UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

SIMONE NASCIMENTO DA SILVEIRA

COMPÓSITOS DE POLI (FLUORETO DE VINILIDENO) (PVDF) E NEGRO DE FUMO (NF) PARA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

SEROPÉDICA
2026

SIMONE NASCIMENTO DA SILVEIRA

COMPÓSITOS DE POLI (FLUORETO DE VINILIDENO) (PVDF) E NEGRO DE FUMO (NF) PARA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

Dissertação apresentada ao PPGCEMat da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Ketly Pontes Soares

SEROPÉDICA

2026

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S587c

Silveira, Simone Nascimento da, 1981-
compósitos de poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF) e negro de fumo (NF) para blindagem eletromagnética / Simone Nascimento da Silveira. - Seropédica, 2026.
68 f.

Orientadora: Ketly Pontes Soares.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFRRJ (PPGCEMat), 2026.

1. Materiais compósitos e nanocompósitos. 2. Compósitos poliméricos condutores. 3. Eficiência de blindagem eletromagnética (SE). I. Soares, Ketly Pontes , 1988-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFRRJ (PPGCEMat) III. Título.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS

SIMONE NASCIMENTO DA SILVEIRA

COMPÓSITOS DE POLI (FLUORETO DE VINILIDENO) (PVDF) E NEGRO DE FUMO (NF) PARA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no PPGCEMat, Área de concentração em CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Dissertação aprovada em 20 de agosto de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

gov.br Documento assinado digitalmente
KETLY PONTES SOARES
Data: 07/10/2026 17:52:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Ketly Pontes Soares - Orientadora – UFRRJ

gov.br Documento assinado digitalmente
JOAO VICTOR NICOLINI
Data: 07/10/2026 09:53:40-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

João Victor Nicolini - Membro interno – UFRRJ

gov.br Documento assinado digitalmente
JESSICA PEREIRA SOARES DA SILVA
Data: 05/10/2026 13:57:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Jéssica Pereira Soares da Silva - Membro externo – UFRJ

DECLARAÇÃO SOBRE O USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Durante a elaboração deste trabalho, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial como suporte à correção ortográfica e ao auxílio na produção de resumos de artigos, mantendo-se a responsabilidade autoral pelo conteúdo apresentado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de estudar na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional, pela compreensão e pelo incentivo constante, que foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço aos colegas do curso pelos momentos vividos e pela companhia ao longo dessa jornada.

Agradeço à minha orientadora por todo o apoio e pela paciência durante todo o processo de elaboração desta dissertação.

Agradeço ao grupo de pesquisa COMPOL/UFRRJ, onde foi realizado o presente trabalho.

Agradeço ao Metalmat e ao IMA da UFRJ pelas análises realizadas.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Código de Financiamento 132660/2024-5. This study was financed in part by the conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnologico.Finance Code 132660/2024-5.

“Ora, a estes quatro jovens Deus, deu o conhecimento e a inteligência em toda cultura e sabedoria; mas a Daniel deu inteligência de todas as visões e sonhos.”

(Daniel 1-17)

RESUMO

SILVEIRA, Simone da Nascimento. **Compósitos de Poli (Fluoreto de Vinilideno) (PVDF) e Negro de Fumo (NF) para blindagem eletromagnética**. 2026. 67 folhas. Dissertação (Mestrado em ciências e engenharia de materiais) - Programa de Pós-graduação em ciências e engenharia de materiais, Instituto de tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

Os compósitos condutores são materiais formados por uma matriz polimérica isolante e partículas condutoras, como negro de fumo, nanotubos de carbono ou grafeno, que melhoram as propriedades elétricas e possuem aplicações civis e militares. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar compósitos de PVDF com negro de fumo (NF) para aplicação em sistemas de blindagem eletromagnética. As misturas de PVDF/NF foram preparadas nas proporções de 90/10, 85/15 e 80/20, por microextrusora a 230 °C, e os corpos de prova foram moldados por injeção na mesma temperatura para as caracterizações. Conforme resultados preliminares das misturas PVDF/NF obtidos por FTIR, observou-se redução da intensidade da banda em 840 cm^{-1}, indicando diminuição da fase cristalina beta (β) e menor organização estrutural das cadeias poliméricas. As análises reológicas mostraram que a adição de negro de fumo aumentou a viscosidade complexa dos compósitos em relação ao PVDF puro, sendo todos classificados como pseudoplásticos, com redução da viscosidade com o aumento da frequência. As micrografias mostraram que o compósito com 20% de negro de fumo apresentou melhor dispersão das partículas e formação de uma rede condutora na matriz de PVDF. Além disso, a condutividade em corrente alternada aumentou com o teor de carga, favorecendo a condução elétrica. Por fim, os ensaios de blindagem eletromagnética mostraram que a eficiência aumenta com o teor de NF e também com a espessura do material, sendo a amostra 80/20 (PVDF/NF) a que apresentou o melhor desempenho, PVDF/NF atingindo cerca de -25 dB (1 mm) e -38 dB (3 mm). Os resultados preliminares indicam que os compósitos PVDF/NF são promissores para blindagem eletromagnética, com aplicações potenciais no revestimento de submarinos para reduzir a detecção por radares e em dispositivos médicos, como marcapassos, para minimizar interferências eletromagnéticas.

Palavra-chave: Compósitos, cargas condutoras, blindagem eletromagnética

ABSTRACT

SILVEIRA, Simone da Nascimento. **Poly(Vinylidene Fluoride) (PVDF) and Carbon Black (CB) Composites for Electromagnetic Shielding**. 2026. 67 pages. Master's Dissertation (Master's Degree in Materials Science and Engineering) – Graduate Program in Materials Science and Engineering, Institute of Technology, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, Brazil, 2026.

Conductive composites are materials composed of an insulating Polymer matrix and conductive fillers, such as carbon black, carbon nanotubes, or graphene, which improve their electrical properties and have both civilian and military applications. This study aims to develop and characterize poly(vinylidene fluoride) (PVDF) composites containing carbon black (NF) for electromagnetic shielding applications. PVDF/NF composites were prepared with compositions of 90/10, 85/15, and 80/20 by microextruder at 230 °C. The speciments were then injection molded at the same temperature for characterization. According to the preliminary FT-IR results of the PVDF/NF blends, a reduction in the intensity of the band at 840 cm^{-1} was observed, indicating a decrease in the β- crystalline phase and lower structural organization of the polymer chains. Rheological analyses revealed that addition of carbon black increased the complex viscosity of the composites compared to pure PVDF, with all samples showing pseudoplastic behavior, characterized by a decrease in viscosity as the frequency increased. The micrographs showed that the composites containing 20% carbon black (NF) exhibited better particle dispersion and the formation of a conductive network within the PVDF matrix. In addition, the alternating current (AC) conductivity increased with carbon black, enhancing electrical conduction. Finally, the electromagnetic shielding tests indicated that the shielding efficiency increases with both the carbon black content and the material thickness, with the 80/20 PVDF/NF sample showing the best performance, reaching approximately -25 dB (1 mm) and -38 dB (3 mm). Preliminary results indicate that PVDF/NF composites are promising materials for electromagnetic shielding applications, with potential use in submarine coatings to reduce radar detection and in medical devices, such as pacemakers, to minimize electromagnetic.

Keywords: composites, conductive filler, electromagnetic shielding

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Exemplos de materiais desenvolvidos a partir de compósitos polimérico 18
Figura 2- Condutividade elétrica em relação à porcentagem da concentração de carga em uma matriz isolante 21
Figura 3- Apresentação esquemática da incidência da onda eletromagnética e seus mecanismos de interação.....26
Figura 4- Fórmula estrutural da unidade repetitiva do PVDF. 28
Figura 5- Principais estruturas polimórficas de PVDF, onde as esferas preto, branco e cinza representam carbono, hidrogênio e átomos de flúor, respectivamente.....29
Figura 6- Nuvem de palavras 43
Figura 7- Representação esquemática da obtenção das amostras. 46
Figura 8- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de PVDF/NF: a) 90/10 (500X), b) 90/10 (1000X), c) 90/10 (3000X); d) 85/15 (500X), e) 85/15 (1000X), f)85/15 (3000X); g) 80/20 (500X), h) 80/20 (1000X), i) 80/20 (3000X) 51
Figura 9- Espectroscopia de infravermelho do PVDF puro e dos compósitos à base de PVDF/NF com diferentes teores de carga condutora. 53
Figura 10- Viscosidade complexa dos compósitos à base de PVDF/NF em diferentes teores de carga condutora. 54
Figura 11- Condutividade AC dos compósitos à base de PVDF/NF com diferentes percentuais de NF. 55
Figura 12- Eficácia de blindagem eletromagnética (SE) na faixa de 8 a 18 GHz para compósitos de PVDF com negro de fumo em diferentes proporções (90/10), 85/15 e 80/20) com espessura de 1 mm e 3 mm.....56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação entre atenuação da radiação (SET) e o percentual de energia atenuada. 27
Tabela 2- Estudos sobre compósitos Condutores à base de PVDF e outros Polímeros. ..32
Tabela 3- Comparação de estudos sobre compósitos poliméricos com cargas híbridas de grafeno (ou rGO- óxido de grafeno reduzido) e negro de fumo (CB). 38
Tabela 4- As principais bandas de absorção características do PVDF são apresentadas a seguir: 52
Tabela 5- Análise na faixa de frequência: 13 a 18 GHz 56

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO 14
2. REVISÃO DA LITERATURA 17
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS E NANOCOMPÓSITOS 17
2.2. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS CONDUTORES 19
2.2.1. Limiar de Percolação Elétrica 20
2.3. BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA 22
2.4. POLI (FLUORETO DE VINILIDENO) (PVDF) 28
2.5. NEGRO DE FUMO (NF) CONDUTOR *(CARBON BLACK- CB-sigla em inglês)* 29
2.6. COMPÓSITOS CONDUTORES: APLICAÇÕES 31
2.7. NUVEM DE PALAVRAS 42
3. MATERIAIS E MÉTODOS 44
3.1. MATERIAIS 44
3.2. EQUIPAMENTOS 44
3.3. METODOLOGIA 45
3.3.1. Preparação dos Compósitos 45
3.3.2. Caracterizações 46
3.3.2.1. Comportamento Reológico dos Compósitos 46
3.3.2.2. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) 47
3.3.2.3. Avaliação da Condutividade Elétrica (AC) dos Compósitos 47
3.3.2.4. Morfologia dos Compósitos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 48
3.3.2.5. Eficiência de Blindagem Eletromagnética (SE) 48
4. RESULTADOS 50
4.1. Morfologia dos Compósitos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 50
4.1.1. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de *Fourier* (FTIR) 52
4.1.2. Comportamento Reológico dos Compósitos 53

4.1.3. Avaliação da Condutividade Elétrica (AC) dos Compósitos 55

4.1.4. Eficiência de Blindagem Eletromagnética (SE) 55

5. CONCLUSÕES 59

REFERÊNCIAS 62

1.INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a procura por materiais inovadores com propriedades ajustáveis impulsionou avanços significativos no campo dos compósitos. Esses materiais, resultante da combinação de dois ou mais componentes distintos, oferecem um vasto leque de possibilidades para o desenvolvimento de estruturas com desempenho superior em termos mecânicos, elétricos e térmicos. As misturas poliméricas condutoras são formadas por uma matriz polimérica isolante combinada com cargas de natureza condutora. Entre as cargas mais comum destacam-se o grafeno, os nanotubos e o negro de fumo, entre outras. Esses compósitos apresentam ampla aplicação tecnológica, sendo empregados no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos, em revestimentos condutores, na blindagem eletromagnética e na fabricação de sensores (Lepaky-kuc *et al*., 2024).

Os nanomateriais como por exemplo, nanotubos de carbono (CNTs), grafeno, óxido de grafeno e nanoplacas de grafeno, oferecem alta condutividade elétrica, térmica, resistência mecânica, baixo peso e resistência à corrosão. Quando incorporados em polímeros, que são materiais leves, de menor custo em comparação às matrizes metálicas e cerâmicas e fáceis de processar, os compósitos condutores ampliam consideravelmente suas aplicações em diversas áreas tecnológicas, como sensores, blindagem eletromagnética, materiais para impressão 3D, têxteis inteligentes e dispositivos eletrônicos flexíveis. Essa combinação entre baixo custo, processabilidade e desempenho funcional torna os polímeros uma alternativa versátil e economicamente viável para o desenvolvimento de materiais condutores avançados. A combinação de diferentes nanomateriais resulta em melhor formação de caminhos condutores, aumentando a performance elétrica sem perder a processabilidade (Lepaky-Luc *et al*., 2024; Lee *et al*., 2024).

No entanto, o negro de fumo (NF) tem sido amplamente empregado em materiais de blindagem eletromagnética, desempenhando um papel fundamental na absorção e dissipação de ondas eletromagnéticas, o que contribui significativamente para a redução de interferência em dispositivos eletrônicos. A sua incorporação em compósitos poliméricos favorece a dissipação de cargas elétricas e a melhoria da absorção de radiação eletromagnética, resultando em materiais com propriedades

funcionais otimizadas. Embora a condutividade elétrica do negro de fumo seja inferior à do grafeno, as suas vantagens econômicas, associadas à facilidade de dispersão e à eficácia como agente de reforço funcional, conferem-lhe grande importância tecnológica e científica no desenvolvimento de compósitos poliméricos condutores de eletricidade destinados a aplicações avançadas em proteção e compatibilidade eletromagnética (Gumus *et al.*, 2023).

Além disso, o negro de fumo (NF) é amplamente utilizado como carga condutora em compósitos poliméricos, contribuindo para a modificação das propriedades elétricas da matriz. Apesar de apresentar uma estrutura predominantemente amorfa e desordenada, que limita sua condutividade elétrica, sua incorporação ao polímero, associada a uma adequada dispersão, favorece a aproximação e a interconexão das partículas, possibilitando a formação de uma rede de percolação responsável pelo transporte de cargas elétricas. Além disso, o reduzido tamanho das partículas contribui para a conectividade dessa rede, enquanto concentrações excessivas de NF podem prejudicar o desempenho elétrico do compósito, tornando necessário o controle adequado e distribuição na matriz polimérica (Sun *et al*., 2023; Lepaky-Luc *et al*., 2024).

Em princípio, poli (Fluoreto de Vinilideno) (PVDF) é um material de engenharia notável, cujas propriedades intrínsecas de resistência química, mecânica e térmica, juntamente com sua piezoeletricidade, o posicionam como um polímero de escolha para uma infinidade de aplicações de alta tecnologia. A capacidade de formar compósitos com outros materiais, como nanopartículas semicondutoras, permite a otimização de suas propriedades e a criação de novas funcionalidades, como a melhoria da sensibilidade piezoresistiva para sensores avançados. A combinação de propriedades intrínsecas do PVDF e as melhorias obtidas com seus compósitos abrem portas para uma vasta gama de aplicações em diversas indústrias como a formação de sensores de deformação, revestimentos a base de PVDF em tubulações, dispositivo de coleta de energia, aeroespacial e blindagem eletromagnética (Kaplan *et al*., 2024).

