laser de excitação de comprimento de onda de 671 nm e espectrômetro iHR320 (Horiba Scientific). O tempo de aquisição utilizado foi de 10 segundos, com 10 acumulações e grade de difração de 1800 linhas/mm. As medidas de espectroscopia Raman foram realizadas no laboratório de microscopia do Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da UFPE.

A técnica de ressonância ferromagnética (FMR) foi utilizada com o uso de um espectrômetro de cavidade ressonante, operando na frequência de 9,5 GHz. Medidas foram realizadas na temperatura ambiente em diferentes ângulos, variando entre 0 e 90°, e os dados obtidos foram analisados de acordo com a equação de Lorentz.

Para avaliar outras propriedades magnéticas de interesse, como campo coercitivo, remanência e magnetização de saturação, foi utilizado um magnetômetro de amostra vibrante (VSM) da marca MicroSense modelo EV7. As medidas foram realizadas nos laboratórios de ressonância ferromagnética e de VSM do laboratório de física da UFPE.

Efeito da blindagem magnética dos arranjos de nanoestruturas alongadas depositadas em membrana porosa foram realizados se utilizando de um guia de onda de banda X através de um analisador de rede vetorial (VNA).

5 RESULTADOS

5.1 ÂNGULO DE CONTATO

Como a membrana comercial utilizada possuía poros com diâmetros de aproximadamente 200 nm, a força gravitacional não eficaz na introdução da solução nos mesmos durante os primeiros testes realizados com a solução precursora. Logo, fenômenos relativos às interações químicas existentes entre as duas superfícies precisaram ser observados.

De modo a sanar essas dúvidas, um teste de ângulo de contato foi realizado. Antes da realização da medida, a solução precursora foi agitada de modo a evitar a presença de regiões de diferentes concentrações não visíveis a olho nu. O ângulo de contato obtido entre estes dois meios pode ser visto na figura 25, no valor de 35, 4°.

O óxido de alumínio, em condições normais, apresenta boa hidrofiliabilidade. Contudo, a alteração de parâmetros de interesse em membranas porosas, como o tamanho do diâmetro dos poros, pode diminuir consideravelmente sua hidrofiliabilidade do mesmo, tornando o material hidrofóbico (BUIJNSTERS et al., 2013). Apesar do grande número de poros existentes, que podem ocasionar contribuições significativas em relação a química de superfície, a afinidade observada entre o meio aquoso e os grupos hidroxila existentes no óxido de alumínio permitiu a existência de uma considerável molhabilidade entre os dois meios (HIEMENZ; RAJAGOPALAN, 2016; REDDY; AJITH; UDAYASHANKAR, 2016; REDÓN *et al.*, 2005).

Dessa forma, a molhabilidade observada apresentou efeito benéfico na entrada da solução precursora nos poros. Tal estudo foi essencial para que a deposição fosse realizada no aparato desenvolvido em laboratório com uso de vácuo.

Figura 25 - Ângulo de contato de 35,4 ° uma gota de solução precursora em contato com membrana porosa de alumina.



Fonte: O autor.

Estudos de permeabilidade em membranas porosas de alumina em contato com soluções contendo água deionizada como solvente indicam que o uso da mesma na faixa de pH entre 5-9, aumentam consideravelmente a presença de espécies $[Al(OH)_4]^-$, que são facilmente atraídas pela superfície das membranas porosas, ocasionando bloqueio dos poros, dificultando a penetração e, conseqüentemente, a formação dos fios. Para minimizar esse problema, neste tipo de membrana, é recomendado que a solução seja mantida a pH menores que 3 (PIROUZFAR; EBRAHIMI, 2014).

Assim, apesar da relação porosidade e tensão superficial não favorecer a penetração da solução nos poros apenas pela força da gravidade, o controle adequado do pH da solução precursora permitiu otimizar o processo de deposição utilizando vácuo sem comprometer a estabilidade química das paredes dos poros da membrana de óxido de alumínio utilizadas.

5.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

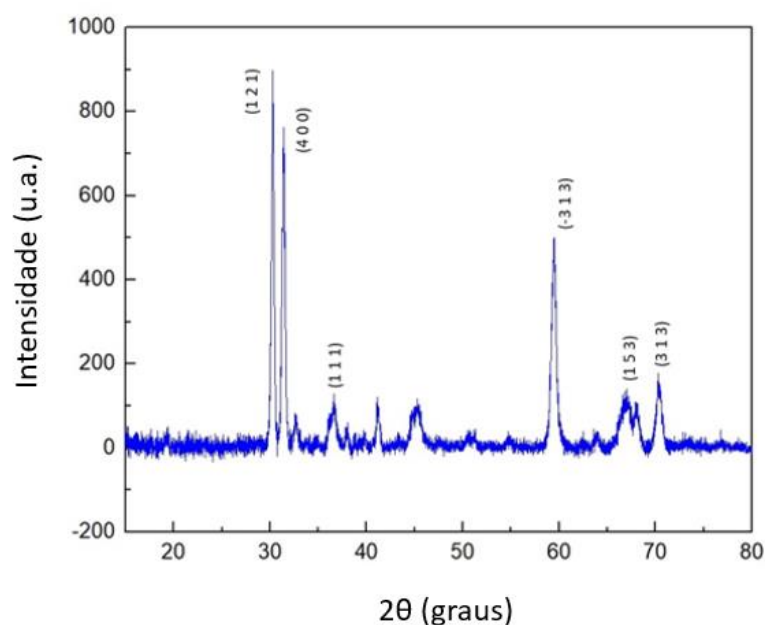
As amostras produzidas utilizando o método sol-gel foram analisadas por difração de raios-X por ângulo rasante, de forma a se observar a composição química da amostra e as fases existentes de seus componentes.

As figuras a seguir mostram os difratogramas das fases encontradas para uma amostra de controle da membrana utilizada (figura 26), uma amostra de nanopartículas de YIG produzidas a partir da solução precursora (figura 27) e uma

amostra de nanoestruturas alongadas depositadas em membrana (figura 28), onde todas passaram por processo de tratamento térmico a 900 °C por duas horas.

Na figura 26, pertencente a amostra de controle sem deposição foi possível a identificação de três fases distintas para o óxido de alumínio, onde o mesmo apresenta sistema cristalino cúbico, tetragonal e ortorrômbico (ICDD 00-001-1308, ICDD 00-046-1131 e ICDD 01-088-0107).

Figura 26 - Difratoograma de amostra de controle de membrana de alumina.

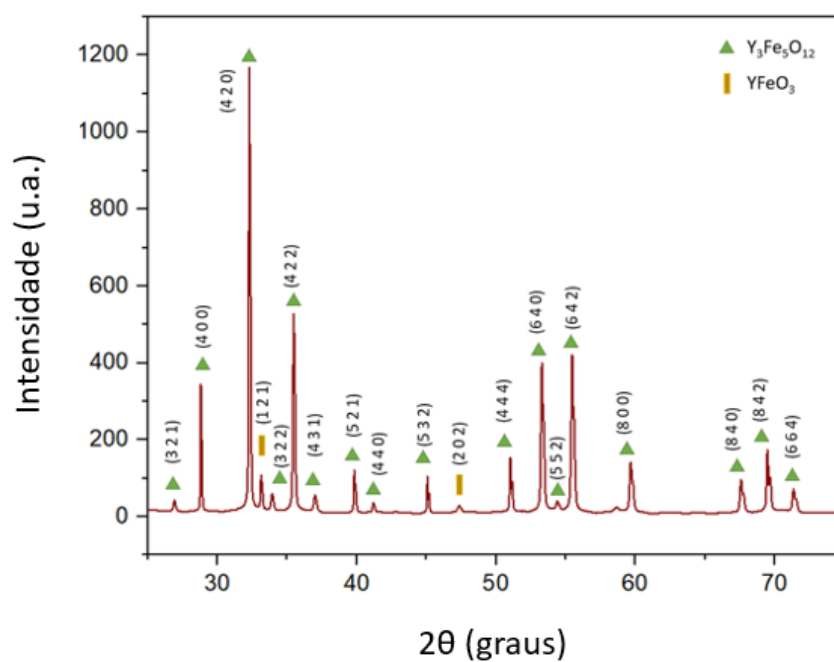


Fonte: O autor.

Para o difratograma realizado para as nanopartículas produzidas, observado na figura 27, foi possível a identificação de uma fase para o YIG (ICDD 00-043-0507), com maior quantitativo de picos, estrutura cúbica e grupo espacial $Ia\bar{3}d$, sendo a geometria de interesse deste estudo, devido as suas propriedades magnéticas particulares.

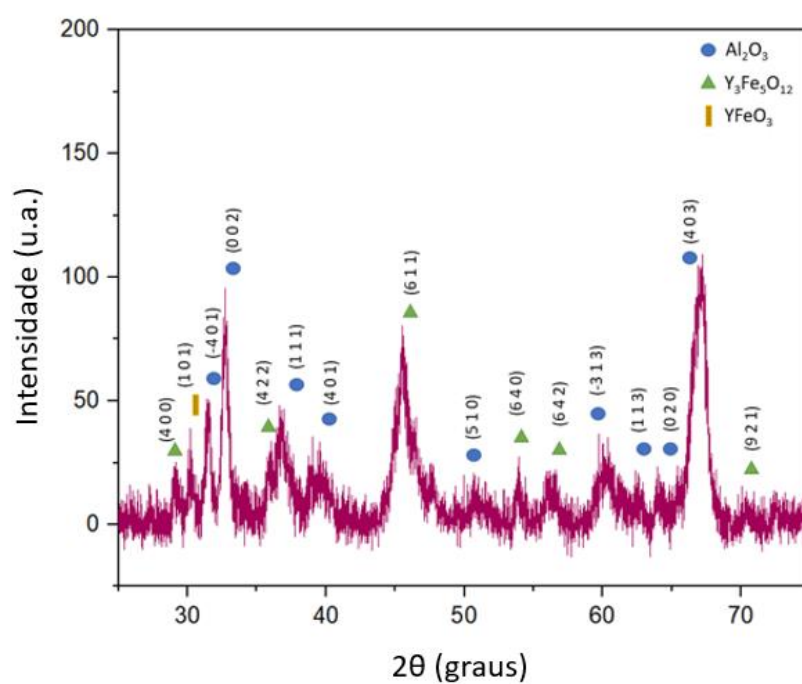
Uma fase secundária relativa a um dos óxidos intermediários de formação do YIG, o óxido de ítrio e ferro ($YFeO_3$), também foi identificada, de acordo com a ficha cristalográfica (ICDD 01-082-0170), de estrutura ortorrômbica.

Figura 27 - Difratoograma de amostra de nanopartículas de YIG submetidas a tratamento térmico da solução precursora a 900 °C por 2h.



Fonte: O autor.

Figura 28 - Difratoograma de amostra de nanoestruturas alongadas de YIG submetidas a tratamento térmico a 900 °C por 2h.



Fonte: O autor.

Já na figura 28, relativa a nanoestruturas alongadas depositadas no interior da membrana porosa, foi identificada uma ficha para o óxido de alumínio de código ICDD 00-023-1009, de estrutura monoclinica e com um maior quantitativo de picos característicos devido ao maior quantitativo em massa na amostra, uma ficha para o YIG, de código ICDD 01-075-0529, de estrutura cúbica similar a observada na amostra de nanopartículas, com grupo espacial $Ia\bar{3}d$ e uma fase secundária relativa também ao óxido de ítrio e ferro, $YFeO_3$, de estrutura cristalina hexagonal, de acordo com a ficha cristalina de código ICDD 00-048-0529.

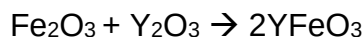
Através da fórmula de Scherrer, foi possível obter o tamanho médio de grão de cristalito estimado tanto para a fase YIG, quanto para as fases secundárias obtidas. A equação de Scherrer correlaciona valores de parâmetros como o fator de forma K , o ângulo de difração de Bragg θ e a largura meia altura do pico analisado β e o comprimento de onda eletromagnético λ para obter o tamanho do grão de cristalito da amostra analisada através da fórmula

$$D_{hkl} = K\lambda\beta / \cos\theta. \quad (16)$$

Na amostra contendo nanopartículas, o tamanho médio de grão do cristalito estimado para a fase YIG encontrada foi de 71,82 nm, enquanto que na amostra contendo nanoestruturas alongadas depositadas em membrana, a fase YIG observada apresentou 17,64 nm.