Portanto, o emprego de materiais absorvedores de radiação eletromagnética tem assumido um caráter estratégico, sobretudo no setor militar, onde seu uso se intensificou durante a Segunda Guerra Mundial. No âmbito civil, esses materiais também se mostram relevantes para o bem-estar social, abrangendo desde

aplicações médicas, como o desenvolvimento de revestimentos protetores para dispositivos cardíacos, até o setor de telecomunicação. A principal função desses materiais é atenuar interferências de micro-ondas, contribuindo para a redução da chamada poluição eletromagnética, cada vez mais presente em função dos avanços tecnológicos (Pereira, 2007; Soares, 2020). Na área militar, por exemplo, emprega-se compósitos para revestir um submarino e torná-lo menos detectável por radares em uma faixa de frequências específicas. Na área civil, compósitos condutores são usados para atenuar interferências eletromagnéticas, por exemplo, proteções que reduzem ruídos que poderiam afetar dispositivos sensíveis, como marcapassos.

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver e caracterizar compósitos poliméricos à base de poli (Fluoreto de Vinilideno) (PVDF) e negro de fumo (NF), visando à aplicação em blindagem eletromagnética. Para isso, serão realizadas misturas no estado fundido nas proporções de PVDF/NF de 90/10, 85/15 e 80/20, com o propósito de caracterizar e avaliar a influência da composição nas propriedades térmicas, estruturais, morfológicas, reológicas, elétricas e eletromagnéticas desses compósitos. Além disso, serão analisadas as respostas eletromagnéticas dos materiais nas faixas de frequência de 8 a 12 GHz (Banda X) e de 12 a 18 GHz (Banda Ku), considerando espessuras de 1mm e 3mm.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS E NANOCOMPÓSITOS

Na metade do século XX, surgiu uma nova classe de materiais, conhecidos como materiais compósitos, os quais se caracterizam pela combinação de dois ou mais materiais distintos durante o processo de fabricação, visando à obtenção de propriedades superiores e diferenciadas, que não são apresentadas pelos materiais convencionais quando utilizados de forma isolada (Callister *et al*., 2000, Fionov *et al*.,2022). Desde então, engenheiros e cientistas têm unido, de forma engenhosa, metais, cerâmicos e polímeros para desenvolver materiais com desempenho superior, buscando melhores combinações de propriedades mecânicas, como rigidez, tenacidade e resistências às condições do ambiente adversas e a altas temperaturas (Callister *et al*., 2000).

Nesse sentido, os compósitos são constituídos pela combinação de dois ou mais diferentes materiais, gerando propriedades superiores, às dos componentes separados (Zarbin *et al*., 2007; Marinucci, 2011). Os compósitos são materiais organizados em duas fases principais, denominadas de matriz e elemento de reforço, sendo a matriz, que pode ser cerâmica, metálica ou polimérica, correspondente à fase contínua do material e responsável por envolver e manter os elementos de reforço em suas posições relativas, garantindo a coesão estrutural do compósito. Além disso, a matriz desempenha funções fundamentais para o desempenho do material, atuando na união dos elementos de reforço, na transferência e distribuição das cargas aplicadas e na proteção contra danos mecânicos e ambientais (Almeida, 2012; Chawla, 2012). Quando se trata dos materiais compósitos poliméricos, a matriz polimérica separa-se em dois grandes grupos que são os termoplásticos e os termorrígidos (Marinucci, 2011).

No caso das matrizes termoplásticas, quando submetidas ao aquecimento, permitem atingir temperaturas elevadas, necessárias para quebrar as ligações químicas entre átomos ou moléculas. Com isso, possibilitam a moldagem de peças e produtos com formatos variados. Entretanto, quando submetidas ao resfriamento, as ligações secundárias são reabilitadas entre as cadeias a um certo nível de energia, e os termoplásticos voltam a ser sólidos. Um processo reversível (é a capacidade de

derreter e solidificar repetidamente sem alterar sua estrutura química, permitindo remoldagem e reciclagem) (Marinucci, 2011; Lee *et al*., 2024). Já as matrizes termorrígidas apresentam ligações primárias fortes entre as cadeias e sofrem uma transformação química irreversível (processo de cura), com a formação de ligações cruzadas entre as cadeias, tornando-se rígidas. Uma vez curada, um novo aquecimento provoca a degradação do material, não permitindo sua remodelagem, processo irreversível (Marinucci, 2011; Lee *et al*.,2024).

A fase reforço (fase dispersa) ou carga se encontra dispersa na matriz e possui funções como: aumentar a resistência, rigidez e outras propriedades mecânicas. Dentre os materiais de reforço fibrosos mais comuns, têm-se as fibras de vidro, aramida e carbono, os quais são incorporados à matriz para melhorar o desempenho do compósito em aplicações específicas, como alta resistência, elevada rigidez e baixa densidade. Além disso, a fase dispersa desempenha a função de promover propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas no material compósito (Scwartz *et al*., 1997; Chawla, 2012).

Os Materiais compósitos (Figura 1) são utilizados no cotidiano em diversas aplicações, tais como: transporte, construção civil, indústria, aeronáutica, eletrônica e materiais esportivos.

Figura 1- Exemplos de materiais desenvolvidos a partir de compósitos poliméricos.



Fonte: Adaptado de Gibson, 2016.

Já os materiais nanocompósitos poliméricos são formados por meio de uma matriz polimérica (fase contínua) e uma fase dispersa (não contínua) que apresenta pelo menos uma de suas dimensões na escala nanométrica. Dentre as fases dispersas são utilizados materiais como nanotubos de carbono, argilas, nanopartículas de prata, óxidos metálicos, dentre outros (Martins *et al.*,2022; Mignoni, 2008).

Os nanocompósitos poliméricos destacam-se por apresentarem melhorias significativas nas propriedades térmicas, mecânicas e elétricas em comparação com os polímeros convencionais. A adição de nanopartículas, como grafeno, nanotubos de carbono, promove a formação de uma rede condutiva que eleva a condutividade térmica e elétrica, aspecto fundamental para aplicações em armazenamento e conversão de energia. Além disso, esses nanocompósitos exibem maior resistência, rigidez e tenacidade, mantendo a leveza característica dos polímeros, bem como alta estabilidade química, resistência à corrosão e facilidade de processamento por técnicas industriais como extrusão e moldagem por injeção. (Lee *et al*., 2024).

A incorporação destas nanopartículas permite explorar as suas características únicas, ampliando a área de interface e intensificando as interações com a matriz polimérica. Como resultado, os nanocompósitos apresentam propriedades superiores e maior desempenho funcional, tornando-se materiais versáteis e promissores para aplicações em eletrônica, energia e engenharia de materiais (Callister *et al.*, 2000; Lee *et al*. 2024).

2.2. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS CONDUTORES

Os compósitos condutores são formados por uma matriz polimérica isolante, na qual são misturadas partículas de aditivos condutores (como negro de fumo, nanotubos de carbono ou partículas metálicas), que constituem a fase dispersa (Arenhart, 2012, Alzahrani *et al.*, 2024). Esses materiais terão a característica de conduzir eletricidade diferentemente dos compósitos tradicionais, os quais apresentam baixa ou nenhuma condutividade elétrica (Chawla, 2012).

Embora os compósitos tradicionais ainda sejam relevantes para aplicações estruturais, os compósitos e/ou nanocompósitos condutores destacam-se como uma

solução promissora para áreas que exigem propriedades adicionais, como condutividade elétrica, elevada leveza e desempenho multifuncional (Chawla, 2012).

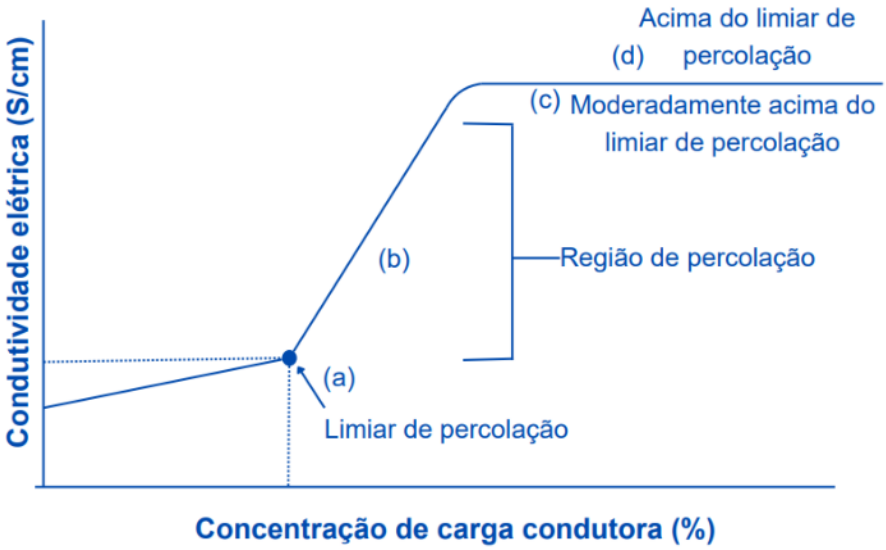
Os compósitos condutores permitem combinar a fácil processabilidade e as boas propriedades mecânicas dos polímeros isolantes com as propriedades elétricas dos materiais condutores, resultando em materiais multifuncionais com desempenho aprimorado e ampla aplicação em diferentes áreas tecnológicas (Arenhart, 2012).

Segundo Chawla, (2012), a definição e o conceito de compósitos condutores podem ser entendidos da seguinte forma: compósitos condutores são materiais compostos cujas propriedades elétricas foram modificadas para permitir a condução de corrente elétrica. A modificação da condutividade elétrica de polímeros isolantes pode ser alcançada com a incorporação de materiais condutores por meio de mistura física. Essa técnica amplia as aplicações tecnológicas dos polímeros, permitindo a criação de compósitos condutores. As propriedades desses materiais vão depender de diversos fatores, como a composição e quantidade dos componentes, a dispersão, a interação entre o polímero e o aditivo, e as condições de processamento. Além disso, o tamanho, formato, área superficial e a distribuição das partículas condutoras dentro da matriz polimérica influenciam diretamente o desempenho final do compósito, sendo a concentração e a compatibilidade entre as fases cruciais para a eficiência do material (Dias, 2014, Alzahrani *et al.*, 2024).

2.2.1. Limiar de Percolação Elétrica

O conceito de Limiar de percolação elétrica em compósitos condutores corresponde à concentração crítica de cargas condutivas adicionadas à matriz isolante, a partir da qual o compósito passa a conduzir eletricidade, apresentando um crescimento abrupto na condutividade, como ilustrado na Figura 2 (Kuester, 2013).

Figura 2- Condutividade elétrica em relação à porcentagem da concentração de carga em uma matriz isolante



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 2 apresenta as diferentes regiões de uma rede condutora distribuída no interior de uma matriz polimérica, conforme a concentração do material condutor (Kuester, 2013; Dias, 2014):

(a) no limiar de percolação,

(b) ligeiramente acima do limiar de percolação,

(c) moderadamente acima do limiar, e

(d) significativamente acima do limiar de percolação.

Uma explicação detalhada das fases de formação da rede condutora em um compósito, baseada na concentração de cargas condutoras (Kuester, 2013; Dias, 2014):

a) Para concentração abaixo do limiar de percolação, a condutividade do compósito é basicamente igual à do polímero isolante, já que as partículas do aditivo estão dispersas na matriz.

b) À medida que a quantidade de carga aumenta, forma-se uma rede condutiva interligada dentro da matriz polimérica.

c) No limiar de percolação (região a), as partículas condutoras dispersas na matriz isolante permitem a passagem de corrente elétrica devido à formação de uma rede condutora.
d) Um pouco acima do limiar de percolação, a condutividade tende a crescer drasticamente com a incorporação do aditivo na matriz polimérica (região b) devido ao aumento do número de contato da fase condutora, começa a surgir pequenos caminhos condutores, a estrutura da rede condutora está em expansão.
e) Acima do limiar de percolação (região c), a condutividade é maior e estável; com isso a maioria das partículas condutoras está conectada entre si, formando uma rede condutora estável e interconectada por toda a matriz. O compósito já se comporta como um material condutor funcional.
f) Muito acima do limiar de percolação (região d), a matriz contém altas concentrações de aditivo condutor, bem acima do limiar de percolação. A rede condutora encontra-se totalmente formada, e a condutividade elétrica aproxima-se da condutividade intrínseca do material condutor. Adições extras de cargas têm pouco efeito na condutividade, pois o sistema já atingiu a saturação condutiva. Além disso, pode haver perda de propriedades mecânicas ou aumento de custo, sem ganho significativo no desempenho elétrico.

2.3. BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

A blindagem eletromagnética consiste na atenuação ou bloqueio da propagação de ondas eletromagnéticas por meio de materiais capazes de refletir ou absorver essa radiação. A crescente utilização de dispositivos eletrônicos e sistemas de comunicação tem aumentado a preocupação com a interferência eletromagnética (EMI), fenômeno que pode comprometer o desempenho e a segurança de equipamentos eletrônicos, essas preocupações vão desde a área civil à militar. Para minimizar esses efeitos, materiais com capacidade de blindagem eletromagnética são empregados, atuando na reflexão, absorção e múltiplas reflexões internas das ondas eletromagnéticas incidentes. Tradicionalmente, metais como cobre e alumínio são

utilizados devido à sua elevada condutividade elétrica; entretanto, apresentam desvantagens como alto peso, corrosão e baixa flexibilidade, o que limita suas aplicações em dispositivos eletrônicos modernos e materiais estruturais leves. O estudo envolvendo compósitos poliméricos condutores aplicados à blindagem eletromagnética é de grande interesse, pois possuem características de baixa densidade e processabilidade. (WANG *et al.,* 2022). A eficiência de blindagem eletromagnética (EMI SE) desses materiais depende do tipo e concentração da carga, método de processamento, espessura da amostra e interação interfacial entre matriz e carga (FAEZ *et al*., 2000).

A espessura do material é um fator determinante para o desempenho da blindagem eletromagnética, uma vez que influencia diretamente a interação das ondas eletromagnéticas com a estrutura do compósito. O aumento da espessura promove maior atenuação da radiação incidente devido ao aumento do caminho percorrido pelas ondas no interior do material, favorecendo os mecanismos de absorção, reflexão interna e dissipação de energia. Dessa forma, a utilização de diferentes espessuras permite avaliar a relação entre eficiência de blindagem, peso, flexibilidade e custo do material, permitindo a seleção da configuração mais adequada para cada aplicação (GHOSH *et al*., 2023).