O valor de tamanho de cristalito obtido está próximo a valores de grão de cristalito de outros estudos que obtiveram nanoestruturas de YIG (ASSIS *et al.*, 2023; HOSSEINZADEH *et al.*, 2019). Além do método sol-gel, outros métodos químicos de síntese, como a decomposição metalorgânica e a co-precipitação, também já foram utilizados na síntese de estruturas apresentando YIG com geometria cúbica (ASSIS *et al.*, 2022; LIU *et al.*, 2018; SOUSA *et al.*, 2022)

Em relação às fases secundárias de $YFeO_3$ observadas nos difratogramas, ela é esperada pois este óxido faz parte das reações oxidativas existentes para a formação da granada de ferro e ítrio a partir de outros óxidos menores, através das reações mostradas a seguir:



Os íons Fe^{3+} e Y^{3+} presentes nos óxidos de ferro III e óxidos de ítrio III formados em etapas iniciais de aquecimento reagem entre si formando o óxido de ítrio e ferro (YFeO_3). Este produto reage com o excesso de óxido de ferro III formando assim o YIG, de acordo com alguns estudos anteriores que afirmam que a estequiometria adequada de ferro e ítrio na solução precursora não é determinante para que a reação ocorra em apenas uma única etapa (ALI *et al.*, 2013; ALI *et al.*, 2016).

Mediante a dificuldade existente na manipulação dos parâmetros estudados, para ambos os tipos de estruturas de YIG discutidas nos difratogramas previamente abordados, entre as possíveis causas para a presença de uma fase secundária estão a necessidade de se otimizar o tratamento térmico para que todos os compostos intermediários reajam para formação de um produto final de maior pureza, assim como leves alterações na massa dos reagentes utilizados devido a ambos serem higroscópicos, impactando levemente o balanço estequiométrico geral por absorção de água do ambiente e formando um pequeno excesso reacional do composto intermediário detectado nos difratogramas.

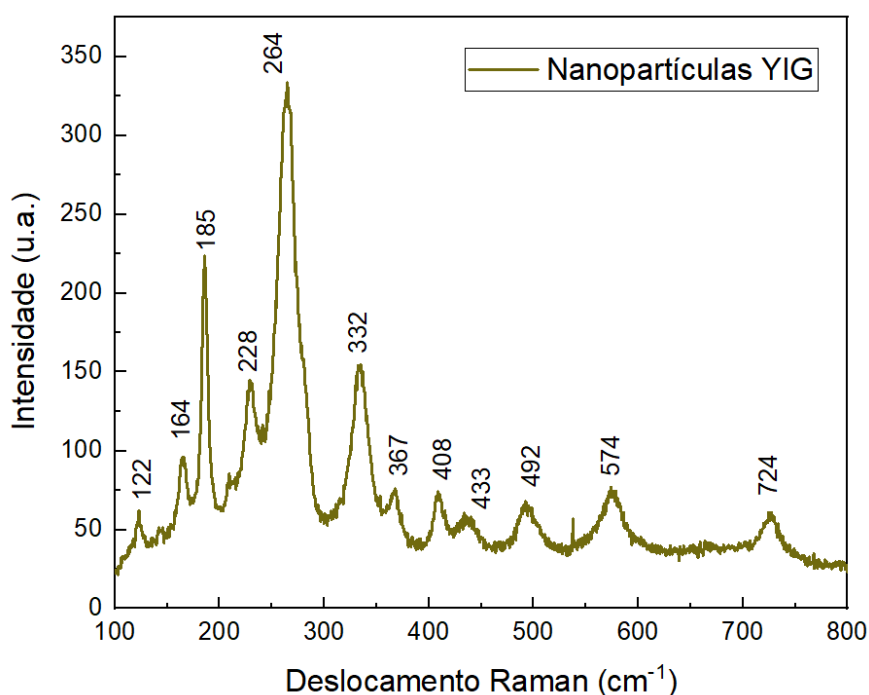
Diante disso, o controle dos parâmetros envolvendo a síntese por sol-gel e tratamento térmico aplicado às amostras são essenciais para se obter uma fase única de YIG com a estrutura cristalina desejada e a consequente eliminação da fase secundária existente.

Embora sejam necessários alguns ajustes em estudos futuros relativos a esses parâmetros, a metodologia de deposição de baixo custo utilizada permitiu a obtenção do YIG com a geometria desejada, sendo um processo promissor para síntese de nanoestruturas alongadas de óxidos metálicos mistos que não podem ser produzidos através de métodos eletroquímicos.

5.3 ESPECTROSCOPIA RAMAN

De modo a se complementar as informações químicas obtidas através dos ensaios de difração de raios-x, medidas de espectroscopia Raman foram realizadas para as nanopartículas de YIG produzidas, assim como para as nanoestruturas alongadas formadas dentro do template poroso, podendo ser vistas, respectivamente, nas figuras 29 e 30.

Figura 29 - Espectros Raman de nanopartículas de YIG após tratamento térmico a 900 °C por 2h.



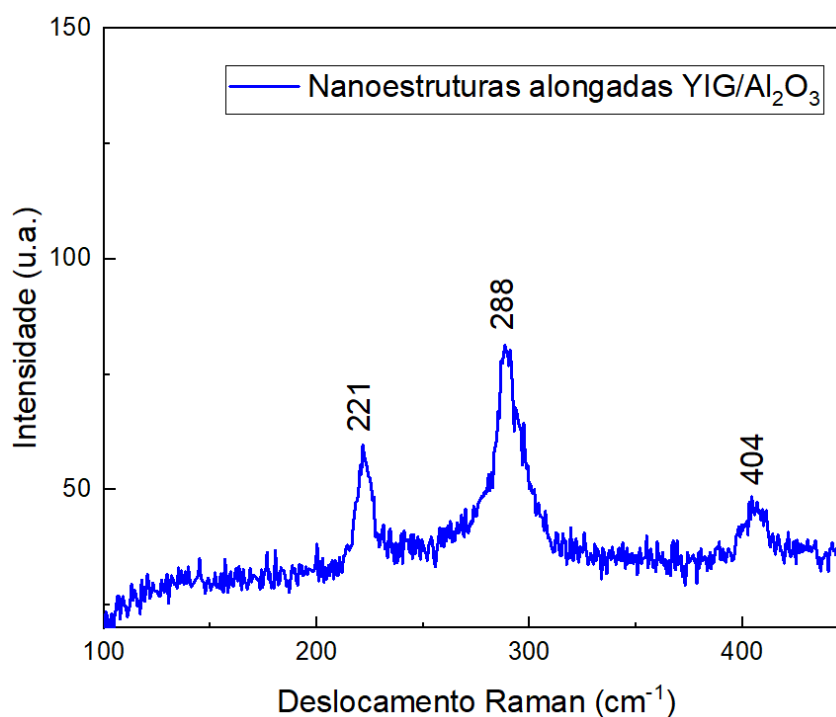
Fonte: O autor.

Em relação as nanopartículas produzidas, os modos vibracionais observados no espectro Raman em 122, 164 e 185 cm^{-1} indicam os modos de rede translacionais (T) dos íons Y^{+3} na estrutura cristalina da granada, sendo modos relativos à translação das partículas de um cristal onde as partículas se movem conjuntamente. Já os picos observados em 228 e 264 cm^{-1} , sendo este último o mais intenso observado em todo o espectro, é relativo aos modos de rede libracionais (L), ou seja, concernentes a rotação das moléculas em torno de um eixo fixo gerando movimentos angulares, dos íons Fe^{+3} (LI et al., 2020; NASIR et al., 2011).

Os picos observados em 332 e 367 cm^{-1} estão relacionados aos modos vibracionais $\nu_4(\text{F}_{2g})$, os presentes em 408 e 433 cm^{-1} indicam a presença dos modos vibracionais $\nu_2(\text{E}_g)$ e o pico em 724 cm^{-1} o modo vibracional $\nu_1(\text{A}_{1g})$, todos característicos do YIG. Todos os picos previamente mencionados estão bastante próximos dos picos obtidos por estudos prévios envolvendo a síntese de cristais de YIG (LI et al., 2020; NASIR et al., 2011).

O pico observado em 492 cm^{-1} pode ser um indicativo da presença em menor quantidade de uma fase secundária do processo de síntese das nanopartículas, e pode ser atribuída ao óxido intermediário YFeO_3 , óxido que também foi previamente identificado através da difração de raios X e cujo pico é observado em alguns estudos envolvendo a síntese de cristais e nano cristais de YFeO_3 (KUZ'MENKO; ABAKUMOV, 2011; NAGRARE et al., 2018).

Figura 30 - Espectro Raman de nanoestruturas alongadas de YIG depositadas em membranas porosas de alumina após tratamento térmico a 900 °C por 2h.



Fonte: O autor.

Já em relação aos picos observados para as nanoestruturas alongadas produzidas, temos um pico intenso em 288 cm^{-1} e outro de menor intensidade em 404 cm^{-1} , ambos com valores próximos de picos referentes aos modos vibracionais

característicos do YIG segundo um estudo que produziu as nanoestruturas a 850 °C, temperatura próxima ao que as nanoestruturas alongadas aqui descritas foram sintetizadas (JANIFER et al., 2022). As assimetrias observadas também podem ser atribuídas a sobreposição de bandas do óxido de alumínio, material constituinte da membrana porosa onde as nanoestruturas foram depositadas.

Foi observado também a presença de um pico em 221 cm^{-1} que é característico da fase secundária YFeO_3 , indicando que óxido intermediário também está presente nas nanoestruturas alongadas produzidas. Sendo um pico já observado em espectros para o YFeO_3 na literatura, o mesmo já foi identificado também em amostras de YIG sintetizadas a 650 °C, temperatura menor que a ideal para a formação de fase do YIG, que ocorre por volta dos 800 °C (JANIFER et al., 2022; KUZ'MENKO; ABAKUMOV, 2011; NAGRARE et al., 2018).

Devido à expressiva influência das bandas pertencentes ao óxido de alumínio, constituinte da membrana utilizada como molde para formação das nanoestruturas desejadas, foi impossível discernir no espectro os sinais dos modos vibracionais $\nu_1(\text{A}_{1g})$ do YIG em valores superiores a 450 cm^{-1} (PAIVA et al., 2015).

As temperaturas de formação de fase utilizadas durante as sínteses impactam consideravelmente nos picos observados nos espectros devido a alterações causadas na rede cristalina do material, pois os modos vibracionais observados estão relacionados a estrutura cristalina distinta que o material venha a possuir. Assim, possíveis deslocamentos dos picos observados no espectro Raman caso a temperatura de síntese aumente ou diminua (JANIFER et al., 2022). Logo, o pico relacionado ao YFeO_3 indica que o processo de tratamento térmico a 900 °C ainda necessita ser otimizado para a completa remoção dessa fase secundária na amostra.

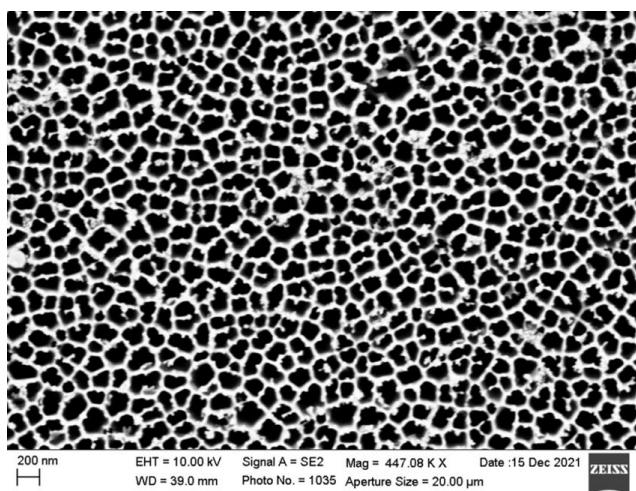
A partir de tais resultados, foi possível confirmar através da técnica de espectroscopia Raman a estrutura química de interesse presente nas nanoestruturas fabricadas.

5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Inicialmente, uma amostra de controle da membrana sem deposição foi analisada para confirmarmos as dimensões dos diâmetros existentes nos poros da membrana comercial utilizada. Tais medidas são de fundamental importância para garantir o tamanho médio das nanoestruturas que serão formadas no interior dos poros, parâmetro de interesse para as medidas magnéticas que posteriormente foram realizadas neste estudo.

A figura 31 contém imagem de microscopia eletrônica de varredura em vista superior de uma membrana de alumina de controle tratada termicamente, a partir do qual foi possível calcular o diâmetro de Feret médio dos poros e seu respectivo desvio padrão.

Figura 31 - Microscopia eletrônica de varredura de vista superior de membrana de controle após tratamento térmico.



Fonte: O autor.

O diâmetro médio dos poros e seu desvio padrão associado obtido foi de $231,46 \pm 21,81$ nm. Tal valor se mostra próximo das dimensões especificadas para a membrana porosa segundo o fabricante mesmo após o tratamento térmico por 2h a 900 °C.

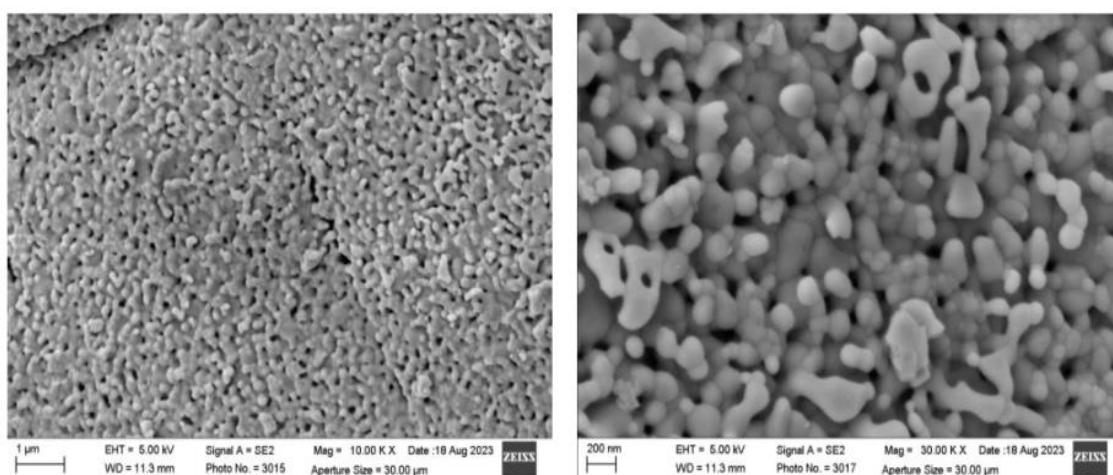
Vale salientar que esta temperatura pode ocasionar mudanças de fase no óxido de alumínio existente na membrana, conforme previamente observado pela análise

de DRX, que obteve mais de uma fase para a amostra de controle medida, assim como também contribuir para um leve aumento ou diminuição nos poros medidos devido a efeitos de dilatação térmica do material utilizado.

A solução precursora foi inicialmente utilizada para a síntese de nanopartículas de YIG, de modo a se observar o comportamento do óxido após a formação de sua fase cristalina a 900 °C por 2 horas, podendo ser visualizada na figura 32. Os grãos formados apresentaram tamanhos variados, chegando a valores variando entre 70 e 150 nm.

O processo físico conhecido como sinterização também foi observado, indicando que os grãos se fundem entre si mediante a presença de elevadas temperaturas, formando assim, estruturas maiores e de aspecto poroso. Trabalhos que utilizaram nanopartículas de YIG em seus estudos também obtiveram comportamento similar na avaliação de sua morfologia, com estruturas oriundas de processos de sinterização de grãos (NIYAIFAR *et al.*, 2016; SHARMA *et al.*, 2017a). A figura 32 mostra a formação de nanopartículas de YIG através da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura de nanopartículas YIG, após tratamento térmico a 900 °C por 2h.



Fonte: O autor.

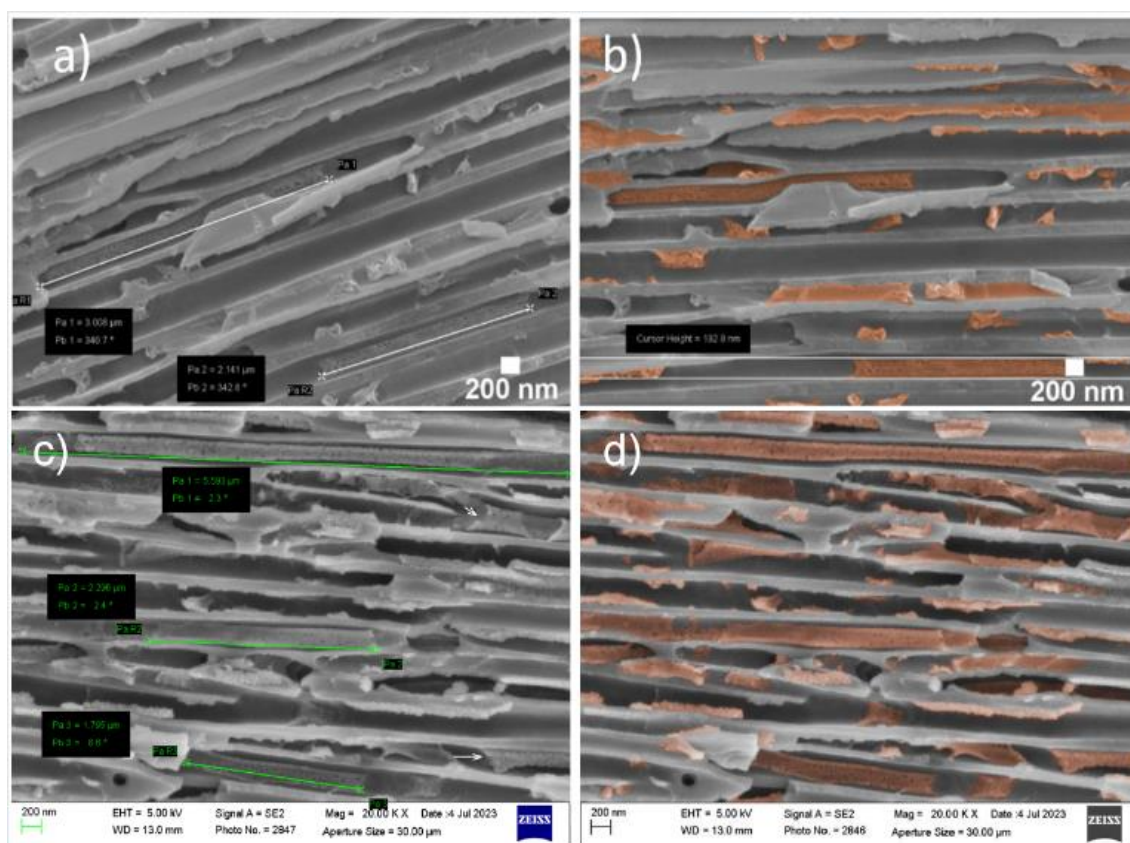
A partir da figura 33 é possível observar imagens de MEV de nanoestruturas alongadas de YIG depositadas no interior de diferentes regiões da membrana porosa,

através de um corte em seção transversal. Nanoestruturas alongadas com comprimentos de até 5 μm foram identificadas.

A morfologia observada foi similar a nanofios produzidos por estudos anteriores utilizando o método sol-gel, que, apesar de obterem estruturas com diâmetros cerca de dez vezes maiores que as obtidas nesta tese, também possuíam forma similar a pilares e com um certo grau de porosidade.

A porosidade das nanoestruturas é oriunda de processos de sinterização dos grãos de óxido inicialmente formados, além da liberação de certos componentes existentes em sua morfologia em forma de gás durante o processo de aquecimento térmico (HAYATI *et al.*, 2018, 2020).

Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura de estruturas alongadas de YIG depositadas em membrana porosa de alumina após tratamento térmico a 900 °C por 2h.



Fonte: O autor.

Vale salientar que este panorama é uma amostragem do quantitativo de nanomateriais que estão depositados ao longo de todo o material, já que existem estruturas menores ou até um pouco maiores depositadas nas membranas que não puderam ser avaliados por estarem no interior de poros não observáveis.

O diâmetro dos poros observados condiz com a média obtida anteriormente para o diâmetro dos poros da membrana comercial, de aproximadamente 200 nm, indicativo de que a estrutura da membrana se manteve íntegra em suas dimensões durante o período de aquecimento, mesmo contendo material depositado de diferente composição em seu interior.

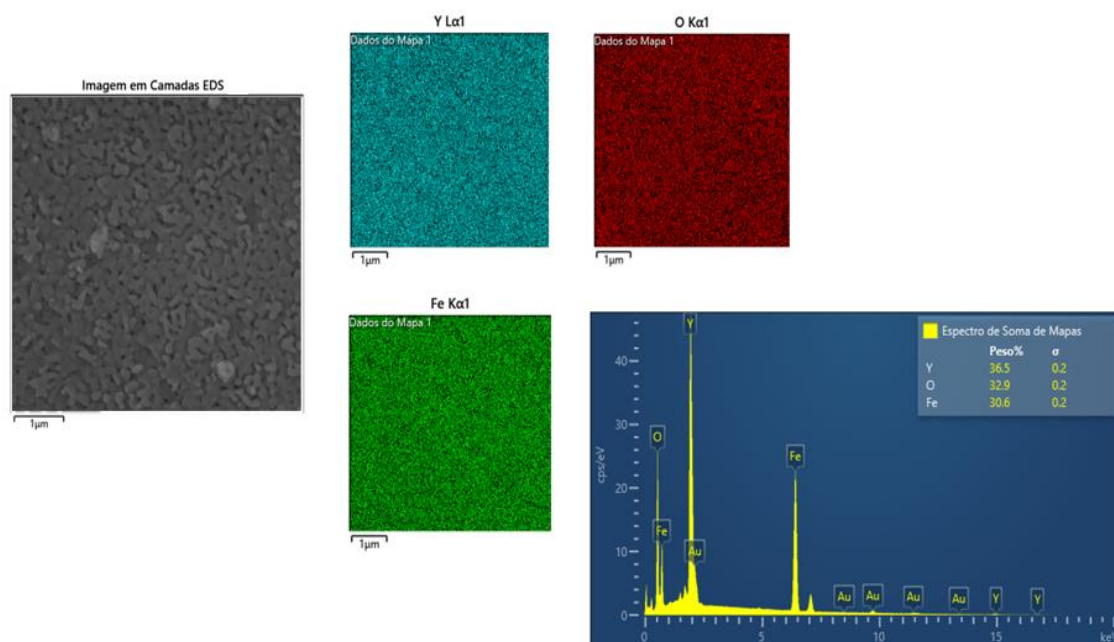
Ademais, a presença de nanoestruturas alongadas nas microscopias indica boa permeabilidade da solução no molde, mostrando, assim, que o sistema de deposição desenvolvido foi eficiente. Tais resultados se mostram promissores não só para estudos futuros envolvendo a síntese de nanofios de YIG de maior comprimento e uniformidade, assim como para formação de nanofios de outros óxidos de estequiometria mista que não podem ser produzidos por meio de processos eletroquímicos convencionais.

5.5 ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

De modo a se auxiliar as informações obtidas através do uso de difração de raios X e de espectroscopia Raman, a espectroscopia por energia dispersiva foi utilizada para confirmar as distribuições estequiométricas existentes na solução precursora durante a síntese das nanoestruturas alongadas.