De acordo com Yang *et al*. (2022), a eficiência de blindagem eletromagnética também está relacionada à espessura do material, uma vez que a contribuição da absorção aumenta com o comprimento do percurso percorrido pela onda eletromagnética no interior do compósito. Dessa forma, materiais mais espessos proporcionam um caminho maior para a propagação da radiação incidente, aumentando o tempo de interação da onda eletromagnética com o compósito e favorecendo a conversão de sua energia em outras formas de energia, principalmente calor. Consequentemente, o aumento da espessura tende a elevar a contribuição da absorção e a eficiência total da blindagem eletromagnética.

A influência da espessura na eficiência de blindagem eletromagnética tem sido amplamente relatada na literatura. Guo *et al*. (2024) observaram que o aumento da espessura de nanocompósitos de PVDF contendo grafeno carboxilado e nanotubos de carbono de paredes múltiplas carboxilados (ECG/cMWCNTs) resultou em um incremento progressivo da eficácia de blindagem eletromagnética (EMI SE). Os autores avaliaram amostras com espessuras de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mm e

verificaram que os valores de EMI SE (Efetividade de Blindagem contra Interferência Eletromagnética ou Eficiência de Blindagem Eletromagnética) aumentaram continuamente com a espessura, atingindo aproximadamente 66,67 dB para a amostra de 2,0 mm. Esse comportamento foi atribuído ao maior percurso percorrido pelas ondas eletromagnéticas no interior do material, o que favorece os mecanismos de absorção, espalhamento e múltiplas reflexões internas, aumentando a dissipação da energia eletromagnética e, consequentemente, a eficiência de blindagem. (GUO *et al*., 2024).

A espessura do material é um dos parâmetros mais importantes para o desempenho da blindagem eletromagnética, uma vez que influencia diretamente os mecanismos de absorção, reflexão e transmissão das ondas eletromagnéticas. Nesse contexto, Van Loock *et al*. (2025) investigaram compósitos de poli (metil metacrilato) e nanotubos de carbonos (PMMA/CNT) na banda X (8–12 GHz) e verificaram que o aumento da espessura de 0,5 mm para 2,0 mm resultou em um incremento significativo da eficiência de blindagem eletromagnética. Segundo os autores, amostras mais espessas proporcionam um maior tempo de interação entre a radiação incidente e o material, favorecendo os mecanismos de absorção e reduzindo a parcela de energia transmitida (Loock *et al*., 2025).

Os resultados também mostraram que o aumento da espessura promove elevação simultânea da eficiência total de blindagem (SE_t) e da razão entre absorção e reflexão (A/R), indicando que uma fração maior da energia eletromagnética é dissipada no interior do compósito, enquanto uma parcela menor é refletida para o ambiente. Esse comportamento evidencia a predominância dos mecanismos de absorção em materiais com maiores espessuras (Loock *et al*., 2025).

Além disso, os autores destacam a existência de uma espessura crítica associada à profundidade de penetração da onda eletromagnética *(skin depth*), definida como a distância necessária para que a intensidade da radiação seja significativamente atenuada no interior do material, variando entre 0,67 e 0,89 mm para os compósitos avaliados a 10 GHz. Dessa forma, a espessura do compósito deve ser igual ou superior a esse valor crítico para que a blindagem eletromagnética seja efetiva (Loock *et al*., 2025).

Outro aspecto relevante observado por Van Loock et al. (2025) foi a influência da frequência sobre o desempenho da blindagem. De acordo com os autores,

frequências mais elevadas apresentam menor comprimento de onda e, consequentemente, maior interação com o material, favorecendo os mecanismos de atenuação por absorção. Assim, tanto a espessura quanto a frequência de operação desempenham papel fundamental na eficiência da blindagem eletromagnética, contribuindo para uma dissipação mais eficaz da energia das ondas incidentes (Loock *et al*., 2025).

A influência da espessura na eficiência de blindagem eletromagnética tem sido amplamente reportada na literatura. Nesse contexto, Maity (2025), ao revisar os resultados obtidos por Somarajan et al., destaca que a eficácia de blindagem é fortemente dependente da espessura do material. Para avaliar esse efeito, foram produzidas amostras com diferentes espessuras e analisado seu desempenho nas bandas X (8,2–12,4 GHz), Ku (12,4–18 GHz) e K (18–26,5 GHz) (MAYTI *et al*., 2025).

Os resultados demonstraram que o aumento da espessura promoveu uma melhora significativa na eficiência de blindagem eletromagnética, sendo observados valores de aproximadamente 65 dB na banda X e 69,76 dB na banda Ku para compósitos com espessura de 2 mm. Esse comportamento foi atribuído ao maior percurso das ondas eletromagnéticas no interior do material, o que favorece os mecanismos de absorção e aumenta a dissipação da energia incidente (MAYTI *et al*., 2025).

De acordo com os autores, o incremento da espessura proporciona maior interação entre a radiação eletromagnética e a estrutura do compósito, ampliando as perdas por absorção e reduzindo a parcela de energia transmitida. Dessa forma, os resultados evidenciam que o aumento da espessura constitui uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho de blindagem eletromagnética, especialmente em materiais nos quais a absorção é o mecanismo predominante de atenuação (MAYTI *et al*., 2025).

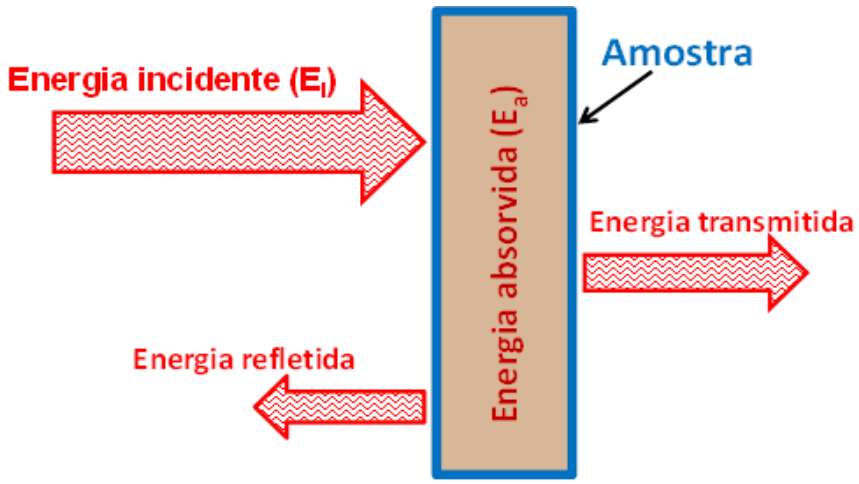
A espessura do material constitui um parâmetro fundamental para a eficiência da blindagem eletromagnética, pois influencia diretamente os mecanismos responsáveis pela atenuação das ondas eletromagnéticas. Nesse contexto, Krishna (2026) destaca que a eficácia da blindagem depende não apenas da formação de uma rede condutiva homogênea, obtida por meio da adequada dispersão do negro de fumo e da engenharia de percolação, mas também da espessura do compósito. Segundo o autor, o aumento da espessura amplia o percurso das ondas eletromagnéticas no

interior do material, favorecendo os processos de absorção e intensificando a dissipação da energia incidente.

Considerando a forte influência desse parâmetro sobre os resultados de blindagem, todas as amostras avaliadas no estudo foram produzidas com espessura constante de 3 mm. Essa estratégia experimental permitiu minimizar os efeitos da espessura e atribuir as variações observadas na eficiência de blindagem exclusivamente às diferenças na concentração de negro de fumo e à formação da rede condutiva no compósito. Dessa forma, o trabalho reforça que a espessura constitui uma variável fundamental no desempenho da blindagem eletromagnética, devendo ser cuidadosamente controlada em estudos que buscam avaliar a influência de outros parâmetros estruturais e composicionais (KRISHNA *et al*.,2026).

A onda eletromagnética incidente no material pode sofrer o processo de reflexão, absorção e transmissão, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3- Apresentação esquemática da incidência da onda eletromagnética e seus mecanismos de interação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Para que o material seja ele dielétrico e/ou magnético atue como atenuador de onda, faz-se necessário que ele seja processado adequadamente, de forma a promover a dissipação de energia em certas faixas de frequências (FAEZ *et al.,* 2000).

A relação entre a energia atenuada em decibéis (dB) e o percentual de energia atenuada (%) indica a eficiência da blindagem eletromagnética. De modo geral, quanto mais negativo for o valor em dB, maior será a atenuação da energia incidente

é a blindagem. Isso significa que o material é capaz de bloquear ou absorver uma fração maior da radiação eletromagnética, reduzindo significativamente a intensidade do sinal transmitido (Faez et al., 2000).

A tabela 1, mostra a relação entre a energia atenuada em decibéis (dB) e o percentual de energia atenuada em porcentagem (%).

Tabela 1- Relação entre atenuação da radiação (SET) e o percentual de energia atenuada.

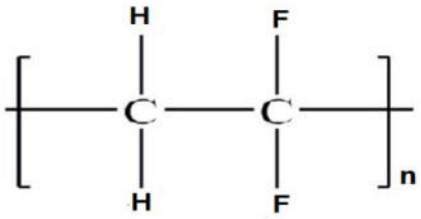
ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO EM (dB)	ENERGIA ATENUADA (%)
0	0
-1	20,57
-3	49,88
-5	68,38
-7	80,05
-10	90,00
-13	94,99
-15	96,84
-18	98,42
-20	99,00
-23	99,50
-25	99,68
-28	99,84
-30	99,90
-32	99,94
-35	99,97
-38	99,98
-40	99,99

Fonte: Adaptado FAEZ *et al.,* 2000

2.4. POLI (FLUORETO DE VINILIDENO) (PVDF)

O poli (Fluoreto de Vinilideno) (PVDF) é um polímero termoplástico que se caracteriza por sua estrutura semicristalina, apresentando graus de cristalinidade que podem variar de 35% a 70%, dependendo do método de preparação, seja térmico ou mecânico. A tenacidade, a resistência mecânica e a resistência ao impacto estão diretamente relacionadas ao grau de cristalinidade, que afeta significativamente esses parâmetros (Drobny, 2009). A Figura 4 apresenta a unidade repetitiva do PVDF.

Figura 4- Fórmula estrutural da unidade repetitiva do PVDF.



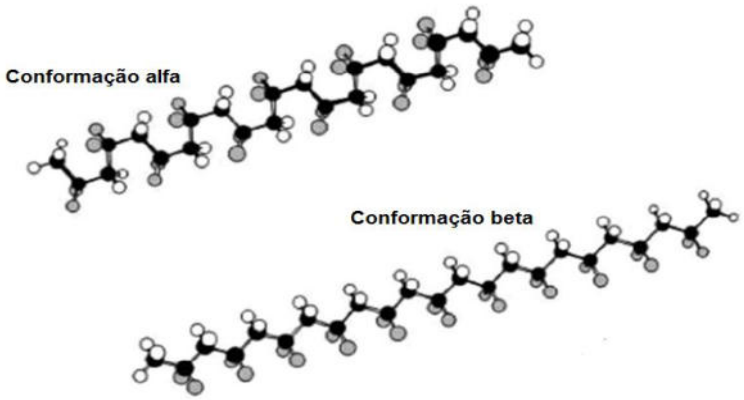
Fonte: Adaptada de Martins, 2013.

Segundo Kaplan (2024), o poli (Fluoreto de Vinilideno) (PVDF) é empregado como matriz polimérica termoplástica para o desenvolvimento de compósitos condutores, especialmente quando combinado com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) e nanopartículas semicondutoras inorgânicas. Essa escolha deve-se às suas características intrínsecas, como boa processabilidade, elevada estabilidade química e a presença de fase cristalina beta (β) responsável pelo comportamento piezoelétrico do material. Assim, o PVDF não apenas serve como suporte estrutural para as cargas condutoras, mas também contribui ativamente para as propriedades dos compósitos, ampliando a sua aplicabilidade em dispositivos.

A massa molar, a distribuição da massa molar, a extensão das irregularidades ao longo da cadeia polimérica e a forma cristalina são fatores fundamentais que influenciam as propriedades do PVDF (Drobny, 2009). O PVDF apresenta quatro formas cristalinas: alfa (α), beta (β), gama (γ) e delta (δ). Devido ao pequeno raio atômico do flúor (F), não há impedimentos estéricos significativos, o que favorece os rearranjos conformacionais das macromoléculas nas diferentes fases cristalinas (Drobny, 2009).

A figura 5 ilustra as estruturas das fases α e β, que são frequentemente observadas neste tipo de polímero. A fase α é a mais comum, enquanto a fase β, também conhecida como fase polar, é especialmente valorizada pelas suas propriedades elétricas distintas. Esta última confere ao material características como a piezoeletricidade, ou seja, a capacidade de gerar uma resposta elétrica sob aplicação de uma força externa, ou vice-versa. Além da piezoeletricidade, outras propriedades relevantes, como a piroeletricidade e a ferroeletricidade, têm sido amplamente estudadas, dada a sua importância tecnológica (Ameduri, 2009; Dillon, 2006; Fukada, 2000).

Figura 5- Principais estruturas polimórficas de PVDF, onde as esferas preto, branco e cinza representam carbono, hidrogênio e átomos de flúor, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Ameduri, 2009.

O PVDF apresenta excelentes propriedades mecânicas, longa vida útil e elevada resistência à fadiga. A adição de aditivos, como fibras de vidro e esferas de vidros e fibras de carbono, contribui para o aumento da resistência do polímero (Drobny, 2009). Além disso, é amplamente utilizado no manuseio de fluidos, na forma de tubos sólidos, na indústria química, na fabricação de semicondutores e como isolante em fios de conexão de computadores nas indústrias elétricas e eletrônicas, em áreas de captação de energia, sensores de deformação e biomateriais (músculos artificiais) (Drobny, 2009; Kaplan *et al.*,2024).

2.5. NEGRO DE FUMO (NF) CONDUTOR *(CARBON BLACK- CB-sigla em inglês)*

O negro de fumo é produzido principalmente de hidrocarbonetos, sob baixa presença de oxigênio. O negro de fumo condutor, conhecido simplesmente como

negro de fumo, é um material com estrutura parcialmente cristalina formado por carbono amorfo. Consiste em um pó preto extremamente fino, composto por partículas esféricas, seus agregados e aglomerados (Donnet *et al*., 1993; Ferreira, 2022).

Segundo Levy e colaboradores (2012), o negro de fumo é constituído por partículas primárias que se fundem em agregados, os quais, por sua vez, se agrupam em aglomerados, configurando a forma típica sob a qual o material é encontrado comercialmente. Levy (2012) descreve que as partículas primárias apresentam dimensões entre 10 e 500 nm, os aglomerados entre 85 e 500 nm e os agregados entre 1 e 100 micrômetros.

Cerca de 70% de todo o negro de fumo produzido mundialmente é utilizado como aditivo na fabricação de borracha para pneus. Esse material contribui para a pigmentação, reforço mecânico e condução térmica, aumentando significativamente a durabilidade dos pneus. Estima-se que entre 30% e 35% da massa total de um pneu seja composta por negro de fumo (Zarbin *et al*., 2019). Além dos pneus, as aplicações atuais incluem seu uso em tinta de impressora, reforços para borracha, agente ativo em plásticos eletricamente condutor e pigmentos em tintas, plásticos de engenharia, entre outros (Zarbin *et al*., 2019).