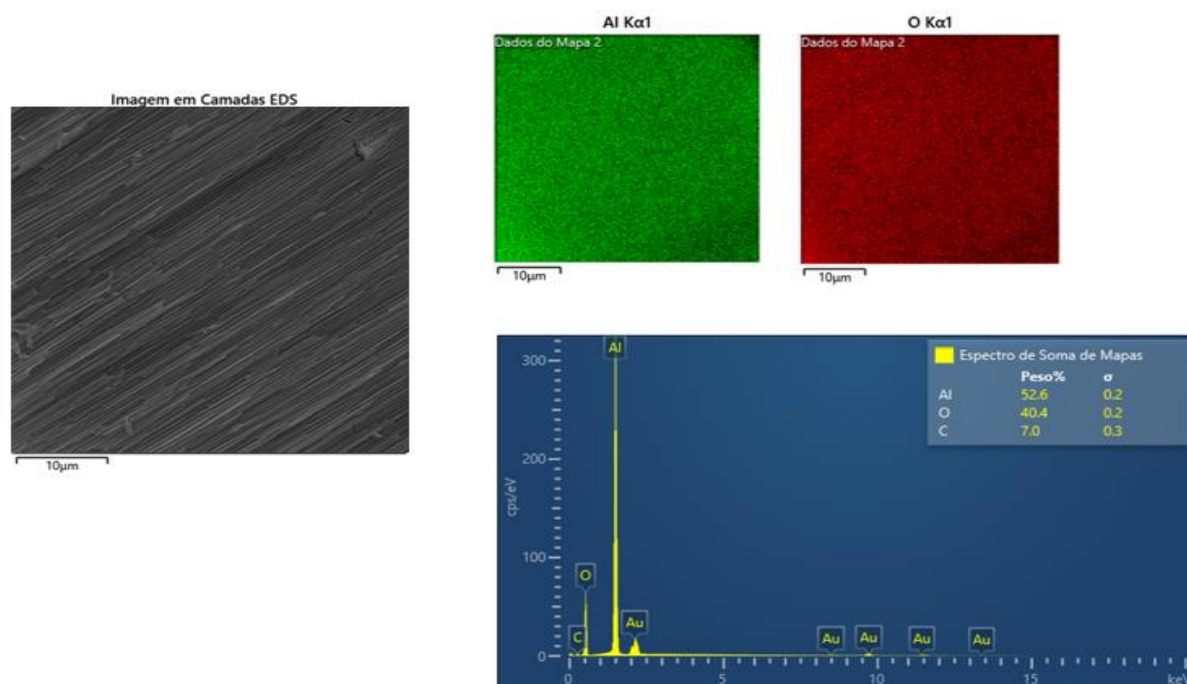
Um escaneamento elemental foi realizado em uma amostra de nanopartículas de YIG, em uma amostra da membrana porosa sem deposição e em uma amostra onde as nanoestruturas alongadas foram depositadas. Os resultados podem ser vistos nas figuras 34, 35 e 36, respectivamente.

Figura 34 - Imagens de espectroscopia por energia dispersiva para o oxigênio, ítrio e ferro em amostra de nanopartículas de YIG.



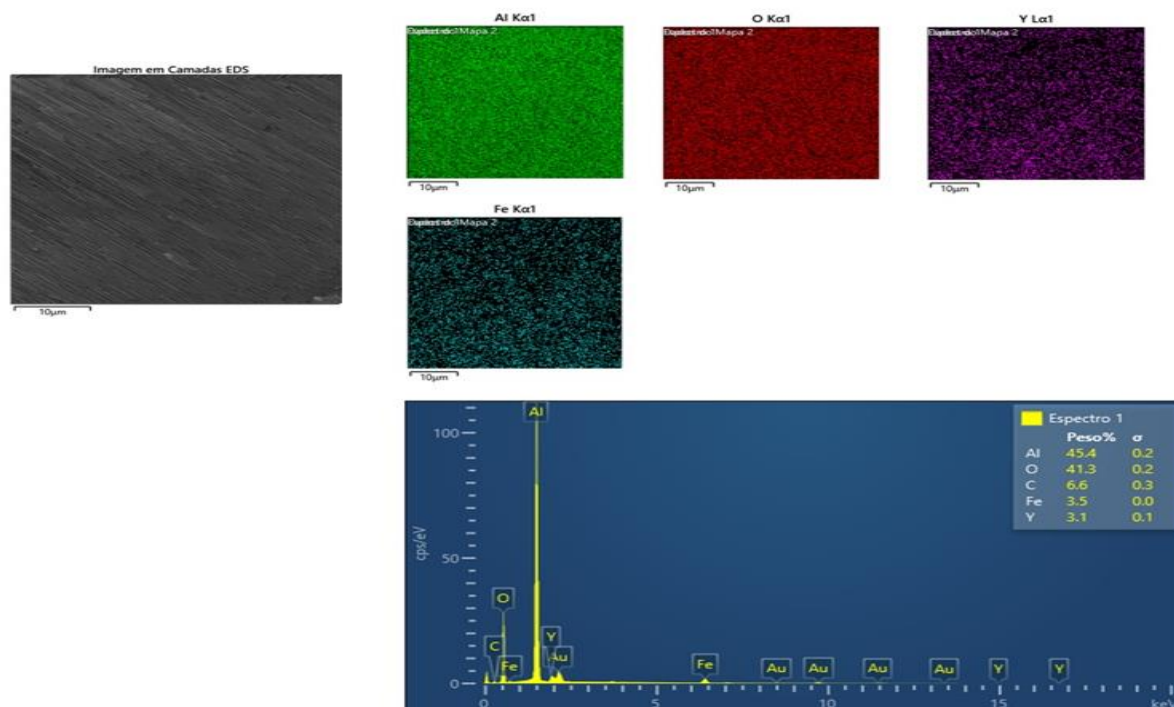
Fonte: O autor.

Figura 35 - Imagens de espectroscopia por energia dispersiva para o oxigênio e alumínio em amostra de membrana de alumina sem deposição.



Fonte: O autor.

Figura 36 - Imagens de espectroscopia por energia dispersiva para o oxigênio, alumínio, ferro, e ítrio de amostra de nanoestruturas alongadas depositadas em membrana porosa de alumínio.



Fonte: O autor.

Segundo os resultados obtidos para as nanopartículas de YIG, foi possível observar apenas a presença dos elementos constituinte do óxido cerâmico em proporções de 36,5% de ítrio, 32,9% de oxigênio e 30,6% de ferro, em massa. Para os dados obtidos para a membrana porosa sem deposição, foram obtidas proporções em massa de 52,6% para o alumínio e 40,4% para o oxigênio. Já em relação às estruturas alongadas depositadas em membrana porosa, as porcentagens obtidas foram de 45,4% de alumínio, 41,3% de oxigênio, 3,5% de ferro e 3,1% de ítrio, em massa.

De modo geral, mesmo se levando em consideração que a técnica de EDS é uma técnica semi quantitativa, as porcentagens apresentadas mostram que a estequiometria de ítrio (88,906 g/mol) e ferro (55,845 g/mol) estão consistentes com os dados obtidos, confirmando assim suas corretas proporções na solução precursora. Tais resultados estequiométricos mostraram similaridade em estudos envolvendo arranjos de nanodots de YIG em templates porosos de alumina suportados em silício (ZHENG *et al.*, 2015).

Leves alterações nas razões estequiométricas podem ser atribuídas a formação de uma fase secundária de óxido de ítrio e ferro (YFeO_3), que esteve

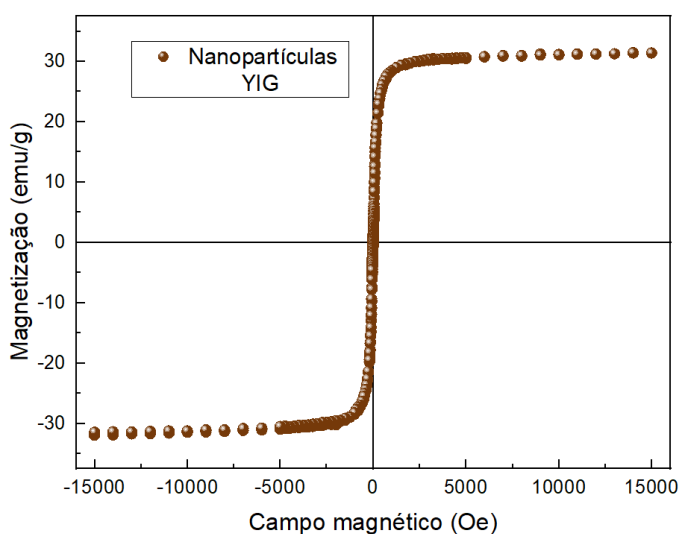
presente nos difratogramas de raios-x previamente realizados assim como em estudos prévios na literatura (ALI *et al.*, 2013; ALI *et al.*, 2016). As porcentagens de alumínio e oxigênio estão de acordo com o esperado, já que o alumínio faz parte do suporte poroso enquanto que o oxigênio está presente tanto no suporte quanto no YIG. O percentual observado para o carbono em algumas imagens é relativo à presença da fita de carbono que fixa a amostra no suporte para análise.

5.6 MAGNETÔMETRO DE AMOSTRA VIBRANTE (VSM)

As propriedades magnéticas de nanopartículas em pó de YIG produzidas sem suporte de membrana porosa foram analisadas através de VSM e sua curva de histerese característica pode ser observada na figura 37. Um comportamento característico de material magnético macio foi observado, com uma curva de histerese estreita atribuída ao óxido cerâmico formado.

As nanopartículas apresentaram magnetização de saturação de aproximadamente 30,63 emu/g, magnetização remanente de 0,725 emu/g e coercividade de 9,26 Oe, indicando que o material formado é policristalino, apresentando propriedades magnéticas similares a granadas produzidas por métodos de tratamento em elevadas temperaturas (LEAL *et al.*, 2019; Li; GUO, 2018; NGUYET *et al.*, 2012).

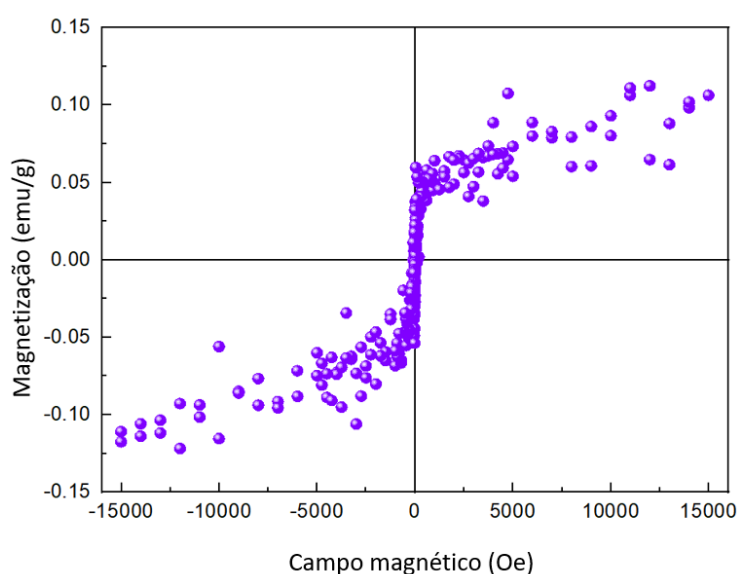
Figura 37 - Curva de histerese de nanopartículas de YIG obtidas através de VSM.



Fonte: O autor.

A curva de histerese obtida para as nanoestruturas alongadas depositadas em membrana pode ser vista através da figura 38. A curva sigmoide em formato de degrau, próximo da origem, mostra comportamento ferromagnético associado a granada (CAPKU; YILDIZ, 2021; MUSA *et al.*, 2017). As bordas mostram pontos espalhados característicos de material paramagnético de podem ser atribuídas ao material constituinte da membrana porosa, o óxido de alumínio.

Figura 38 - Curva de histerese de nanoestruturas alongadas de YIG depositadas em membrana porosa de alumina obtidas através de VSM.



Fonte: O autor.

Os valores obtidos para os campos coercitivos e de remanência foram de 21 Oe e 0,03 emu/g, respectivamente. Esses valores são consistentes pois a técnica de VSM depende do peso das amostras analisadas, logo é correto assumir que os principais distúrbios vistos na curva de histerese obtida estão relacionados a uma maior quantidade de óxido de alumínio na amostra, quando comparados com a massa de nanoestruturas alongadas formadas em seu interior.

Além de um menor quantitativo de material ferrimagnético presente na amostra medida quando comparado ao YIG nano particulado, a baixa magnetização de saturação obtida também pode ser atribuída aos parâmetros térmicos utilizados na síntese, indicando um certo grau de desordem em seus momentos magnéticos, ou seja, que as nanoestruturas produzidas ainda não possuem um percentual elevado de organização cristalina (ABBAS *et al.*, 2022).

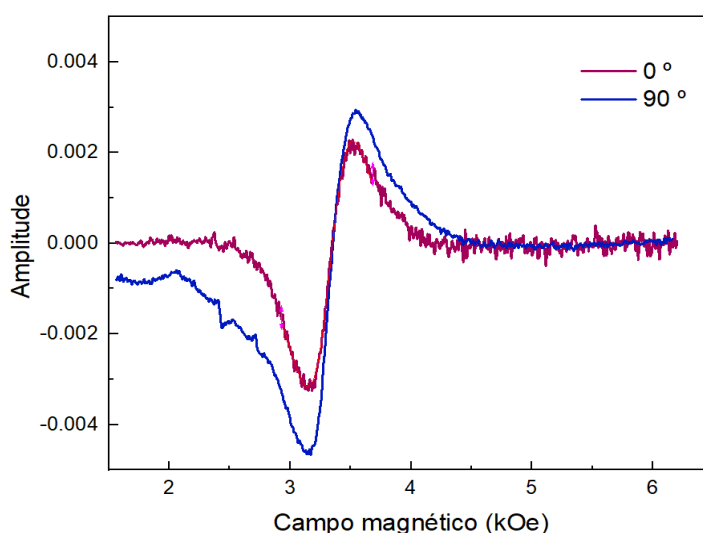
Estudos mostram que nanoferritas de YIG produzidas a maiores temperaturas de formação de fase, próximas a 1000 °C, originam materiais com melhores parâmetros de coercividade e saturação de magnetização, sendo assim uma perspectiva de interesse para futuros trabalhos envolvendo sínteses de nanoestruturas alongadas por métodos químicos (AKHTAR *et al.*, 2016).

5.7 RESSONÂNCIA FERROMAGNÉTICA (FMR)

A figura 39 mostra informações relacionadas às medidas de ressonância ferromagnéticas de uma amostra de nanoestruturas alongadas em campo paralelo e perpendicular à direção do campo aplicado.

Quase nenhuma mudança foi vista no campo de ressonância com a variação do ângulo, indicando uma baixa anisotropia de forma devido às estruturas serem formadas por aglomerados de partículas elípticas sinterizadas, como pode ser visto na figura de campo de ressonância versus variação de ângulo na figura 40 (a) com seu menor valor observado com variação de ângulo de 20 graus.

Figura 39 - Ressonância ferromagnética de estruturas alongadas de YIG depositadas em membrana de alumina na direção paralela e perpendicular ao campo aplicado.

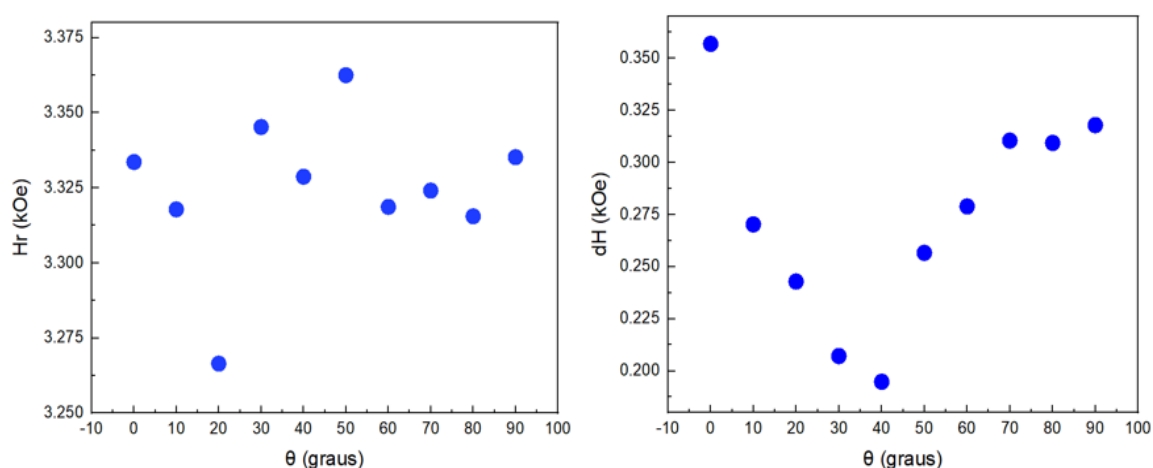


Fonte: O autor.

A dependência da largura de linha ferromagnética com os ângulos medidos pode ser observada na figura 40 (b) e indica que a estrutura policristalina do YIG é responsável pelos baixos valores obtidos para este parâmetro, com seu menor valor

de largura de linha de 0,19 Oe com aplicação de ângulo de 40 graus. Comportamento isotrópico e organização policristalina nas células unitárias da cerâmica já foram relatadas em estudos anteriores (ZHANG *et al.*, 2019). Maiores campos de ressonância perpendiculares também estão presentes em nanofios que foram depositados com membranas de sílica (HAYATI *et al.*, 2018).

Figura 40 - Campo de ressonância (a) e largura de linha (b) de nanoestruturas alongadas depositadas em membrana porosa de alumina de acordo com a variação de ângulo.



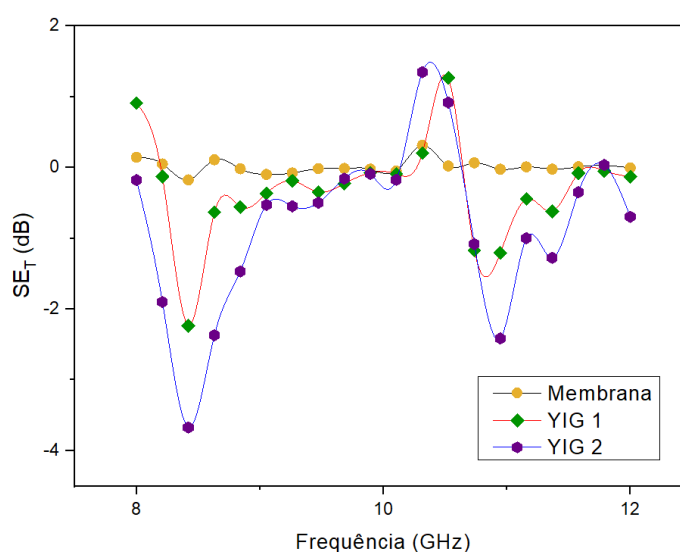
Fonte: O autor.

Estudos de simulação concernentes ao comportamento magnético de óxidos depositados no interior de micro e nanotubos indicam uma forte dependência entre os campos de ressonância ferromagnéticos e o diâmetro da nanoestrutura produzida assim como seu diâmetro externo, no caso de nanotubos. Logo, é de fundamental interesse a otimização do processo de deposição em estudos futuros para obtenção de nanofios de diâmetros e comprimentos uniformes, para minimizar os efeitos de variação do campo de ressonância e largura de linha obtidos através de medidas com variação de ângulo (PUSIOL *et al.*, 2023).

5.8 BLINDAGEM MAGNÉTICA

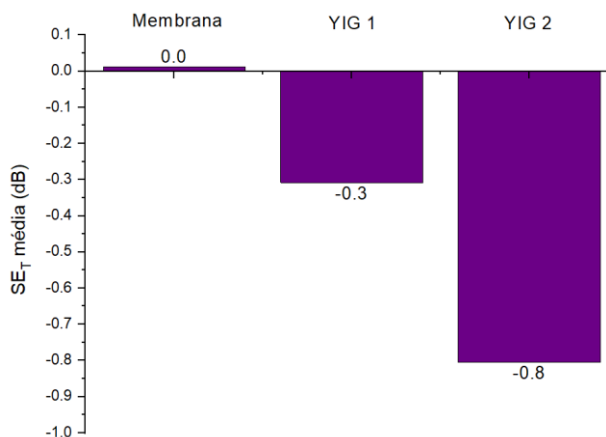
Para avaliar o efeito de absorção e reflexão dos nanomateriais magnéticos produzidos frente a ondas eletromagnéticas externas, um estudo de blindagem foi realizado. A figura 41 mostra curvas de blindagem efetiva para uma membrana sem deposição e duas amostras distintas de nanoestruturas alongadas produzidas.

Figura 41 - Curva de blindagem efetiva para membrana de alumina não depositada (controle), e duas amostras distintas de alumina depositadas com nanoestruturas alongadas de YIG.



Fonte: O autor.

Figura 42 - Gráfico de colunas das medidas de blindagem efetiva média para membrana de alumina não depositada (controle), e duas amostras distintas de alumina depositadas com nanoestruturas alongadas de YIG.



Fonte: O autor.

De modo geral, os maiores valores de blindagem para as amostras analisadas próximas das radiações de microondas de 8,5 GHz e 11 GHz. As alternâncias observadas nas curvas da figura 41 estão relacionadas ao comportamento de corrente alternada das ondas eletromagnéticas utilizadas nas medições (ZAINI *et al.*, 2022). Os valores negativos obtidos para blindagem efetiva, de -0,3 e -0,8 dB, vistos na figura 42, em ambas as amostras utilizadas, indicam uma leve diminuição no sinal registrado no detector devido as amostras absorverem as radiofrequências incidentes.

É interessante reiterar que como o YIG é um material com potencial aplicação para formulação de dispositivos que atuem na região do micro-ondas, ele pode agir como um absorvedor dessa radiação, impedindo que interferências eletromagnéticas indesejadas afetem partes sensíveis do equipamento, evitando danos. Estudos vêm sendo realizados com a granada tanto em forma de filme como sendo parte de um compósito, como o epóxi, apresentando resultados promissores de blindagem, indicando efeito positivo para uso comercial a partir de -10 dB (SHARMA *et al.*, 2017b; ZAINI *et al.*, 2022).

Acredita-se que uma das possibilidades para um valor abaixo do esperado seja que o compósito formado pelas nanoestruturas alongadas de YIG e a membrana de alumina não tenham um efeito sinérgico na absorção da radiação eletromagnética incidente. Outra hipótese seria de que as medições foram realizadas na banda X (entre 8 - 12 GHz), enquanto que a granada pode apresentar efeitos mais intensos de absorção em bandas mais baixas do espectro eletromagnético, como a banda S (entre 2 – 4 GHz) ou a banda C (entre 4 – 8 GHz).

6 CONCLUSÕES

Dentro dos desafios enfrentados, foi possível criar com eficiência e praticidade um aparato de baixo custo assistido de vácuo para obtenção de nanoestruturas alongadas com até 5 μm de comprimento, depositadas no interior de membranas porosas de óxido de alumínio com poros de 200 nm de diâmetro, obtendo como principal fase o YIG de estrutura cúbica.

A medida de ângulo de contato permitiu observar compatibilidade química entre as interfaces da solução precursora produzida e da membrana porosa utilizada como molde, sendo um parâmetro fundamental para a criação do novo procedimento de deposição desenvolvido neste estudo.

A partir da técnica de difração de raios X, espectroscopia Raman e espectroscopia por energia dispersiva foi possível qualificar quimicamente as nanoestruturas depositadas, exibindo ficha cristalográfica e modos vibracionais Raman característicos do YIG. Uma fase secundária relativa a um óxido intermediário do processo de síntese também foi identificada, indicando a necessidade de otimização do processo de síntese da solução precursora e posterior tratamento térmico do material depositado dentro dos poros do molde.

Através da magnetometria de amostra vibrante foi possível observar um comportamento predominantemente ferromagnético das nanoestruturas alongadas formadas, apresentando campos coercitivo e remanentes, respectivamente, de 21 Oe e 0,03 emu/g. Medidas de ressonância ferromagnética com variação de ângulo de campo incidente permitiram concluir que as nanoestruturas possuem baixa anisotropia associada ao formato elipsoidal de suas partículas constituintes durante o processo de sinterização.

Medidas de blindagem magnética na banda X geraram valores baixos de blindagem efetiva média para o YIG depositado em membrana porosa, indicando que uma menor banda de radiação incidente, indicativo de que o material possua melhor efeito de absorção de radiação eletromagnética em bandas de micro-ondas mais baixas, como a banda S ou a banda C.

A metodologia de deposição das nanoestruturas alongadas aqui aplicada as tornam promissoras para estudos envolvendo a fabricação de nanofios de YIG que possam ser aplicados em dispositivos envolvendo a utilização de um ou mais fios, como, por exemplo, na fabricação de sensores e capacitores de nanocircuitos. No que

tange a ciência de materiais, tal processo abre portas para o desenvolvimento de estudos envolvendo a fabricação de diferentes nanofios de óxidos metálicos de estequiometria mista que não podem ser fabricados por meios eletroquímicos devido a sua complexidade estrutural.