Ghosh *et al*. (2023) estudaram compósitos de poliestireno/etileno-co-metil crilato (PS/EMA) contendo negro de fumo, em combinação com nanotubos de carbono funcionalizados (f-CNT) ou nanofibras de carbono funcionalizadas (f-CNF). Os autores observaram que a incorporação dos materiais carbonáceos favoreceu a formação de uma rede condutiva interconectada na matriz polimérica, contribuindo para o aumento da condutividade elétrica e da eficiência de blindagem eletromagnética. O estudo utilizou 15% em massa de negro de fumo como concentração de referência, sendo observada formação de uma rede condutiva associada ao limiar de percolação do sistema. Em relação à blindagem eletromagnética, o compósito PS/EMA contendo negro de fumo apresentou eficiência de blindagem de aproximadamente -22,5 dB. Com a combinação do negro de fumo com f-CNT e f-CNF, os valores de eficiência de blindagem aumentaram para aproximadamente -31 dB e -32,5 dB, respectivamente. Esses resultados demonstram a contribuição do negro de fumo para a formação da rede condutiva e para o desempenho eletromagnético dos compósitos, além de evidenciarem o efeito da associação entre diferentes cargas carbonáceas. Os autores

concluíram que a preparação de compósitos elastoméricos termoplásticos apresentou grande potencial para aplicações em dispositivos eletrônicos vestíveis e como materiais de interface térmica para gerenciamento de calor.

Jia et al. (2021) estudaram compósitos de PVDF contendo negro de fumo, obtidos na forma de espumas microcelulares. Os autores observaram que o aumento do teor de negro de fumo favoreceu a formação condutiva e elevou a concentração elétrica, sendo identificado um limiar de percolação de aproximadamente 1,5% em massa. O aumento do teor da carga de negro de fumo (0,1%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2% em massa) promoveu o aumento da eficiência de blindagem eletromagnética, demonstrando a contribuição dessa carga para as propriedades elétricas e eletromagnéticas dos compósitos de PVDF. Além disso, os autores mencionaram que partículas de CB foram selecionadas como cargas condutoras devido ao seu baixo custo, alta estabilidade química e boa processabilidade.

Vidakis *et al*. (2023) investigaram compósitos de polietileno de alta densidade (PEAD) contendo negro de fumo (NF), com diferentes concentrações de carga (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 16%, 20% e 24%), visando avaliar sua influência nas propriedades elétricas, térmicas, reológicas, morfológicas e mecânicas. Os autores observaram que o aumento do teor de NF promoveu o aumento da viscosidade dos compósitos, acompanhado pela redução do índice de fluidez, além de favorecer o incremento da condutividade elétrica. Os compósitos apresentaram comportamento pseudoplástico, caracterizando pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, enquanto a maior concentração de NF resultou em maiores valores de viscosidade e tensão. Esses resultados demonstram a influência da incorporação do negro de fumo na resposta elétrica e no comportamento reológico de matrizes poliméricas, evidenciando seu potencial para o desenvolvimento de compósitos condutores. Os autores concluíram que os compósitos PEAD/CB apresentaram grande potencial para aplicações em sensores condutivos, dispositivos eletrotérmicos ativos e componentes funcionais fabricados por manufatura aditiva, consolidando sua relevância tecnológica para setores automotivos e eletrônicos.

2.6. COMPÓSITOS CONDUTORES: APLICAÇÕES

Tabela 2- Estudos sobre compósitos Condutores à base de PVDF e outros Polímeros.

Autores	**Kaplan *et al*. (2024)**	**Jia *et al.* (2021)**
Objetivo do estudo	Investigar as propriedades piezoresistivas de compósitos de PVDF para aplicação em sensores.	Investigar a condutividade elétrica, eficiência de blindagem eletromagnética e a estrutura microcelular.
Matriz polimérica	Poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF)	Poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF) microcelular
Cargas condutoras	Nanotubos de carbono de múltiplas camadas (MWCNTs) e nanopartículas de semicondutores inorgânicos.	Negro de fumo (CB) e nanoplaquetas de grafeno (GNP).
Método de processamento	Mistura por fusão em uma etapa usando microcompositor de dupla rosca (Xplore, Holanda) – 210 °C, 200 rpm, 10 min.	Extrusão em dupla rosca (180–200 °C), seguida de espumação com CO_2 supercrítico.
Moldagem	Prensa a quente (Modelo PW40EH, Alemanha) a 210 °C.	Formação de esferas microcelulares espumadas.
Técnicas de caracterização	MEV, DRX, FTIR, Raman, ensaios mecânicos (tração e impacto), DSC e TGA.	MEV, MET, DRX, DSC, densidade, isolamento térmico e condutividade elétrica.
Resultados principais	Compósitos apresentaram boa piezoresistivo.	Compósitos de PVDF microcelular com negro de fumo ou grafeno formaram canais condutores.
Condutividade elétrica	Melhorada pela combinação de MWCNTs e nanopartículas semicondutoras.	O compósito GNP/PVDF apresentou condutividade superior ao CB/PVDF.
Eficiência de blindagem eletromagnética	Não mencionada diretamente	Absorção até 50 dB
Aplicações potenciais	Sensores piezoresistivos e dispositivos de monitoramento de deformação.	Isolamento leve, blindagem eletromagnética, dispositivos portáteis e flexíveis.
Conclusão dos autores	O compósito demonstrou excelente resposta piezoresistiva, adequado para sensores de deformação.	A condutividade elétrica é o fator-chave na blindagem EMI; o grafeno (GNP) foi mais eficaz que o negro de fumo (CB).

Autores	Wang *et al.* (2022)	Lee *et al.* (2024)
Objetivo do estudo	Estudar blindagem eletromagnética de PVDF com CNTs e GNPs	Avaliar propriedades triboelétricas de nanofibras PVDF-HFP com grafeno.
Matriz polimérica	Poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF)	Poli (fluoreto de vinilideno-co-hexafluoropropileno) (PVDF-HFP).
Cargas condutoras	Nanotubos de carbono (CNTs) e nanoplaquetas de grafeno (GNPs).	Grafeno em diferentes percentuais (0,5%, 5%, 15%, 25%).
Método de processamento	Mistura no misturador interno HAAKE a 200 °C, 60 rpm, 15 min.	Eletrofiação em temperatura ambiente.
Caracterizações realizadas	MEV, DSC, análises reológicas, condutividade elétrica e eficiência de blindagem (EMI SE).	FESEM, DRX, tensiômetro, eletrômetro, osciloscópio.
Principais resultados	Excelente dispersão das cargas na matriz e formação de rede condutiva estável.	Melhoria das propriedades triboelétricas das nanofibras de PVDF-HFP/grafeno.
Condutividade elétrica	Alta condutividade	Aumento da condutividade elétrica
Eficiência de blindagem eletromagnética	46,4 dB (superior ao PVDF puro)	Não mencionada
Aplicações potenciais	Dispositivos eletrônicos, sensores, blindagem militar e comercial.	Geradores triboelétricos e dispositivos autossustentáveis de energia.
Conclusão dos autores	Método simples, escalável e reprodutível; compósitos com alta condutividade e eficiência de blindagem.	Materiais promissores para captação e geração de energia em pequena e grande escala.

Autores	Vidakis *et al*. (2023)	Li *et al.* (2023)
Objetivo do estudo	Investigar compósitos de PEAD com negro de fumo (CB) para manufatura aditiva.	Analisar morfologia e propriedades físicas de compósitos PEAD/PEC/CB.
Composição dos compósitos	PEAD + negro de fumo (CB) em teores de 2% a 24% em peso.	Misturas PEAD/PEC (80/20) + negro de fumo (CB) em 1%, 2%, 5% e 10% em peso.
Método de preparação	Mistura em laboratório de alta potência, extrusão dupla e fabricação de filamentos por FFF (manufatura aditiva 3D).	Mistura por fusão em misturador interno (160 °C, 60 rpm), seguida de prensagem a quente (180 °C, 10 MPa, 3 min).
Técnicas de caracterização	Ensaios mecânicos, DSC, TGA, reologia, MEV, EDS, condutividade elétrica e desempenho eletrotérmico.	Reologia, MEV, resistividade superficial, DSC, DMA, tração e impacto Izod entalhado.
Resultados principais	Compósitos PEAD/CB exibiram alta condutividade e bom desempenho eletrotérmico; propriedades mecânicas adequadas para manufatura aditiva.	A incorporação de CB melhorou a condutividade e resistência mecânica, equilibrando tenacidade e fragilidade nas misturas PEAD/PEC.
Desempenho máximo	Melhor desempenho com teores intermediários de CB (~16–20%), adequando condutividade e resistência para aplicações funcionais.	Melhoria significativa de condutividade e estabilidade com 10% em peso de CB.
Aplicações potenciais	Sensores condutivos, dispositivos eletrotermais, componentes automotivos e eletrônicos produzidos por manufatura aditiva.	Equipamentos eletrônicos complexos e de precisão, onde se requer equilíbrio entre condutividade e resistência mecânica.
Conclusão geral	Compósitos de PEAD/CB são promissores para manufatura aditiva, com alta versatilidade e desempenho eletrotérmico.	Compósitos de PEAD/PEC/CB proporcionam materiais com boas propriedades elétricas e mecânicas.

Autores	Mei *et al*. (2019)	Kaharmoudi *et al*. (2024)
Objetivo do estudo	Desenvolver filme ultrafino de carbono/PVDF/grafeno com elevada condutividade e eficiência de blindagem eletromagnética (EMI).	Avaliar o efeito do grafeno nas propriedades mecânicas de materiais reciclados de PEAD e PEAD de alta massa molar.
Composição dos compósitos	PVDF + nanoplaquetas de grafeno (GE) + fibras de carbono (CF) + fibras bicomponentes de PP/PE (ESFs).	Mistura de recHDPE + recHMWPE + grafeno (0,5% e 1% em peso).
Método de preparação	Fundição em solvente seguida de prensagem a quente (200 °C, 12 MPa).	Extrusão em extrusora dupla-rosca co-rotativa (1200 rpm, 190–210 °C).
Técnicas de caracterização	MEV, MET, condutividade elétrica, EMI-SE, condutividade térmica, propriedades mecânicas.	DSC, análise reológica e testes mecânicos (tração, flexão, fluência).
Resultados principais	Filmes CEF-NF/GE/PVDF apresentaram 31,1 S/cm (40% GE) e EMI-SE de 48,5 dB (0,188 mm), alta flexibilidade e leveza.	A adição de 1% de grafeno melhorou significativamente propriedades mecânicas e resistência à fluência.
Desempenho máximo	Eficiência de blindagem até 48,5 dB e resistência à tração de até 64,81 MPa.	Melhor desempenho com 1% de grafeno.
Aplicações potenciais	Eletrônicos portáteis, dispositivos sem fio, aplicações aeroespaciais e gestão térmica.	Tubos de drenagem de água pluvial e componentes de engenharia de alto desempenho com plásticos reciclados.
Conclusão geral	Processo simples e econômico, filmes leves e eficientes em EMI, viáveis para produção em escala.	Incorporação de grafeno aumenta desempenho de materiais reciclados, promovendo sustentabilidade e resistência mecânica.

Autores	**Yang *et al.* (2022)**	**Simunec *et al.* (2023)**
Objetivo do estudo	Desenvolver filmes compósitos de PVDF com propriedades de blindagem contra interferência eletromagnética (EMI).	Desenvolver sensores elétricos piezoelétricos impressos em 3D à base de PVDF/TPU com aditivos condutores e cerâmicos.
Composição dos compósitos	PVDF + nanotubos de carbono (NTC) + grafeno (G) + cadeias de NiCo.	PVDF + $BaTiO_3$ ± TPPC combinado com TPU + negro de fumo (CB).
Método de preparação	Mistura em solução e moldagem por compressão.	Extrusão de filamentos por FFF (Fabricação por Filamento Fundido) / FDM, seguido de impressão 3D.
Temperaturas de processamento	Não especificadas.	Zonas de aquecimento: 20–220 °C; bico de extrusão a 230 °C; velocidade: 160 rpm.
Técnicas de caracterização	Condutividade elétrica; Eficiência de blindagem EMI.	FTIR, DRX, DSC, TGA, FESEM, EDS.
Resultados principais	A condutividade elétrica e a eficiência de blindagem EMI aumentaram com o teor de NiCo.	O TPPC favoreceu a formação da fase β do PVDF e melhorou a resposta elétrica dos sensores.
Desempenho máximo	Eficiência de blindagem ≈ 63,3 dB para PVDF-CNT-G-NiCo.	Alta estabilidade e sensibilidade elétrica em sensores.
Aplicações potenciais	Blindagem contra interferência eletromagnética.	Sensores de deformação e pressão, eletrônicos flexíveis, monitoramento biomédico e estrutural.
Conclusão geral	Materiais condutores e protetores.	Fabricação de sensores de deformação pra monitoramento estrutural.

Autores	Li *et al*., (2023)	Ghosh *et at*., (2023)
Objetivo do Estudo	Avaliar a morfologia, propriedades físicas e condutividade elétrica de compósitos PEAD/PEC/CB.	Investigar o efeito de cargas híbridas em compósitos PS/EMA na condutividade e blindagem EMI.
Matriz Polimérica	Mistura binária de Polietileno de Alta densidade (PEAD) e copolímero propileno-etileno (PEC).	Mistura binária de Poliestireno (PS) e etileno-co-metil acrilato (EMA).
Tipo de carga	Negro de fumo	Negro de fumo condutivo (VCB) + nanotubos de carbono funcionalizados (f-CNT) +nanofibras de carbono funcionalizadas (f-CNF).
Método de Processamento	Mistura em misturador interno (160 ^{0}C,60 rpm) ⟶adição do CB⟶prensagem a quente (180 ^{0}C, 10 MPa, 3 min).	Mistura em solução com tolueno⟶evaporação⟶prensagem a quente (200 ^{0}C, 5 MPa, 4 min).
Teor de Carga	1,2,5 E 10% em peso de CB.	Total fixo de 15% em peso (proporções variáveis de VCB/f-CNT e VCB/f-CNF).
Técnicas de Caracterizações	Reologia, MEV, resistividade superficial, DSC, DMA, tração, impacto Izod.	FTIR, DRX, XPS, SEM, TEM, FESEM, Raman, condutividade DC/AC, condutividade térmica, EMI.
Principais Resultados	A adição de CB melhora a condutividade elétrica e térmica, mantendo bom equilíbrio entre tenacidade e rigidez.	A hibridização (CB + nanocargas funcionalizadas) aumenta a condutividade elétrica, térmica e a blindagem EMI por dupla percolação.
Conclusão Geral	Compósitos PEAD/PEC/CB combinam propriedades mecânicas e condutividade, úteis em componentes eletrônicos.	Compósitos PS/EMA com cargas híbridas têm elevado desempenho para a blindagem EMI

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 3- Comparação de estudos sobre compósitos poliméricos com cargas híbridas de grafeno (ou rGO- óxido de grafeno reduzido) e negro de fumo (CB).