6.1 PERSPECTIVAS

- A partir dos resultados obtidos neste estudo, busca-se alavancar melhorias no processo de deposição de modo a se obter um gel consistente para sintetizar nanofios com maior uniformidade de tamanhos e maior densidade em sua composição, impactando positivamente nas propriedades magnéticas observadas em futuras medições;
- Otimizar a concentração molar da solução precursora para formação de um gel sem a presença do ácido cítrico, priorizando assim o preenchimento dos poros da membrana apenas com os íons de interesse para formação do YIG;
- Obter uma única fase de YIG de estrutura cúbica, evitando assim efeitos sinérgicos negativos oriundos de fases secundárias existentes no produto final;
- A utilização de guias de onda maiores nos ensaios de blindagem magnética, possibilitando assim o estudo do comportamento protetivo das amostras de compósito de fios de YIG em alumina em frequências mais baixas;
- Para o estudo do comportamento magnético de um único fio produzido, assim como melhores microscopias das nanoestruturas produzidas, proceder a separação dos fios da membrana através da dissolução da mesma utilizando solução de hidróxido de sódio.

REFERÊNCIAS

- ABAD, B.; MAIZ, J.; MARTIN-GONZALEZ, M. Rules to Determine Thermal Conductivity and Density of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Membranes. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 120, n. 10, p. 5361–5370, 2016.
- ABBAS, R. et al. Effect of fuel type on the solution combustion synthesis, structure, and magnetic properties of YIG nanocrystals. **Materials Today Communications**, v. 32, p. 103866, 2022.
- ABELMANN, L. Magnetic Force Microscopy. Em: **Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry**. [s.l.] Elsevier, p. 675–684, 2017.
- AKHTAR, M. N. et al. Structural and magnetic properties of yttrium iron garnet (YIG) and yttrium aluminum iron garnet (YAIG) nanoferrites prepared by microemulsion method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 401, p. 425–431, 2016.
- ALI, S. M.; EMRAN, K. M. Surfactant-template sol-gel protective coatings for cast iron corrosion: Effect of the surfactant type and concentration. **Journal of Molecular Liquids**, v. 367, p. 120366, 2022.
- ALI, W. F. F. W. et al. Studies on the formation of yttrium iron garnet (YIG) through stoichiometry modification prepared by conventional solid-state method. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 33, n. 7, p. 1317–1324, 2013.
- ALTAY, M.C.; EROGLU, S. Chemical vapor deposition of Ge nanowires from readily available GeO₂ and CH₄ precursors. **Journal of Crystal Growth**, v. 551, p. 125886, 2020.
- AMBHORKAR, P. et al. Nanowire-Based Biosensors: From Growth to Applications. **Micromachines**, v. 9, n. 12, p. 679, 2018.
- ASKERZADE, I. N.; ASKERBEYLI, R. T. Critical current of dc SQUID on Josephson junctions with unconventional current-phase relation. **Low Temperature Physics**, v. 46, n. 9, p. 919–922, 2020.
- ASSIS, L. K. C. S. et al. The FMR line width and the structure in YIG films deposited by MOD on silicon (1 0 0). **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 568, p. 170388, 2023.
- ASSIS, L. K. S. et al. High-quality YIG films preparation by metallo-organic decomposition and their use to fabricate spintronics nanostructures by focused ion beam. **Applied Nanoscience**, v. 12, n. 8, p. 2389–2396, 2022.
- ATITOAIE, A. et al. Magneto-mechanical modeling study of CO-based amorphous micro- and nanowires for acoustic sensing medical applications. **Physica B: Condensed Matter**, v. 486, p. 69–72, 2016.
- BAI, A.; HU, C. C. Iron–cobalt and iron–cobalt–nickel nanowires deposited by means of cyclic voltammetry and pulse-reverse electroplating. **Electrochemistry Communications**, v. 5, n. 1, p. 78–82, 2003.

BAND, Y. B.; AVISHAI, Y. Spin. Em: **Quantum Mechanics with Applications to Nanotechnology and Information Science**. [s.l.] Elsevier, p. 159–192, 2013.

BERGIN, S. M. et al. The effect of nanowire length and diameter on the properties of transparent, conducting nanowire films. **Nanoscale**, v. 4, n. 6, p. 1996, 2012.

BERTAUT, F.; FORRAT, F. Structure of ferrimagnetic rare-earth ferrites. **CR Acad. Sci.**, v. 242, p. 382, 1956.

BI, L. Materials for nonreciprocal photonics. **MRS Bulletin**, v. 43, n. 6, p. 408–412, 2018.

BINNS, C. Tutorial Section on Nanomagnetism. Em: [s.l: s.n.]. p. 1–32, 2014.

BOKOV, D. et al. Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, p. 1–21, 2021.

BRATAAS, A. et al. Spin insulatronics. **Physics Reports**, v. 885, p. 1–27, 2020.

BUIJNSTERS, J. G. et al. Surface Wettability of Macroporous Anodized Aluminum Oxide. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 5, n. 8, p. 3224–3233, 2013.

CABALLERO-CALERO, O.; MARTÍN-GONZÁLEZ, M. 3D porous alumina: A controllable platform to tailor magnetic nanowires. Em: **Magnetic Nano- and Microwires**. [s.l.] Elsevier, p. 3–20, 2020.

CAPKU, Z.; YILDIZ, F. Spin wave modes observation in YIG thin films with perpendicular magnetic anisotropy. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 538, p. 168290, 2021.

CHANDRA, R. B. J. et al. Hybrid polymer composites for EMI shielding application- a review. **Materials Research Express**, v. 6, n. 8, p. 082008, 2019.

CHEN, H. M.; LIU, R. S. Architecture of Metallic Nanostructures: Synthesis Strategy and Specific Applications. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 115, n. 9, p. 3513–3527, 2011.

CHEN, Z. et al. Microstructure and phase dependence of magnetic properties of CoFeB nanowires. **Vacuum**, v. 183, p. 109797, 2021.

CHOI, T. et al. Rate performance enhancement of lithium-ion battery using precise thickness-controllable-carbon-coated titanium dioxide nanowire array electrode via atomic layer deposition. **Electrochimica Acta**, v. 334, p. 135596, 2020.

CHUANG, H. C.; CHANG, T. S.; SANCHEZ, J. Fabrication of high aspect ratio NiP nanowires from blind-hole AAO templates by sc-CO₂ electroless plating. **Materials Letters**, v. 236, p. 657–660, 2019.

CHUANG, H. C.; HONG, G. Y.; SANCHEZ, J. Fabrication of high aspect ratio copper nanowires using supercritical CO₂ fluids electroplating technique in AAO template. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 45, p. 17–26, 2016.

COEY, J. M. D. **Magnetism and Magnetic Materials**. [s.l.] Cambridge University Press, 2001.

D'ARIENZO, M. et al. Synthesis and Characterization of Morphology-Controlled TiO₂ Nanocrystals. Em: [s.l.: s.n.]. p. 477–540, 2017.

DASGUPTA, S. et al. Toward On-and-Off Magnetism: Reversible Electrochemistry to Control Magnetic Phase Transitions in Spinel Ferrites. **Advanced Functional Materials**, v. 26, n. 41, p. 7507–7515, 2016.

DIEZ, L. H. et al. Nonvolatile Ionic Modification of the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction. **Physical Review Applied**, v. 12, n. 3, p. 034005, 2019.

DIONNE, G. F. **Magnetic Oxides**. Boston, MA: Springer US, 2009.

DODRILL, B.; REICHARD, H. S. Alternating Gradient Magnetometry. Em: **Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization**. Cham: Springer International Publishing, p. 139–149, 2021.

DUAN, Z. et al. Milling surface roughness for 7050 aluminum alloy cavity influenced by nozzle position of nanofluid minimum quantity lubrication. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 34, n. 6, p. 33–53, 2021.

DVORAK, F. et al. One-dimensional anodic TiO₂ nanotubes coated by atomic layer deposition: Towards advanced applications. **Applied Materials Today**, v. 14, p. 1–20, 2019.

DZYAPKO, O. et al. Control of Pure Spin Current by Magnon Tunneling and Three-Magnon Splitting in Insulating Yttrium Iron Garnet Films. **Solid State Physics**, v. 64, p. 83–122, 2013.

FERNÁNDEZ-PACHECO, A. et al. Three-dimensional nanomagnetism. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 15756, 2017.

FERRONE, K. L. et al. Reducing space radiation cancer risk with magnetic shielding. **Advances in Space Research**, v. 68, n. 1, p. 153–160, 2021.

FITTERMAN, D. V. Tools and Techniques: Active-Source Electromagnetic Methods. **Treatise on Geophysics**. Elsevier, p. 295–333, 2015.

FOLKS, L.; WOODWARD, R. C. The use of MFM for investigating domain structures in modern permanent magnet materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 190, n. 1–2, p. 28–41, 1998.

FONER, S. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer. **Review of Scientific Instruments**, v. 30, n. 7, p. 548–557, 1959.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 25. ed. São Paulo: Paz e Terra, p. 12, 2002.

GALSIN, J. S. Ferromagnetism. **Solid State Physics**, Elsevier, p. 407–430, 2019.

GARCIA, J. et al. 2D and 3D ordered arrays of Co magnetic nanowires. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 383, p. 88–93, 2015.

GARCÍA, J. et al. Electrochemical methods assisted with ALD for the synthesis of nanowires. **Magnetic Nano- and Microwires**. Elsevier, p. 21–60, 2020.

GEORGE, G. et al. Sol-gel electrospinning of diverse ceramic nanofibers and their potential applications. **Electrospun Polymers and Composites**. [s.l.] Elsevier, p. 689–764, 2021.

GETZLAFF, M. **Fundamentals of magnetism**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2007.

GILLES, M. A.; GELLER, S. Magnetic and Crystallographic Properties of Substituted Yttrium-Iron Garnet. **Physical Review**, v. 110, n. 1, p. 73–78, 1958.

GODDARD III, W. A. et al. **Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology**, 3^a ed., CRC Press, 2018.

GRISCOM, D. L. Amorphous Materials: Electron Spin Resonance. Em: **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. [s.l.] Elsevier, p. 179–185, 2001.

GRUSZECKI, P. et al. The influence of the internal domain wall structure on spin wave band structure in periodic magnetic stripe domain patterns. **Solid State Physics**, [s.l.] Elsevier, p. 29–82, 2019.

GUO, H. et al. Electrospun fibrous materials and their applications for electromagnetic interference shielding: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 143, p. 106309, 2021.

GUO, Z. et al. Direct electroplating of Ag nanowires using superionic conductors. **Nanoscale Horizons**, v. 5, n. 1, p. 89–94, 2020.

HAKIM, M. S.; PANGESTU, H.; RIYANTO, R. Preparation and Application of Nickel Electroplating on Copper (Ni/EC) Electrode for Glucose Detection. **Science and Technology Indonesia**, v. 7, n. 2, p. 208–212, 2022.

HAO, L. et al. Magnetic nanoparticle detection using nano-SQUID sensors. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, n. 47, p. 474004, 2010.

HARTMANN, U. Magnetic force microscopy. **Annual Review of Materials Science**, v. 29, n. 1, p. 53–87, 1999.

HAYATI, L. et al. Ferromagnetic Resonance of Y₃Fe₅O₁₂ Nanowires. **IEEE Magnetics Letters**, v. 9, p. 1–4, 2018.

HAYATI, L. et al. Synthesis and Characterization of High-Purity Yttrium-Iron-Garnet Nanowires Inside a Porous Silicon Membrane by the Sol–Gel Method. **IEEE Magnetism Letters**, v. 11, p. 1–4, 2020.

HEDAYATI, K. et al. Magnetic and Photo-catalyst CoFe₂O₄-CdS nanocomposites: Simple preparation of Ni, Co, Zn or Ag-doped CdS nanoparticles. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 28, n. 7, p. 5472–5484, 2017.

HIEMENZ, P. C.; RAJAGOPALAN, R. **Principles of Colloid and Surface Chemistry, Revised and Expanded**. [s.l.] CRC Press, 2016.

HILL, D. J.; CAHOON, J. F. **Nanowire Synthesis: From Top-Down to Bottom-Up**. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/nanoparticle-and-microparticle-synthesis/nanowire-synthesis>> Acessado em: 27 dez. 2023.

HIROHATA, A. Book Review: Spin Current. **Frontiers in Physics**, v. 6, 2018.

HIROHATA, A. et al. Review on spintronics: Principles and device applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 509, p. 166711, 2020.

HOLANDA, L. M. et al. Comportamento magnético de materiais por meio da mecânica estatística. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.

HOPSTER, H.; OEPEL, H. P. **Magnetic Microscopy of Nanostructures**. [s.l.] Springer, 2005.

HOSSEINZADEH, S. et al. High saturation magnetization, low coercivity and fine YIG nanoparticles prepared by modifying co-precipitation method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 476, p. 355–360, 2019.

HOU, J. et al. Momentum-Space Josephson Effects. **Physical Review Letters**, v. 120, n. 12, p. 120401, 2018.

HSU, C.Y. et al. Nanowires Properties and Applications: A Review Study. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 46, p. 286–311, 2023.

HU, T. et al. Crystal growth behavior and fluorescence properties of LaMgAl₁₁O₁₉:Eu³⁺ nano-powders prepared via sol-gel process. **Ceramics International**, v. 49, n. 7, p. 10554–10565, 2023.

HUANG, P. et al. Carbon quantum dots improving photovoltaic performance of CdS quantum dot-sensitized solar cells. **Optical Materials**, v. 110, p. 110535, 2020.

HUANG, Y. C. et al. Fabrication and magnetic properties of 100-nm-scaled permalloy nanotube arrays. **Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena**, v. 30, n. 6, 2012.

IBRAHIM, N. B.; NORATIQA, Y. The microstructure and magnetic properties of yttrium iron garnet film prepared using water-alcohol solvents. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 510, p. 166953, 2020.

JACOBSSON, D. et al. Interface dynamics and crystal phase switching in GaAs nanowires. **Nature**, v. 531, n. 7594, p. 317–322, 2016.

JANIFER, M. A. et al. Removal of Heavy Metal (Cadmium) Using Temperature Optimized Novel Rare Earth Garnet ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) Through Simple, Robust, and Efficient Adsorption Technique. **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, v. 35, n. 10, p. 2987–2998, 2022.

JANUSKEVICIUS, J. et al. Membrane-assisted synthesis of selected mixed-metal ferrite nanotubes using sol-gel derived precursors. **Solid State Sciences**, v. 132, p. 106983, 2022.

JOHNSON, A. How Ford invented the SQUID. **IEEE Spectrum**, v. 51, n. 11, p. 40–61, 2014.

JOSEPHSON, B. D. Possible new effects in superconductive tunnelling. **Physics Letters**, v. 1, n. 7, p. 251–253, 1962.

KANG, C. et al. Investigation of the giant magneto-impedance effect of single crystalline YIG based on the ferromagnetic resonance effect. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 865, p. 158903, 2021.

KARABUL, Y.; İÇELLİ, O. The assessment of usage of epoxy based micro and nano-structured composites enriched with Bi_2O_3 and WO_3 particles for radiation shielding. **Results in Physics**, v. 26, p. 104423, 2021.

KHIVINTSEV, Y. V. et al. Spin waves in YIG based magnonic networks: Design and technological aspects. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 545, p. 168754, 2022.

KIM, M.J. et al. Microstructure characterization of polycrystalline yttrium iron garnets (YIGs) sintered from the calcined sol-gel powder. **Materials Characterization**, v. 194, p. 112266, 2022.

KIM, S. et al. Atomic Layer Deposition for Preparation of Highly Efficient Catalysts for Dry Reforming of Methane. **Catalysts**, v. 9, n. 3, p. 266, 2019.

KIRCHMAYR, H. Magnetic Anisotropy. Em: **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. [s.l.] Elsevier, p. 4754–4757, 2001.

KITTEL, C.; HOLCOMB, D. F. Introduction to Solid State Physics. **American Journal of Physics**, v. 35, n. 6, p. 547–548, 1967.

KLEIN, L. C. OPTICAL MATERIALS | Sol-Gel Materials. Em: **Encyclopedia of Modern Optics**. [s.l.] Elsevier, p. 16–21, 2005.

KLINGLER, S. et al. Spin-wave logic devices based on isotropic forward volume magnetostatic waves. **Applied Physics Letters**, v. 106, n. 21, p. 212406, 2015.

KRAUS, L. Ferromagnetic resonance in individual wires. Em: **Magnetic Nano- and Microwires**. [s.l.] Elsevier, p. 449–486, 2015.

KRONMÜLLER, H. General Micromagnetic Theory. Em: **Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials**. [s.l.] Wiley, 2007.

KURODA, C. S. et al. Preparation of nano-sized Bi-YIG particles for micro optics applications. **Electrochimica Acta**, v. 44, n. 21–22, p. 3921–3925, 1999.

KUZ'MENKO, A. P.; ABAKUMOV, P. V. Raman imaging of domains and fine structure of domain walls in YFeO₃ crystals. **Technical Physics Letters**, v. 37, n. 11, p. 1058–1061, 2011.

LEAL, L. F. R. **Efeito da adição de cobre sobre as propriedades estruturais e magnéticas de nanopartículas de granada de ferro e ítrio**. Dissertação de mestrado - Brasil: Universidade Federal do Piauí, 2018.

LEAL, L. R. F. et al. Structural and magnetic properties of yttrium iron garnet nanoparticles doped with copper obtained by sol gel method. **Materials Letters**, v. 236, p. 547–549, 2019.

LEE, J. G. et al. One-step fabrication of surface-decorated inorganic nanowires via single-nozzle electrospinning. **Ceramics International**, v. 44, n. 10, p. 11858–11861, 2018a.

LEE, S. H. et al. A soft lithographic approach to fabricate InAs nanowire field-effect transistors. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 3204, 2018b.

LEITE, S. R. **Estudo da morfologia das microfibras de policaprolactona obtidas através da técnica de eletrofiação**. Dissertação de Mestrado - Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

LI, H.; GUO, Y. Synthesis and characterization of YIG nanoparticles by low temperature sintering. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 11, p. 9369–9374, 2018.

LI, M. et al. Impact of interfacial chemical state on spin pumping and inverse spin Hall effect in YIG/Pt hybrids. **Physical Review B**, v. 102, n. 17, p. 174435, 2020.

LI, S. et al. The development of carbon dots: From the perspective of materials chemistry. **Materials Today**, v. 51, p. 188–207, 2021.

LIN, H. et al. 3C-SiC nanowires in-situ modified carbon/carbon composites and their effect on mechanical and thermal properties. **Nanomaterials**, v. 8(11), p. 894, 2018.

LIU, J. et al. An insight into formation mechanism of rapid chemical Co-precipitation for synthesizing yttrium iron garnet nano powders. **Materials Chemistry and Physics**, v. 208, p. 169–176, 2018.

LOPEZ-DOMINGUEZ, V. et al. A simple vibrating sample magnetometer for macroscopic samples. **Review of Scientific Instruments**, v. 89, n. 3, p. 034707, 2018.

LU, J. W. et al. Spintronics technology: past, present and future. **International Materials Reviews**, v. 61, n. 7, p. 456–472, 2016.

LÜ, X.; SHEN, W. Z.; CHU, J. H. Size effect on the thermal conductivity of nanowires. **Journal of Applied Physics**, v. 91, n. 3, p. 1542–1552, 2002.

LUO, X. et al. Tape casting and characterization of yttrium iron garnet ferrite thick film for microwave substrate application. **Ceramics International**, v. 46, n. 5, p. 6462–6468, 2020.

LURAGHI, A.; PERI, F.; MORONI, L. Electrospinning for drug delivery applications: A review. **Journal of Controlled Release**, v. 334, p. 463–484, 2021.

MANSOURI, N. et al. Electrodeposition of equiatomic FeNi and FeCo nanowires: Structural and magnetic properties. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 493, p. 165746, 2020.

MARTÍN, J.; MANZANO, C. V.; MARTÍN-GONZÁLEZ, M. In-depth study of self-ordered porous alumina in the 140–400nm pore diameter range. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 151, p. 311–316, 2012.

MASUDA, H.; FUKUDA, K. Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina. **Science**, v. 268, n. 5216, p. 1466–1468, 1995.

MEDINA, J. de la T. et al. Large-scale 3-D interconnected Ni nanotube networks with controlled structural and magnetic properties. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 14555, 2018.

MENG, X.; ZHANG, Z.; LI, L. Micro/nano needles for advanced drug delivery. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 30, n. 5, p. 589–596, 2020.

MOHAMED, A. M. O.; PALEOLOGOS, E. K. Magnetic Properties of Soils. Em: **Fundamentals of Geoenvironmental Engineering**. [s.l.] Elsevier, p. 535–580, 2018.

MOSKOWITZ, B. M.; JACKSON, M.; CHANDLER, V. Geophysical Properties of the Near-Surface Earth: Magnetic Properties. Em: **Treatise on Geophysics**. [s.l.] Elsevier, 2015a. p. 139–174, 2015.

MUENCH, F. et al. Template-Free Electroless Plating of Gold Nanowires: Direct Surface Functionalization with Shape-Selective Nanostructures for Electrochemical Applications. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 9, n. 36, p. 31142–31152, 2017.

MUÑOZ-NOVAL, Á. et al. Characterization of hybrid cobalt-porous silicon systems: protective effect of the Matrix in the metal oxidation. **Nanoscale Research Letters**, v. 7, n. 1, p. 495, 2012.

MUSA, M. A. et al. Structural and magnetic properties of yttrium iron garnet (YIG) and yttrium aluminum iron garnet (YAIG) nanoferrite via sol-gel synthesis. **Results in Physics**, v. 7, p. 1135–1142, 2017.

NAGRARE, B. S. et al. Hyperfine interaction, Raman and magnetic study of YFeO_3 nanocrystals. **Solid State Communications**, v. 280, p. 32–38, 2018.

NASIR, N. et al. Observation of a Cubical-Like Microstructure of Strontium Iron Garnet and Yttrium Iron Garnet Prepared via Sol–Gel Technique. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 11, n. 3, p. 2551–2554, 2011.

NÉEL, M. L. Propriétés magnétiques des ferrites; ferrimagnétisme et antiferromagnétisme. **Annales de Physique**, v. 12, n. 3, p. 137–198, 1948.

NGUYET, D. T. T. et al. Temperature-dependent magnetic properties of yttrium iron garnet nanoparticles prepared by citrate sol–gel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 541, p. 18–22, 2012.

NIYAIFAR, M. et al. Size dependence of non-magnetic thickness in YIG nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 409, p. 104–110, 2016.

PAIVA, D. V. M. et al. Novel magnetic–dielectric composite ceramic obtained from $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and CaTiO_3 . **Journal of Alloys and Compounds**, v. 644, p. 763–769, 2015.

PAN, L. et al. Structural and magnetic properties of electrospun yttrium iron garnet (YIG) nanofibers. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 1236–1241, 2017.

PARK, J. M. et al. Fabrication of metallic nanowires and nanoribbons using laser interference lithography and shadow lithography. **Nanotechnology**, v. 21, n. 21, p. 215301, 2010.

PEÑA-GARCIA, R. et al. Magnetic and structural properties of Zn-doped yttrium iron garnet nanoparticles. **physica status solidi (a)**, v. 213, n. 9, p. 2485–2491, 2016.

PEÑA-GARCIA, R. et al. Synthesis and characterization of yttrium iron garnet nanoparticles doped with cobalt. **Ceramics International**, v. 44, n. 10, p. 11314–11319, 2018.

PÉREZ, M. et al. Combined alternating gradient force magnetometer and susceptometer system. **Review of Scientific Instruments**, v. 86, n. 1, p. 015110, 2015.

PIROUZFAR, A.; EBRAHIMI, S. A. S. Optimization of sol–gel synthesis of CoFe_2O_4 nanowires using template assisted vacuum suction method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 370, p. 1–5, 2014.

POGES, S. et al. Preparation and characterization of aluminum coatings via electroless plating onto nickel nanowires using ionic liquid plating solution. **Materials Chemistry and Physics**, v. 207, p. 303–308, 2018.

POGGIO, M. Determining magnetization configurations and reversal of individual magnetic nanotubes. Em: **Magnetic Nano- and Microwires**. [s.l.] Elsevier, p. 491–517, 2020.

PRANAV, S. A. SQUID Magnetometer - A study. [s.l: s.n.], 2021.

PRINCEP, A. J. et al. The full magnon spectrum of yttrium iron garnet. **Npj Quantum Materials**, v. 2, n. 1, p. 63, 2017.