Autores	**Ali *et al*. (2024)**	**Tang *et al.* (2019)**
Tipo de estudo	Revisão comparativa	Estudo experimental
Matriz polimérica	Elastômeros e termoplásticos.	Matriz polimérica estrutural.
Cargas utilizadas	Grafeno + Negro de fumo	Negro de fumo + rGO
Função das cargas	Redes híbridas sinérgicas.	Redes condutoras locais.
Procedimento experimental	Melt mixing e roll milling.	Hummers modificado, ultrassom, redução química.
Teor de carga	Variável	5–8 % em massa.
Espessura	Não especificada	2,2–3,4 mm
Faixa de frequência	—	2–18 GHz
Caracterizações	SEM, TEM, propriedades mecânicas e elétricas.	SEM, TEM, XPS, VNA, RL.
Principais resultados	Melhoria mecânica, térmica e elétrica.	Absorção até −47,5 dB.
Aplicações	Sensores, EMI, eletrônica flexível.	Blindagem EMI, aeroespacial.

Autores	**Zachariah *et al*. (2022)**	**Roy *et al*. (2021)**
Tipo de estudo	Estudo experimental sobre blindagem eletromagnética em compósitos espumados.	Estudo experimental sobre nanofiller híbrido multifuncional.
Matriz polimérica	Matriz elastomérica à base de borracha.	Látex de borracha estireno-butadieno (SBR)
Cargas utilizadas	Negro de fumo (CB) e nanoplaquetas de grafeno (GNP).	Grafeno intercalado com negro de fumo (CB–GN).
Proporção das cargas	Sistema híbrido CB/GNP (proporção não especificada).	CB:grafeno = 1:1 (em massa); teor final de 10 phr.
Função das cargas	Formação de caminhos condutores eficientes nas paredes celulares da espuma.	CB atua como espaçador, evitando o empilhamento do grafeno.
Procedimento experimental	Incorporação das cargas híbridas em matriz de borracha e obtenção de compósitos espumados.	Síntese eletroquímica do híbrido, incorporação ao látex SBR, coagulação e vulcanização.
Caracterizações	SEM e medições de eficiência de blindagem eletromagnética (SE).	DRX, Raman, FTIR, FESEM, TEM, AFM, VC, EIS, VSM e propriedades mecânicas.
Principais resultados	Eficiência de blindagem de 32 dB a 9 GHz, superior aos sistemas monofásicos.	Melhorias mecânicas (+34% resistência; +72% módulo) e multifuncionalidade.
Conclusões	A sinergia CB/GNP promove redes condutoras eficientes e maior blindagem EMI.	A rota eletroquímica gera nanocompósitos SBR de alto desempenho.
Aplicações	Blindagem eletromagnética e materiais elastoméricos espumados funcionais.	Eletrônica flexível, supercapacitores, sensores, pneus inteligentes.

Autores	**Guo *et al.* (2020)**	**Wang *et al.* (2018)**
Objetivo	Avaliar o efeito de GO e CNT em compósitos CB/NR com foco em fadiga e durabilidade.	Desenvolver compósitos híbridos grafeno/CB em NR com melhoria mecânica e dinâmica.
Matriz polimérica	Borracha natural (NR) – 100 phr	Borracha natural (NR) em forma de látex.
Cargas utilizadas	Negro de fumo (CB N330), óxido de grafeno (GO) e nanotubos de carbono (CNT).	Negro de fumo (CB) e grafeno.
Proporção das cargas	CB: 37 phr (≈37%), GO: 3%, CNT: 3%.	CB: 50 phr (≈33%), grafeno adicionados em baixos teores entre 0,1 e 1,0 phr.
Função das cargas	CB como reforço principal; GO e CNT para efeito sinérgico e resistência à fadiga.	CB como reforço convencional; grafeno como reforço nanométrico.
Procedimento experimental	Mistura em látex e mistura mecânica, coagulação, secagem e vulcanização.	Mistura em meio húmido e em látex, seguida de vulcanização.
Caracterizações realizadas	SEM, TEM, DRX, ensaios dinâmico-mecânicos e de fadiga	SEM, TEM, DMA, ensaios mecânicos e térmicos
Desempenho eletromagnético	Não avaliado	Não avaliado
Principais resultados	Melhor dispersão e menor propagação de trincas, com destaque para GO-CB/NR.	Melhoria significativa das propriedades mecânicas com baixos teores de grafeno.
Conclusões	GO e CNT promovem efeito sinérgico, aumentando durabilidade e resistência.	Sistema híbrido grafeno/CB superior às cargas isoladas.
Aplicações	Pneus, isoladores de vibração e componentes automotivos.	Pneus, correias, mangueiras e vedantes.

Autores	**Sarkawi *et al*. (2017)**	**Anooja *et al.* (2019)**
Objetivo	Investigar o uso do grafeno como carga híbrida em sistemas elastoméricos contendo negro de fumo e sílica.	Desenvolver nanocompósitos poliméricos para aplicações em blindagem eletromagnética (EMI).
Matriz polimérica	Borracha natural (NR) e borracha natural epoxidada (ENR).	Borracha de silicone (PDMS), além de polímeros industriais como PVDF, PE e PU.
Cargas utilizadas	Negro de fumo (CB), sílica e grafeno.	Negro de fumo (CB) e grafeno (rGO).
Proporção das cargas	Grafeno: 3 phr.	CB: 2–20% em massa; rGO: 5% e 15% em massa combinados com CB.
Função das cargas	CB: reforço convencional; grafeno: carga complementar.	CB: carga condutiva e grafeno como carga de alto fator.
Procedimento experimental	Preparação por mistura mecânica convencional.	Mistura em solução com ultrasonicação.
Caracterizações realizadas	Efeito Payne, borracha ligada e ensaios dinâmico-mecânicos (DMA).	Condutividade elétrica, SEM, TEM, DMA, EMI SE e análises térmicas (TGA/DSC).
Desempenho eletromagnético	Não avaliado diretamente.	EMI ≈ 28 dB (≈99,8%)
Principais resultados	A adição de grafeno não promoveu ganhos significativos devido à similaridade química com o CB.	Forte efeito sinérgico rGO/CB com predominância do mecanismo de absorção.
Conclusões	O desempenho do híbrido depende da dispersão e compatibilidade interfacial.	A combinação híbrida rGO/CB reduz o limiar de percolação e melhora a eficiência EMI.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De forma geral, os estudos de Kaplan, Jia, Wang, Lee e outros autores concluem que a incorporação de nanocargas de carbono em polímeros melhora significativamente suas propriedades funcionais, especialmente elétricas, mecânicas e de blindagem eletromagnética. A análise crítica indica que, apesar dos diferentes focos de pesquisa, há uma convergência nos resultados, evidenciando que o desempenho dos compósitos depende fortemente da dispersão adequada das nanocargas na matriz. Assim, esses trabalhos avançam de maneira complementar no desenvolvimento de materiais mais leves e eficientes, mas ainda destacam a necessidade de maior controle de processamento e de análises mais integradas entre estrutura e desempenho.

O trabalho identifica uma lacuna na literatura relacionada ao desenvolvimento de compósitos de PVDF com negro de fumo para a blindagem eletromagnética, especialmente pela falta de estudos com abordagem integrada das propriedades e pela limitação de faixas de concentração nas pesquisas anteriores.

Nesse contexto, a contribuição crucial da dissertação está em apresentar uma análise mais ampla e sistemática desses materiais, investigando compósitos obtidos por mistura no estado fundido. O estudo amplia a faixa de composições avaliadas e realiza uma abordagem conjunta das propriedades elétricas, térmicas, mecânicas e morfológicas, permitindo compreender de forma mais completa a relação entre estrutura e desempenho.

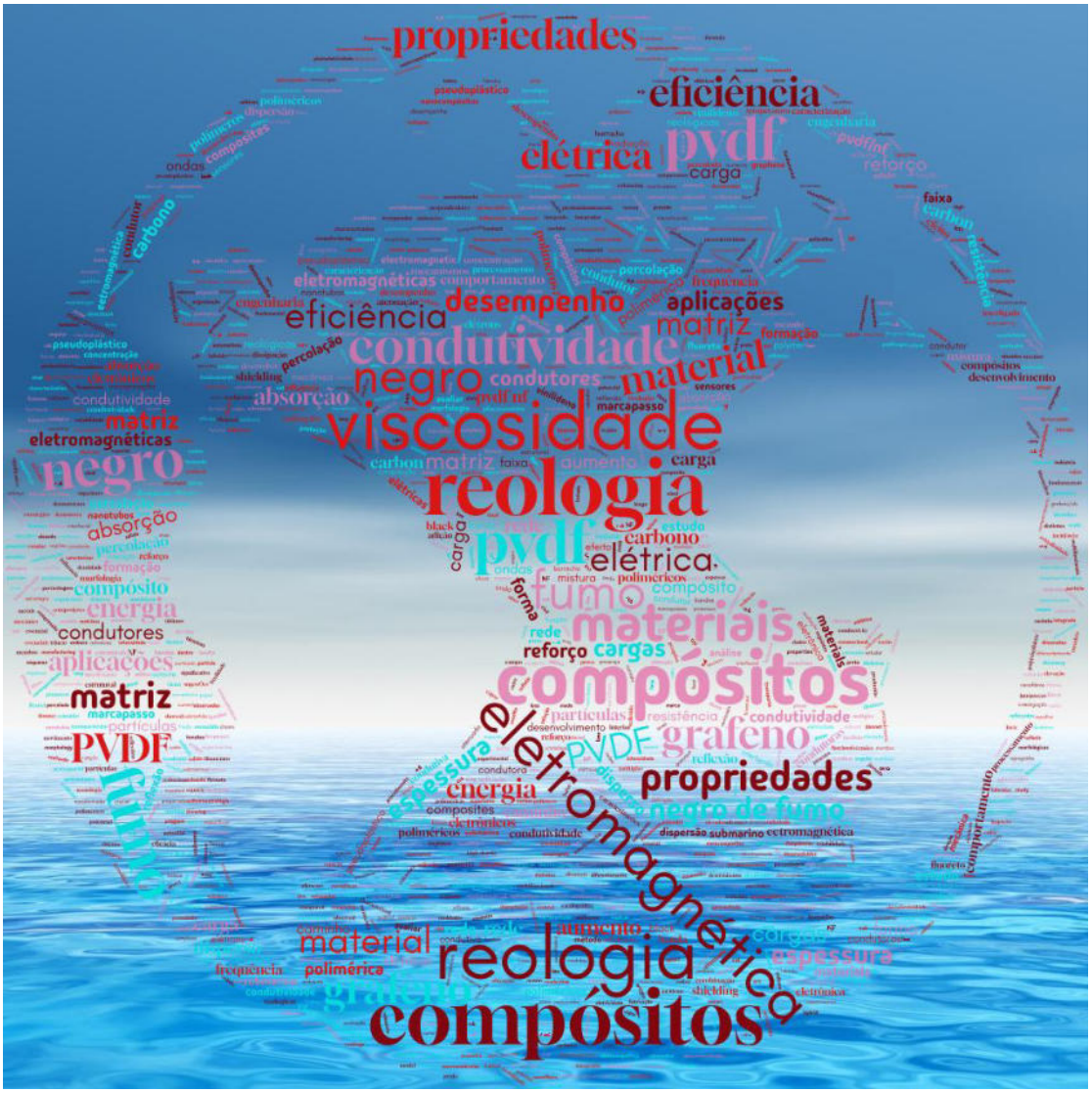
Além disso, o trabalho avança ao considerar condições mais próximas de aplicações reais, como espessura, eficiência de blindagem e desempenho funcional. Assim, o estudo não apenas preenche lacunas existentes, como também fornece uma base mais consistente para o desenvolvimento de materiais voltados à blindagem eletromagnética e à proteção de dispositivos eletrônicos sensíveis.

2.7. NUVEM DE PALAVRAS

A nuvem de palavras (Figura 6) em um estudo bibliométrico é uma representação visual que destaca os termos, títulos ou palavras-chaves mais frequentes em um conjunto de artigos científicos. O destaque para as palavras como: PVDF, negro de fumo, condutividade, blindagem eletromagnética e viscosidade,

evidencia a importância das propriedades reológicas e elétricas na avaliação do desempenho desses materiais.

Figura 6- Nuvem de palavras



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico estão descritos os materiais (reagentes), a metodologia empregada, bem como as caracterizações que serão utilizadas no estudo e nas análises das amostras.

3.1. MATERIAIS

A seguir, são apresentados os materiais empregados na realização dos experimentos desta pesquisa. Foi utilizado o poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF), de marca *Solef* 4138, fornecido pela *Solvay,* e o negro de fumo (NF), de marca CABOTXCR72, fornecido pela *CABOT.*

3.2. EQUIPAMENTOS

A seguir, são apresentados os principais equipamentos utilizados nas análises e na caracterização dos resultados experimentais desta dissertação. Para a caracterização elétrica, foi utilizado o analisador de resposta em frequência e potenciostato, modelo VersaSTAT3. As propriedades eletromagnéticas foram avaliadas utilizando um analisador de rede vetorial (*Vector Network Analyzer* - VNA), modelo E5080B, da *Keysight Technologies*, e um analisador de rede vetorial PNA-L, modelo N5230C, da *Agilent*, equipado com guia de ondas retangular. Para a identificação das estruturas e dos grupos funcionais presentes nos materiais, foi utilizado um espectrofotômetro no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), modelo Nicolet MAGNA IR-760. A caracterização morfológica foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo VEGA II, da TESCAN. O processamento dos compósitos foi realizado em uma microextrusora cônica de dupla rosca, da *Xplore Instruments BV*. Para a determinação da espessura das amostras, utilizou-se um paquímetro digital *Mitutoyo Digimatic Calipe*rs, com resolução de 0,01 mm. As propriedades reológicas dos materiais foram avaliadas em um reômetro de placas paralelas *Discovery HR1,* da *TA Instrument Inc.*

3.3. METODOLOGIA

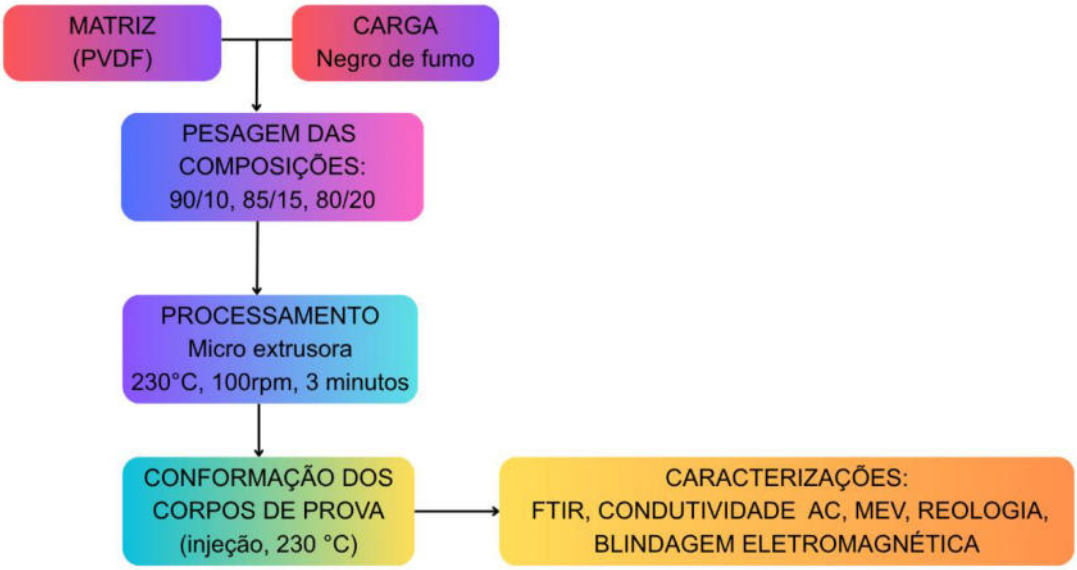
3.3.1. Preparação dos Compósitos

As amostras de PVDF/NF foram processadas em uma micro-extrusora de marca/modelo *Xplore MC15 HT conical twin-screw micro extruder, by Xplore Instruments BV (Netherlands),* com capacidade de 12 gramas. Considerando que a temperatura de fusão do PVDF é aproximadamente 230 ºC, conforme relatado por Soares *et al*. (2016) e Simunec *et al.* (2023), essa temperatura foi adotada como temperatura de processamento na micro-extrusora. O processamento foi realizado a 230 ºC, com rotação de 100 rpm durante três minutos, condições empregadas para promover a fusão e a homogeneização da matriz polimérica com as cargas de negro de fumo (NF).

Foram realizadas as misturas de PVDF/NF nas proporções de PVDF/NF: 90/10; 85/15; 80/20. As proporções foram selecionadas com base em trabalhos anteriores, como Soares et al. (2016). Especificadamente, a concentração de 10% em massa de negro de fumo foi adotada com base em estudos que demonstraram elevada eficiência de blindagem contra interferências eletromagnéticas, como observado pôr em Mei *et al*. (2019). Além disso, concentrações próximas a 10% em massa de negro de fumo também apresentaram aumento da eficiência de blindagem, conforme relatado por Ghosh *et al.* (2023). Após a obtenção das misturas, os corpos de prova foram produzidos por moldagem de injeção a 230ºC, na forma de discos, para posterior realização das caracterizações.

De forma a exemplificar a metodologia empregada na realização dos experimentos, o fluxograma a seguir apresenta a sequência das etapas desenvolvidas.

Figura 7- Representação esquemática da obtenção das amostras.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.3.2. Caracterizações

3.3.2.1. Comportamento Reológico dos Compósitos

A reologia é a ciência que estuda o comportamento de fluxo e deformação da matéria. Para isso, aplicam-se tensões ou deformações ao material e analisam-se as respostas resultantes, também expressas como deformações ou tensões. A reologia de placas paralelas é utilizada para medir as propriedades reológicas dos materiais poliméricos fundidos. Ela consiste em duas placas circulares paralelas (discos), uma placa fixa e outra giratória, o material é colocado entre as placas. Logo depois é possível medir as propriedades de fluxo e medir as propriedades de deformação, como viscosidade. Esse equipamento possui uma geometria simples e a distância entre as placas pode ser ajustada para conferir resultados confiáveis. No caso dos polímeros, permite analisar como eles se comportam no estado fundido ou sólido durante o processamento. (Canevarolo, 2003). É fundamental para prever o desempenho de polímeros em processos como extrusão, moldagem e formação de filme (Canevarolo, 2003).

As análises reológicas foram realizadas em um reômetro *Discovery HR1 da TA Instrument Inc*, a 220ºC, utilizando geometria de placas paralelas de 25 mm de diâmetro com uma distância de 1,0 mm entre as placas. As medidas serão realizadas em modo oscilatório a uma faixa de frequência de 0,1 a 100 Hz sob deformação de 0,1%, dentro da região de viscoelasticidade linear.

3.3.2.2. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho por transformada de fourier (FTIR) é uma técnica que identifica grupos funcionais e nos estudos de conformação e estrutura de moléculas (Canevarolo, 2003). O espectrômetro FTIR é constituído por uma fonte de radiação, um interferômetro, compartimento de amostra e um detector de radiação infravermelho (Canevarolo, 2003).

A espectroscopia no infravermelho por transformada de *fourier* tem como finalidade, na caracterização dos compósitos em estudo, identificar grupos funcionais e ligações químicas em moléculas poliméricas (Canevarolo, 2003).

As amostras foram analisadas no equipamento de marca: Nicolet MAGNA, model IR-760), na faixa de 4000 - 400 cm^{-1} (região MIR), cujo acessório utilizado será o de Reflectância Total Atenuada (ATR). O corpo de prova em formato de disco.

3.3.2.3. Avaliação da Condutividade Elétrica (AC) dos Compósitos

A corrente alternada (AC), como o próprio nome indica, é um tipo de corrente elétrica cuja intensidade e direção variam de forma cíclica ao longo do tempo. Diferentemente da corrente contínua (DC), que mantém direção fixa e corrente constante, na corrente alternada o fluxo de elétrons inverte periodicamente, circulando ora em um sentido, ora no sentido oposto (Kardek, 2015).

É possível determinar a condutividade da corrente alternada (AC) usando medidores (impedância elétrica), sendo esse tipo de medição importante para isolantes usados em eletrônica e distribuição de energia (Canevarolo, 2003).

A análise em corrente contínua e corrente alternada ajuda a entender como a adição de cargas condutivas altera as propriedades elétricas do polímero, o que é essencial em compósitos com aplicação elétrica, eletrônica ou eletromagnética (Canevarolo, 2003).

A condutividade AC foi analisada com o auxílio de um potenciostato de modelo VersaSTAT3, acoplado a uma porta amostra de marca SOLARTRON, na faixa de frequência de 10^{-1} Hz a 10^{6} Hz, e voltagem de 100mV.

3.3.2.4. Morfologia dos Compósitos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), é uma técnica de alta resolução que utiliza um feixe de elétrons de alta energia para varrer a superfície de uma amostra, produzindo imagens de alta resolução. Tem como objetivo examinar detalhes de superfícies para estudos de morfologia, distribuição de fases, dispersão de partículas de reforço, interfaces entre a matriz e reforço, defeitos, fraturas e descontinuidades. A técnica permite observar a dispersão das cargas no polímero, a presença de porosidade, fraturas, trincas ou outras descontinuidades que possam influenciar nas propriedades mecânicas e térmicas do compósito (Marinucci *et al.*, 2019, Canevarolo, 2003).

As micrografias foram obtidas no equipamento de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de marca/modelo TESCAN/VEGA II, operando a 20kV.

As amostras foram fraturadas criogenicamente para analisar a morfologia, além disso, serão recobertas com ouro para melhorar o contato.

3.3.2.5. Eficiência de Blindagem Eletromagnética (SE)

A eficiência de blindagem (SE) mede a capacidade de um material de reduzir a quantidade de radiação eletromagnética que atravessa um compartimento ou superfície metálica, impedindo que campos elétricos e magnéticos atinjam regiões sensíveis (Wentworth, 2008).

A eficácia blindagem se expressa em decibéis (dB) e possui três mecanismos de atenuação sendo a reflexão (quando as ondas eletromagnéticas encontram a superfície condutiva e parte da energia é refletida), absorção (parte da energia penetra no material e é dissipada como calor) e perdas por múltiplas reflexões (ocorrem quando a espessura do material é pequena e a energia reflete internamente várias vezes antes de ser atenuada) (Guan *et al*., 2003, Wentworth, 2008).

A eficiência de blindagem (SE) é fundamental na caracterização de compósitos porque quantifica a sua capacidade de bloquear radiação eletromagnética, permitindo avaliar se o material é adequado para aplicações contra EMI (Blindagem contra

interferência eletromagnética) e orientando o desenvolvimento de novos compósitos condutivos ou magnéticos (Wentworth, 2008).

As medidas de eficiência de blindagem (SE) dos compósitos foram obtidas com o auxílio de um analisador de rede *de marca Agilent* PNA-L N5230C com guia de ondas com seção retangular, cuja faixa de frequência de análise compreende de 8,2 GHz a 12,4 GHz e 12 GHz a 18 GHz, correspondente às bandas X e Ku, respectivamente. As amostras foram analisadas nas espessuras de 1 e 3 mm. A banda X destaca-se principalmente por aplicações militares e aeroespaciais, sendo amplamente utilizada em sistemas de radar e detecção, enquanto a banda Ku está mais associada a sistemas de comunicação, transmissão de dados via satélite e sensoriamento remoto (Soares, *et al*.,2016).

4. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos das amostras contendo o sistema PVDF/NF.

4.1. Morfologia dos Compósitos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 8 mostra as micrografias das amostras contendo PVDF/NF nos diferentes percentuais de NF. A partir das micrografias foi possível verificar a morfologia dos compósitos.

Para a composição contendo 10% de NF (Figuras a–c), observa-se predominância da morfologia característica da matriz polimérica, com partículas de negro de fumo dispersas de forma relativamente isolada. A superfície apresenta o predomínio da matriz contínua de PVDF e poucos pontos de concentração da carga, indicando que a rede condutiva ainda não está completamente desenvolvida. Embora a dispersão do negro de fumo seja satisfatória, a distância entre as partículas limita a formação de caminhos contínuos para o transporte de cargas elétricas, o que contribui para menores valores de condutividade elétrica e eficiência de blindagem eletromagnética.

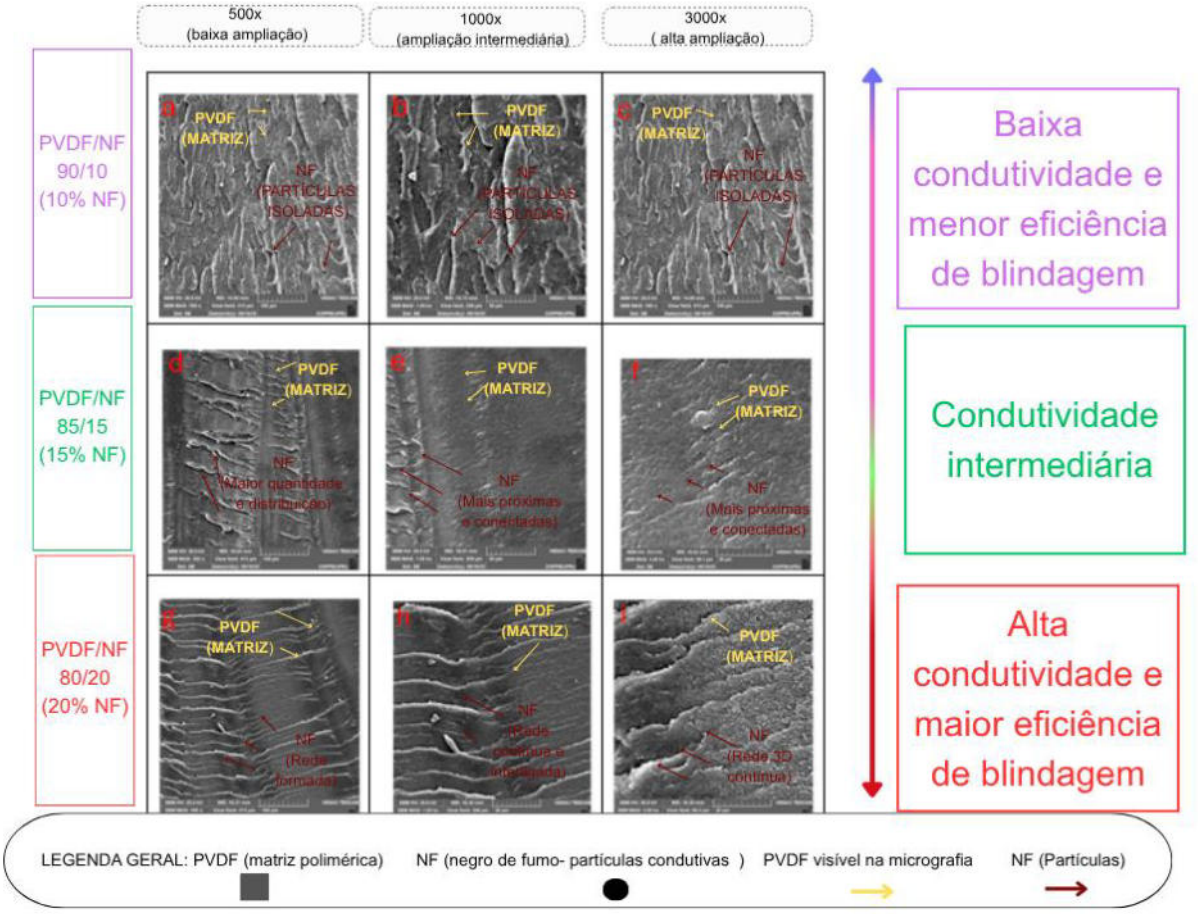
Nas amostras contendo 15% de NF (Figuras d–f), observa-se uma distribuição mais homogênea da carga condutiva ao longo da matriz polimérica. A morfologia torna-se mais rugosa e irregular, enquanto a quantidade de interface entre a matriz e as partículas aumentam, reduzindo as regiões livres de negro de fumo e favorecendo a interconexão entre as partículas. Essa morfologia sugere a aproximação do limiar de percolação elétrica, favorecendo a formação de caminhos condutivos e promovendo melhorias na condutividade elétrica e na capacidade de atenuação das ondas eletromagnéticas.

A composição contendo 20% (figura 8 - i) de NF apresentou uma morfologia com partículas de NF mais dispersos, se comparados às amostras com 10% e 15%, apresentando no aumento de 3.000x uma micrografia semelhante a uma “rede” que engloba a matriz de PVDF. Á medida que o teor de negro de fumo aumenta, as partículas passam a se interligar, formando uma rede tridimensional contínua. Em concentrações mais elevadas, essa estrutura evolui para uma rede percolada, a qual é responsável pela melhoria das propriedades do material.

A amostra de 20% de NF (Figura g–i), apresentou uma morfologia com partículas mais dispersas e bem integradas à matriz de PVDF, indicando melhor interação interfacial e formação de uma rede condutiva mais contínua. Essa boa dispersão é crucial, pois favorece o transporte de elétrons e melhora o desempenho elétrico e de blindagem eletromagnética do compósito.

A análise por MEV do compósito PVFD/negro de fumo mostra que o NF se dispersa na matriz na forma de partículas, na qual a interligação aumenta com o teor de carga, formando assim uma rede percolada. Essa rede contribui para a melhoria das propriedades do material, contudo em concentrações mais elevadas, pode aumentar a rigidez e reduzir a ductilidade do material.