PULLAR, R. C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. **Progress in Materials Science**, v. 57, n. 7, p. 1191–1334, 2012.

PUSIOL, E. F. et al. Dynamic susceptibility of Fe₃O₄ nanotubes. **Discover Nano**, v. 18, n. 1, p. 61, 2023.

QIN, H. et al. Spinel ferrites (MFe₂O₄): Synthesis, improvement and catalytic application in environment and energy field. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 294, p. 102486, 2021.

RAJSKA, D. et al. Adjusting the crystal size of InSb nanowires for optical band gap energy modification. **Materials Chemistry and Physics**, v. 254, p. 123498, 2020.

RAMADAN, S. et al. Fully controllable silicon nanowire fabricated using optical lithography and orientation dependent oxidation. **Applied Surface Science**, v. 523, p. 146516, 2020.

RAMZAN, M. et al. Magnetic force microscopy investigation of arrays of nickel nanowires and nanotubes. **Nanotechnology**, v. 25, 2014.

RANA, G. et al. Recent advances on nickel nano-ferrite: A review on processing techniques, properties and diverse applications. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 175, p. 182–208, 2021.

RAVIOLO, S. et al. Wave reversal mode: A new magnetization reversal mechanism in magnetic nanotubes. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 497, p. 165944, 2020.

REDDY, P. R.; AJITH, K. M.; UDAYASHANKAR, N. K. Contact Angle Measurement Studies On Porous Anodic Alumina Membranes Prepared Using Different Electrolytes. **Advanced Materials Letters**, v. 7, n. 5, p. 398–401, 2016.

REDÓN, R. et al. Contact angle studies on anodic porous alumina. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 287, n. 2, p. 664–670, 2005.

SANKARAN, S. et al. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 114, p. 49–71, 2018.

SARAVANAN, N.; SASIKUMAR, K. S. K. Waste water treatment process using Nano TiO₂. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 2570–2572, 2020.

SCHAEFER, S. et al. NiCo nanotubes plated on Pd seeds as a designed magnetically recollectable catalyst with high noble metal utilisation. **RSC Advances**, v. 6, n. 74, p. 70033–70039, 2016.

SCOTT, J. A. et al. Versatile method for template-free synthesis of single crystalline metal and metal alloy nanowires. **Nanoscale**, v. 8, n. 5, p. 2804–2810, 2016.

SERGA, A. A.; CHUMAK, A. V; HILLEBRANDS, B. YIG magnonics. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, n. 26, p. 264002, 2010.

SHACHAM-DIAMAND, Y. et al. 30 years of electroless plating for semiconductor and polymer micro-systems. **Microelectronic Engineering**, v. 132, p. 35–45, 2015.

SHAPOURI, S. et al. Physical characterization of copper oxide nanowire fabricated via magnetic-field assisted thermal oxidation. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 524, p. 167633, 2021.

SHARMA, V. et al. Synthesis and characterization of yttrium iron garnet (YIG) nanoparticles - Microwave material. **AIP Advances**, v. 7, n. 5, 2017a.

SHARMA, V. et al. YIG based broad band microwave absorber: A perspective on synthesis methods. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 439, p. 277–286, 2017b.

SHARMA, V.; KUARNR, B. K. Magnetic and crystallographic properties of rare-earth substituted yttrium-iron garnet. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 748, p. 591–600, 2018.

SHENG, L. et al. Magnonics Based on Thin-Film Iron Garnets. **Journal of the Physical Society of Japan**, v. 90, n. 8, p. 081005, 2021.

SHEVCHENKO, A. B.; BARABASH, M. Y. Heat capacity of ferrite-garnet nanowire with domain wall. **Physica B: Condensed Matter**, v. 556, p. 114–117, 2019.

SHIMIZU, M. et al. Multi-layered copper foil reinforced by co-deposition of single-walled carbon nanotube based on electroplating technique. **Materials Letters**, v. 261, p. 126993, 2020.

SHIN, H. W.; SON, J. Y. Magnetic domain structure and magnetic anisotropy in ferromagnetic Y₃Fe₅O₁₂ nanowires formed by step-edge decoration. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 444, p. 102–105, 2017.

SILVA, M. F. **Ressonância ferromagnética de banda larga para o estudo de relaxação em nanoestruturas magnéticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2022.

SKOMSKI, R. Nanomagnetism. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 15, n. 20, p. R841–R896, 2003.

SKORIC, L. et al. Micromagnetic modeling of magnetic domain walls in curved cylindrical nanotubes and nanowires. **Applied Physics Letters**, v. 118, n. 24, 2021.

SOKOLOV, N. S. et al. Thin yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition: Crystal structure, static, and dynamic magnetic properties. **Journal of Applied Physics**, v. 119, n. 2, p. 023903, 2016.

SOLER, M. A. G.; PATERNO, L. G. Magnetic Nanomaterials. Em: **Nanostructures**. [s.l.] Elsevier, p. 147–186, 2017.

SONG, L. et al. Novel hybrid xerogel with CaF_2 : Tb^{3+} nanoparticles covalently embedded into silicon-oxygen network through sol-gel process. **Journal of Luminescence**, v. 250, p. 119071, 2022.

SONG, Y.-Y.; KALARICKAL, S.; PATTON, C. E. Optimized pulsed laser deposited barium ferrite thin films with narrow ferromagnetic resonance linewidths. **Journal of Applied Physics**, v. 94, n. 8, p. 5103, 2003.

SOUSA, W. J. et al. Saturation magnetization as a function of temperature in Zn doped YIG nanoparticles. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, v. 138, p. 115054, 2022.

SPALDIN, N. A. Ferrimagnetism. Em: **Magnetic Materials: Fundamentals and Applications**. [s.l.] Cambridge University Press, p. 113–119, 2010.

STAÑO, M.; FRUCHART, O. Magnetic Nanowires and Nanotubes. **Handbook of magnetic materials**, North Holland, v. 27, p. 155–267, 2018.

SULKA, G. D. Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing. **Nanostructured Materials in Electrochemistry**. [s.l.] Wiley, p. 1–116, 2008.

SUN, Y. **Yttrium iron garnet nano films: epitaxial growth, damping, spin pumping, and magnetic proximity effect**. Fort Collins: Colorado State University, 2014.

SUN, Y.; WU, M. Yttrium Iron Garnet Nano Films. Recent advances in magnetic insulators, v. 64(6), p. 157–191, 2013.

SURABHI, S. et al. Fill factor controlled nanoimprinted ZnO nanowires based on atomic layer deposition. **Current Applied Physics**, v. 18, n. 6, p. 767–773, 2018.

TAYLOR, I. Primordial magnetism. **New Scientist**, v. 250, n. 3340, p. 36–40, 2021.

TEIXEIRA, S. S. et al. Comparison of lithium ferrite powders prepared by sol-gel and solid state reaction methods. **Materials Science and Engineering: B**, v. 255, p. 114529, 2020.

THAO, D. N.; BAO, L. T. N. Quantum beat of excitons in spherical semiconductor quantum dots. **Superlattices and Microstructures**, v. 146, p. 106675, 2020.

THOMSON, T. Magnetic properties of metallic thin films. **Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications**. [s.l.] Elsevier, p. 454–546, 2014.

THONGDEE, S. **Effect of iridium manganese corrosion on magnetic properties of exchange bias thin films**. Bangkok: Kasetsart University, 2020.

WAN ALI, W. F. F. et al. The Investigation of the Phenomenological YIG Phase Formation Within 1000 °C to 1250 °C: A Kinetic Approach. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 99, n. 1, p. 315–323, 2016.

WANG, J. et al. Design and simulation of self-biased circulators in the ultra high frequency band. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, n. 6, p. 991–994, 2012.

WANG, P. et al. Electrospinning of graphite/SiC hybrid nanowires with tunable dielectric and microwave absorption characteristics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 104, p. 68–80, 2018.

WANG, Z. et al. Progress in design, nanofabrication and performance of metalenses. **Journal of Optics**, 2021.

WU, H. et al. Electrospinning of Fe, Co, and Ni Nanofibers: Synthesis, Assembly, and Magnetic Properties. **Chemistry of Materials**, v. 19, n. 14, p. 3506–3511, 2007.

WU, H. et al. Grain size and Fe²⁺ concentration-dependent magnetic, dielectric, and magnetodielectric properties of Y₃Fe₅O₁₂ ceramics. **physica status solidi (a)**, v. 213, n. 1, p. 146–153, 2016.

WU, M. Nonlinear Spin Waves in Magnetic Film Feedback Rings. **Solid State Physics**, v. 62, p. 163–224, 2010.

XING, Y. et al. Direct electrospun La₂O₃ nanowires decorated with metal particles: Novel 1 D adsorbents for rapid removal of dyes in wastewater. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 45, p. 84–91, 2020.

XU, J. et al. Effects of gradient diameter on magnetic properties of FeNi alloys nanowires arrays. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 499, p. 166207, 2020.

YILMAZ, E.; SOYLAK, M. Functionalized nanomaterials for sample preparation methods. Em: **Handbook of Nanomaterials in Analytical Chemistry**. [s.l.] Elsevier, p. 375–413, 2020.

ZA'BAH, N. F. et al. Top-down fabrication of single crystal silicon nanowire using optical lithography. **Journal of Applied Physics**, v. 112, n. 2, 2012.

ZAINI, N. A. A. et al. Structural, morphological and shielding effectiveness properties of Yttrium Iron Garnet/Epoxy composites at X-Band frequency prepared via solid state reaction method. **Materials Today: Proceedings**, v. 51, p. 1426–1431, 2022.

ZENG, X. L. et al. Properties of $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ hybride nanowire networks prepared by electrospinning. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 475, p. 741-745, 2019.

ZHANG, A.; ZHENG, G.; LIEBER, C. M. **Nanowires: Building Blocks for Nanoscience and Nanotechnology**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

ZHANG, B. **Physical Fundamentals of Nanomaterials**. 1^o Edition. ed. [s.l.] Elsevier Science, 2018.

ZHANG, K. et al. Multifunctional Textiles/Metal–Organic Frameworks Composites for Efficient Ultraviolet Radiation Blocking and Noise Reduction. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 49, p. 55316–55323, 2020.

ZHANG, X. M. et al. Fabrication and characterization of YIG nanotubes. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 482, p. 358–363, 2019.

ZHANG, Z. et al. Electrochemical characterization of LiMn_2O_4 nanowires fabricated by sol-gel for lithium-ion rechargeable batteries. **Materials Letters**, v. 273, p. 127923, 2020.

ZHAO, G. et al. Preparation of mesoporous $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ aerogel via non-alkoxide sol-gel process with different solvent systems. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 604, p. 122140, 2023.

ZHENG, H. et al. Preparing magnetic yttrium iron garnet nanodot arrays by ultrathin anodic alumina template on silicon substrate. **Applied Physics Letters**, v. 107, n. 6, 2015.

ZHU, D. et al. Intriguingly high thermal conductivity increment for CuO nanowires contained nanofluids with low viscosity. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 5282, 2018.

ZHU, S.; LIU, J.; SUN, J. Growth of ultrathin SnO_2 on carbon nanotubes by atomic layer deposition and their application in lithium-ion battery anodes. **Applied Surface Science**, v. 484, p. 600–609, 2019.

ZUBOV, E. E. Crystal field and origin of exchange bias in compensated rare-earth ferrimagnets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 551, p. 169153, 2022.

ANEXO A – Produção científica

Artigos científicos relacionados com a tese:

PESSOA, P. H.; ASSIS, L. K. S.; FRANÇA, E. L. T.; CARVALHO, A. S.; OLIVEIRA, D. M.; PADRÓN-HERNÁNDEZ, E. Fabrication of elongated YIG nanostructures by the sol-gel method supported on alumina membranes. JOURNAL OF SOL-GEL SCIENCE AND TECHNOLOGY, v. 107, p. 1, 2023.

Patentes depositadas relacionadas com a tese:

PESSOA, P. H.; PADRON-HERNÁNDEZ, E.; ASSIS, L.K.C.S.; FRANCA, E.L.T. Proposta de metodologia para fabricação de nanoestruturas alongadas de óxidos mistos metálicos de estequiometria mista. 2023, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do Registro: BR1020230054951, título: “Proposta de metodologia para fabricação de nanoestruturas alongadas de óxidos metálicos de estequiometria mista”, Instituição de registro: INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industria. Depósito: 24/03/2023.