Figura 8- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de PVDF/NF: a) 90/10 (500X), b) 90/10 (1000X), c) 90/10 (3000X); d) 85/15 (500X), e) 85/15 (1000X), f)85/15 (3000X); g) 80/20 (500X), h) 80/20 (1000X), i) 80/20 (3000X).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.1.1. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de *Fourier* (FTIR)

Conforme mostra a Figura 9, as análises por FT-IR permitiram identificar as bandas de absorção correspondentes às vibrações características da matriz de PVDF e investigar as interações com o negro de fumo (NF).

Tabela 4- As principais bandas de absorção características do PVDF são apresentadas a seguir.

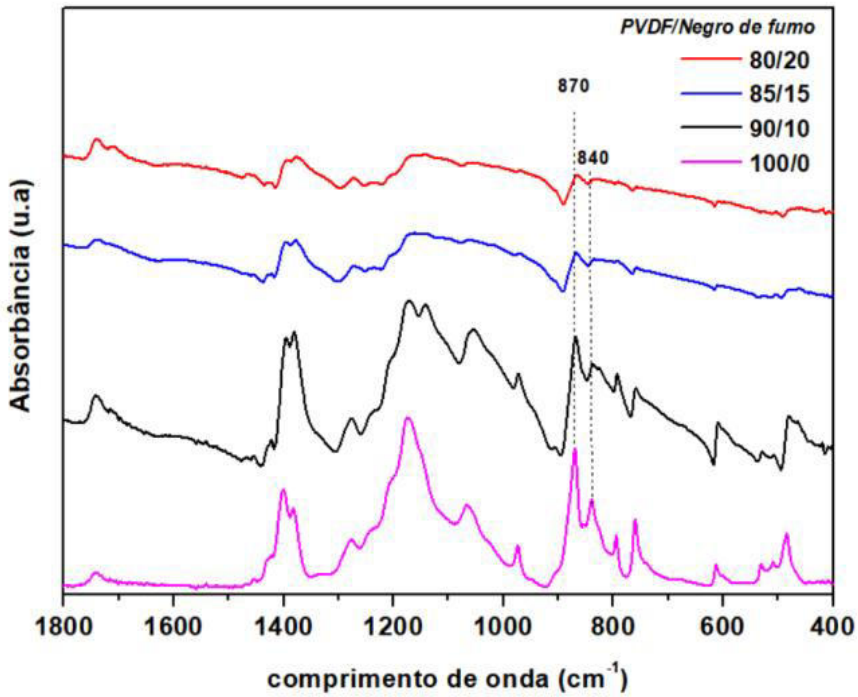
Faixa/ Posição (cm^{-1})	Atribuição	Descrição
~1275 cm^{-1}	Estiramento da ligação C-F	Modo característico da fase β do PVDF, relacionado à vibração da ligação carbono-flúor.
1000 - 1500 cm^{-1}	Estiramento simétrico e deformação angular dos grupos CF_2 e CH_2.	Modos vibracionais associados às unidades repetitivas do PVDF, representando as ligações entre carbono, flúor e hidrogênio.

A banda identificada em torno de 840 cm^{-1}, é característica do modo de vibração de deformação angular de CH_2 e estiramento assimétrico de CF_2, sendo uma característica da fase cristalina beta (β). Para a absorção em torno de 840 cm^{-1}, é verificado que a presença de NF resultou em picos menos definidos, ou seja, diminuição da intensidade de fase β quando comparado ao PVDF puro.

A análise por FTIR dos compósitos de PVDF/negro de fumo revelou bandas em proximadamente 840 cm^{-1} e 870 cm^{-1}, atribuídas às fases β e α do PVDF, respectivamente. A banda em 840 cm^{-1} está associada à fase β, considerada a fase eletroativa do PVDF, enquanto a banda em 870 cm^{-1} corresponde à fase alfa, termodinamicamente mais estável. Os resultados obtidos por FTIR demonstraram que a incorporação de negro de fumo influenciou significativamente a estrutura cristalina do PVDF, promovendo alterações na organização das cadeias poliméricas e nas interações intermoleculares do compósito. Observou-se variação na intensidade das bandas características associadas às fases cristalinas do PVDF, indicando

modificações estruturais no material. Esse comportamento sugere que a presença de negro de fumo contribui para alterações nas propriedades elétricas e no desempenho de absorção eletromagnética dos compósitos, favorecendo a formação de caminhos condutivos e aumentando o potencial de aplicação do material em sistemas de blindagem eletromagnética.

Figura 9- Espectroscopia de infravermelho do PVDF puro e dos compósitos à base de PVDF/NF com diferentes teores de carga condutora.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

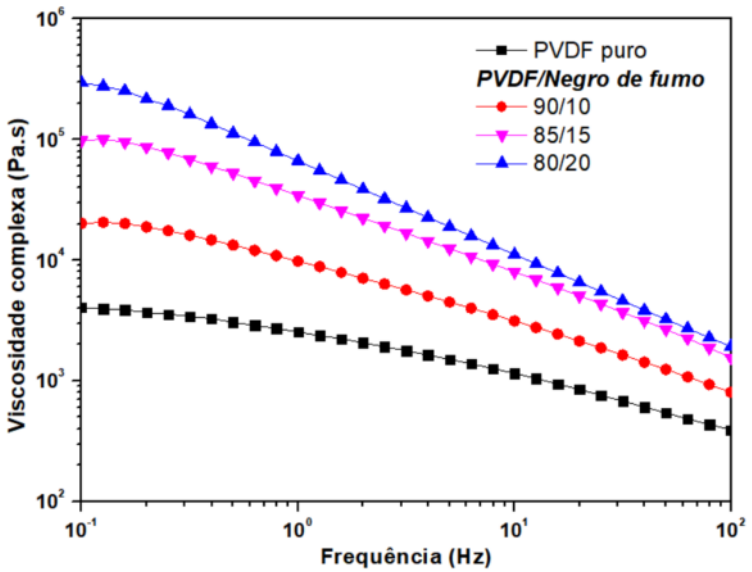
4.1.2. Comportamento Reológico dos Compósitos

As análises reológicas foram realizadas com os compósitos no estado fundido, visando avaliar a viscosidade complexa e obter informações sobre a interação entre a matriz de PVDF e o negro de fumo (NF), bem como sobre a dispersão das partículas na matriz polimérica. Os ensaios foram conduzidos dentro da região de viscosidade linear, condição na qual o material é submetido a uma deformação suficientemente pequena para preservar sua estrutura e seu comportamento viscoelástico, sem provocar alterações estruturais irreversíveis.

De acordo com a Figura 10, observa-se que a adição de negro de fumo exerceu uma influência significativa na viscosidade complexa do compósito, em comparação

com o PVDF puro. Pode-se observar que todos os compósitos apresentaram um comportamento pseudoplástico em toda a faixa de frequência, ou seja, a viscosidade complexa diminuiu com a frequência. Esse comportamento pseudoplástico é característico de sistemas com boas interações do PVFD - Negro de fumo e dispersão homogênea das partículas condutoras, comportamento típico de sistemas nos quais as estruturas internas se rompem sob cisalhamento, facilitando o escoamento e confirmando a presença de uma estrutura condutora dinâmica e estável. A adição de negro de fumo (NF) resultou em um aumento da viscosidade, tornando o compósito mais resistente ao fluxo e indicando a formação progressiva de uma rede tridimensional de partículas condutoras dentro da matriz de PVDF. Os ensaios reológicos indicaram boas interações entre o PVDF e as partículas condutoras, refletidas pelo aumento da viscosidade em baixas frequências, o que demonstra a formação de uma rede tridimensional contínua capaz de restringir o movimento das cadeias poliméricas. Essa estrutura, identificada na análise reológica, está diretamente relacionada ao estabelecimento de caminhos condutivos dentro da matriz. A formação dessa rede condutora é importante para o desempenho elétrico e para a eficiência da blindagem eletromagnética, uma vez que a rede formada atua como base estrutural para o transporte de cargas e para a atenuação das ondas eletromagnéticas incidentes.

Figura 10 - Viscosidade complexa dos compósitos à base de PVDF/NF em diferentes teores de carga condutora.



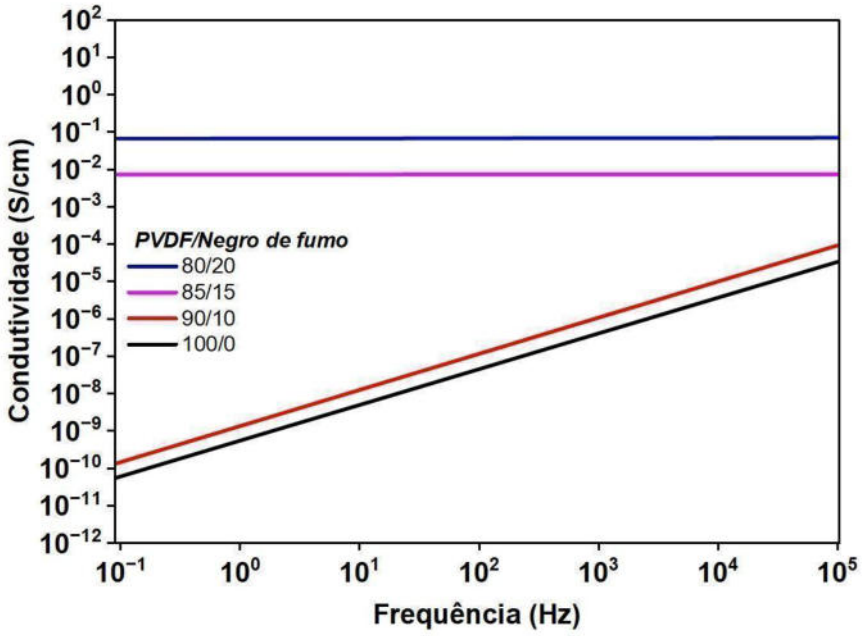
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.1.3. Avaliação da Condutividade Elétrica (AC) dos Compósitos

A Figura 11, mostra a dependência da condutividade de corrente alternada (AC) com a frequência para o PVDF puro e contendo 10% de NF. As amostras apresentam o aumento da condutividade com o aumento da frequência. O aumento do teor de NF para 15% e 20%, resultou em um aumento de condutividade, de forma a não haver dependência da condutividade com a frequência, indicando um caráter predominantemente condutor no material para essas proporções como esperado. A condutividade elétrica em corrente alternada confirmou a eficiência dessa rede na condução de cargas, revelando que a presença do NF promove o aumento da condutividade elétrica e favorece tanto a reflexão quanto a absorção das ondas eletromagnéticas. O limiar de percolação elétrica, define a concentração crítica de NF necessária para a formação de uma rede condutiva contínua favorecendo a reflexão e absorção das ondas eletromagnéticas, fenômenos essenciais para a blindagem eletromagnética eficiente.

Esses valores destacam a eficácia do método de preparação dos compósitos, bem como a contribuição do NF para a melhoria da condutividade elétrica do material, sugerindo que o limiar de percolação elétrica desse sistema se encontra entre as concentrações de 10 e 15% de NF.

Figura 11- Condutividade AC dos compósitos à base de PVDF/NF com diferentes percentuais de NF.

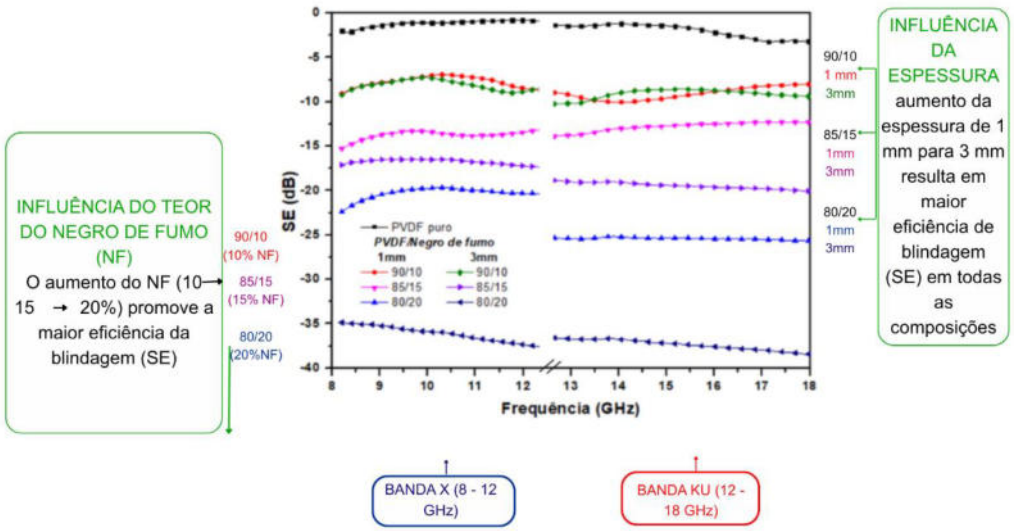


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.1.4. Eficiência de Blindagem Eletromagnética (SE)

As análises de Eficiência de Blindagem Eletromagnética permitiram avaliar o desempenho de blindagem dos compósitos à base de PVDF e negro de fumo (NF). A Figura 12 apresenta as curvas de SE das amostras PVDF/NF nas proporções 90/10, 85/15 e 80/20, medidas com espessuras de 1 mm e 3 mm na faixa de 8 a 18 GHz.

Figura 12- Eficácia de blindagem eletromagnética (SE) na faixa de 8 a 18 GHz para compósitos de PVDF com negro de fumo em diferentes proporções (90/10), 85/15 e 80/20) com espessura de 1 mm e 3 mm.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 5- Análise na faixa de frequência: 13 a 18 GHz

Amostras	1mm	3mm	Atenuação (%)
90/10	-10 dB	-10 dB	90,00%
85/15	-15 dB	-20 dB	96,84% 99,68%
80/20	-25 dB	-38 dB	99,68% 99,97%

Conforme mostram os resultados da Figura 12 (analisando as respostas eletromagnéticas nas faixas de frequência de 8 a 12 GHz e 12 a 18 GHz, foram realizadas duas análises distintas, com a combinação de dois gráficos que variam em função da espessura), observa-se que a proporção PVDF/puro com espessura de 1 mm apresentou valores de blindagem em torno de 2,5 a -4 dB. A adição progressiva de NF (Tabela 5) promoveu aumento na eficiência de blindagem, onde a composição 90/10 atingiu aproximadamente -10 dB, a composição 85/15 na faixa de -15 a -25 dB, enquanto a composição 80/20 registrou o melhor desempenho, alcançando -25 dB para a amostra de 1 mm e aproximadamente -38 dB para a de 3 mm. Quanto mais negativo for o valor, maior será a eficiência de blindagem eletromagnética.

O efeito da espessura mostrou-se determinante, as amostras com 3 mm apresentaram valores de SE (Eficácia de Blindagem) significativamente superiores às correspondentes de 1 mm para todas as composições, demonstrando a importância do caminho de atenuação e das múltiplas reflexões internas na dissipação de energia.

O aumento da eficiência de blindagem com maiores teores de NF resulta do equilíbrio entre os mecanismos de reflexão e absorção.

Os resultados alcançados nesta pesquisa comprovaram que a espessura do compósito exerce influência significativa sobre a eficiência de blindagem eletromagnética dos materiais à base de PVDF e negro de fumo. A comparação entre as amostras com espessuras de 1 mm e 3 mm revelou um aumento da eficiência de blindagem de aproximadamente -25 dB para -38 dB, respectivamente. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior percurso da onda eletromagnética no interior do material mais espesso, favorecendo mecanismos de absorção, polarização interfacial (movimento de cargas elétricas acaba se transformando em calor dentro do compósito) e múltiplas reflexões internas.

O aumento da espessura provocou uma maior interação entre a radiação incidente e a rede condutiva formada pelas partículas de negro de fumo dispersas na matriz de PVDF, resultando em uma dissipação mais eficiente da energia eletromagnética na forma de calor e, consequentemente, em uma menor parcela de energia transmitida. Dessa forma, observa-se que a absorção se torna o mecanismo predominante de blindagem à medida que a espessura aumenta.

Os resultados obtidos estão em concordância com estudos recentes da literatura, que demonstram que o aumento da espessura efetiva ou do número de

camadas em compósitos poliméricos condutivos contribui para a elevação da eficiência total de blindagem. Esses parâmetros sinalizam uma maior capacidade do material em atenuar as ondas eletromagnéticas por meio de mecanismos de absorção e dissipação de energia na forma de calor, reduzindo simultaneamente a energia refletida para o ambiente.

Além da influência da espessura e do teor de negro de fumo, observou-se que a frequência também alterou o desempenho da blindagem eletromagnética. A variação da eficácia de blindagem foi mais pronunciada na Banda X (8–12 GHz), na qual as amostras exibiram maiores oscilações dos valores de SE em função da frequência. Na Banda Ku (12–18 GHz), por outro lado, os valores de blindagem mostraram-se mais estáveis, indicando menor sensibilidade às variações de frequência. Em resumo, os resultados demonstram que a blindagem eletromagnética em compósitos PVDF/NF é fortemente influenciada pelo teor de carga e pela espessura do material. O balanceamento entre os mecanismos de reflexão e absorção mostrou-se crucial para o desempenho de blindagem, onde teores superiores de NF e maiores espessuras potencializam a eficiência de blindagem através do aumento da condutividade e da atenuação do sinal.

Entre as bandas investigadas, a banda X (8 - 12 GHz) destacou-se como a mais relevante para o presente estudo, devido à sua ampla utilização em sistemas de radar, monitoramento militar e tecnologias aeroespaciais. A elevada capacidade de atuação dos compósitos nessa faixa torna esses materiais promissores para aplicações estratégicas, como revestimentos em submarinos e aeronaves. É fundamental para dificultar a detecção por radares numa determinada frequência. Além disso, a eficiência de blindagem nessa faixa também demonstra potencial para proteção de dispositivos eletrônicos sensíveis, como marcapassos, minimizando interferências eletromagnéticas e aumentando a segurança operacional desses equipamentos.

Os resultados indicam que os compósitos desenvolvidos possuem potencial para atuar tanto na reflexão quanto na absorção das ondas eletromagnéticas, reduzindo significativamente a emissão de sinais refletidos.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, investigou-se o efeito da adição de negro de fumo à matriz polimérica de PVDF sobre as propriedades elétricas e eletromagnéticas dos compósitos, visando avaliar seu potencial de aplicação em sistemas de blindagem eletromagnética.

A análise morfológica por MEV evidenciou que o aumento do teor de negro de fumo promoveu maior interconexão e integração das partículas na matriz de PVDF. Para 10% de NF, observaram-se partículas relativamente isoladas e uma rede condutiva ainda pouco desenvolvida. Com 15% de NF, verificou-se maior aproximação e interligação das partículas, enquanto a composição com 20% apresentou uma estrutura mais contínua e interconectada, compatível com a formação de uma rede percolada. Esses resultados corroboram os dados de condutividade elétrica, indicando que o aumento do teor de NF favorece a formação de caminhos condutivos e, consequentemente, a melhoria das propriedades elétricas e de blindagem eletromagnética dos compósitos

A análise por FTIR demonstrou que a incorporação de negro de fumo promoveu alterações na estrutura cristalina do PVDF, evidenciadas principalmente pela redução da intensidade da banda característica da fase β, em aproximadamente 840 cm^{-1}. Esses resultados indicam que o NF influenciou a organização das cadeias poliméricas e, em conjunto com as análises morfológicas e elétricas, contribuiu para as alterações nas propriedades dos compósitos PVDF/NF, favorecendo o seu potencial para aplicação em blindagens eletromagnéticas.

Os resultados reológicos evidenciaram que a incorporação de negro de fumo alterou o comportamento do PVDF fundido, promovendo o aumento da viscosidade complexa e indicando a formação de uma estrutura interna mais desenvolvida com o aumento do teor de NF. Todos os compósitos apresentaram comportamento pseudoplásticos, caracterizado pela redução da viscosidade com o aumento da frequência, favorecendo o escoamento do material durante o processamento. O aumento da viscosidade em baixas frequências sugere maior interação entre o PVDF e o NF e a formação de uma rede tridimensional de partículas capaz de restringir o movimento das cadeias poliméricas. Esses resultados são relevantes para a compreensão da processabilidade dos compósitos e, quando associados aos

resultados de condutividade elétrica e blindagem eletromagnética, indicam que a estruturação promovida pelo NF contribui para o estabelecimento de caminhos condutivos e para o desempenho dos materiais para a blindagem eletromagnética.

De acordo com os resultados obtidos na caracterização elétrica evidenciou a influência direta do teor de NF sobre a condutividade dos compósitos PVDF/NF. Verificou-se uma transição de comportamento predominante isolante, observada no PVDF puro e na composição com 10% de NF, para um comportamento predominantemente condutor nas concentrações de 15% e 20%. A partir dessa transição, foi possível estimar o limiar de percolação elétrica entre 10% e 15% de NF, indicando a formação de uma rede condutiva contínua na matriz polimérica. Portanto, o aumento da concentração de NF mostrou-se fundamental para o estabelecimento de caminhos condutivos, contribuindo para o aumento da condutividade elétrica e para os mecanismos de interação com as ondas eletromagnéticas, especialmente a reflexão e a absorção, favorecendo o desempenho dos compósitos na blindagem eletromagnética.

A avaliação da eficiência de blindagem demonstrou que o aumento da espessura dos compósitos PVDF/NF promoveu uma melhoria significativa na eficiência de blindagem, com valores que passaram de aproximadamente -25 dB para -38 dB nas espessuras de 1 mm e 3 mm, respectivamente. Esse comportamento está associado ao maior percurso da onda eletromagnética no interior do material, proporcionando maior interação com a rede condutiva formada pelo negro de fumo e favorecendo os mecanismos de absorção, polarização interfacial e múltiplas reflexões. Como consequência, ocorre maior dissipação da energia eletromagnética no interior do compósito, reduzindo a parcela de radiação transmitida. Dessa forma, conclui-se que o aumento da espessura contribui diretamente para o aprimoramento da blindagem eletromagnética dos compósitos PVDF/NF, com maior contribuição do mecanismo de absorção para a atenuação da radiação incidente.

Os resultados obtidos estão em concordância com estudos recentes da literatura, que demonstram que o aumento da espessura efetiva ou do número de camadas em compósitos poliméricos condutivos contribui para a elevação da eficiência total de blindagem. Esses parâmetros sinalizam uma maior capacidade do material em atenuar as ondas eletromagnéticas por meio de mecanismos de absorção

e dissipação de energia na forma de calor, reduzindo simultaneamente a energia refletida para o ambiente.

Sendo assim, a dissertação demonstra a importância do uso de cargas condutivas em matrizes poliméricas como alternativa promissora para obtenção de materiais leves, eficientes e tecnologicamente avançados.

Além das aplicações militares, os resultados também demonstram a relevância desses materiais para a proteção de dispositivos eletrônicos sensíveis utilizados na área de saúde, como marcapassos, uma vez que a interferência eletromagnética pode comprometer o funcionamento adequado desses equipamentos. Assim, o estudo reforça o impacto científico e tecnológico do projeto, destacando sua contribuição para o desenvolvimento de materiais multifuncionais capazes de atender simultaneamente demandas de segurança, comunicação e proteção eletromagnética.

Portanto, está dissertação evidencia o potencial dos compósitos poliméricos condutores como materiais estratégicos para aplicações de alta tecnologia, destacando perspectivas promissoras tanto para o setor civil quanto para os segmentos militar, aeroespacial e biomédico.

REFERÊNCIAS

ALI, Z.; YAQOOB, S.; YU, J.; AMORE, A.; ALAM, M.F**. A comparative review of processing methods for graphene-based hybrid filler polymer composites and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties.** Journal of King Saud University, v.36, 2024, art.103457. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103457. Acesso em: 5 nov. 2024.

ALMEIDA, N.M.B.G. **Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta**. 2012, 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Porto,Porto, 2012.

ALZAHRANI, M.M.; ALAMRY, K. A.; HUSSEIN, M. A **.Recent advances of Fiber-reinforced polymer composites for defense innovations.**Results in Chemistry, v.15, 2025, art.102199. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102199. Acesso em: 2 mar.2025.

AMEDURI, B. **From Vinylidene Fluoride (VDF) to the Applications of VDF-Containing Polymers and Copolymers: Recent Developments and Future Trends**. **Chemical Review**, [S.l.], v. 109, p. 6632-6686, 2009. DOI: 10.1021/cr800187. Acesso em: 19 nov. 2024.

AMEDURI, B. **From Vinylidene Fluoride (VDF) to the Applications of VDF Containing Polymers and Copolymers**: Recent Developments and Future Trends. Chem. Rev. v. 109, p. 6632-6686, 2009. DOI: 10.1021/cr800187m.

ANOOJA, J. B.; GEORGE, S. C.; KALARIKKAL, N.; THOMAS, S. **Carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications.** Journal of Materials Chemistry C, Cambridge, v. 7, n. 9, p. 2691–2707, 2019. DOI: 10.1039/C8TC06012A. Acesso em: 7 mar. 2025.

ARENHART, R. G. **Método de previsão de limiar de percolação e condutividade elétrica em compósitos poliméricos por simulação de Monte Carlo.** 2012, 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

Bíblia. **Bíblia de Estudo Almeida**. 2. ed. Barueri, SP: Sociedade Bíblica do Brasil, 2013.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**:an Introduction. 2nd ed. Jonh Wiley & Sons, p. 445-852, 2000.

CANEVAROLO, S. V. (org.)., "**Técnicas de caracterização de polímeros**". São Paulo: Artliber, 2003.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials**. Science and Engineering. 3rd ed. New York:Springer, 2012.

DIAS, G. C. **Preparação e caracterização do compósito poli (fluoreto de vinilideno) /polianilina com partículas de níquel**.2014. 110f.Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2014.

DILLON, D. R.; TENNETI, K. K.; LI, C. Y.; KO, F. K.; SICS, I.; HSIAO, B. S. **On the structure and morphology of polyvinylidene fluoride–nanoclay nanocomposites**. **Polymer**, v. 47, p.1678–1688, 2006. DOI: 10.1016/j.polymer.2006.01.015. Acesso em: 29 ago. 2025.

DONNET, J. B.; BASAL, R.; WANG, J. M. **Carbon Black**: Science and technology. 2.ed. Revised and expanded. New York: Marcel Dekker, 1993.

DROBNY, J. G**.** ***Technology of Fluoropolymers*****.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

FAEZ, R.; REZENDE M. C. **Polímeros condutores intrínsecos e seu potencial em blindagem de radiações eletromagnéticas**. Polímeros: ciência e tecnologia, São Carlos, n.3, v.10, p. 130-137, 2000.

FERREIRA, C. **Hydrocarbons:Chemical Properties of Carbon Black Stable Dispersions.** Journal of Medicinal and Organic Chemistry, v.5, n.6, p.106- 112, 2022. DOI: 10.37532/jmoc.2022. Acesso em: 20 jun. 2025.

FERREIRA, M. R.F. **Avaliação do processamento e propriedades de compósitos de poliuretano termoplástico reforçado com fibras silexil, em comparação com outras fibras/cargas comercialmente utilizadas**. 2007, 120f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

FIONOV, A.; KRAEV, I.; YURKOV, G.; SOLODILOV, V.; ZHUKOV, A.; SURGAY, A.; KUZNETSOVA, I.; KOLESOV, V. **Radio-Absorbing Materials Based on Polymer Composites and Their Application to Solving the Problems of Electromagnetic Compatibility**.Polymers, v.14, n.3026, p.1–59, 2022. https://doi.org/10.3390/polym14153026. Acesso em 19 jun.2025

FUKADA, E. History and Recent Progress in Piezoelectric Polymers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 47, n. 6, p. 1277-1290, 2000. https://doi.org/10.1109/58.883516. Acesso em: 14 jun. 2024.

GHOSH, S.K.; NATH, K.; NATH, C.S.; PAUL, S.; GHOSH, T.; KATHERIA, A.; DAS, P.; DAS, N.C. **Combination effect of functionalized high aspect ratio carbonaceous nanofillers and carbon black on electrical, thermal conductivity, dielectric and EMI shielding behaviour of co-continuous thermoplastic elastomeric blend composite films.** Chemical Engineering Journal Advances, v.15, 2023, art.100505. DOI: 10.1016/j.ceja.2023.100505. Acesso em: 9 nov. 2025.

GIBSON, R.F. **Principles of composite material mechanics**. 4. ed.Boca Raton: CRC PRESS, 2016.

GUAN, D. **Study on shielding functionally gradient materials with low reflection loss and high absorption loss for electromagnetic wave**. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, v. 2, p. 1259–1262, 2003.

GUMUS, E.; YAGIMLI, M.; ARCA, E.**Investigation of the dielectric properties of graphite and carbon black-filled composites as electromagnetic interference shielding coatings**. Applied sciences, v.13, p.1-13, 2023. https://doi.org/10.3390/app13158893 .Acesso em: 10 out. 2025.

Guo Y.; Zhang Y.; Wu H.; Guo S. **Gradient distribution of segregated conductive network in polyvinylidene fluoride nanocomposites to achieve outstanding electromagnetic interference shielding with low reflection**. J Mater Sci Technol 2024; 190:24–32. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.12.022. Acesso em: 1 agos. 2025.

GUO, HAO.; JERRAMS, STEPHEN.; XU, ZONGCHAO.; ZHOU, YANFEN.; JIANG, LIANG.; ZHANG, LIQUN.; LIU, LI.; WEN, SHIPENG. **Enhanced fatigue and durability of carbon black/natural rubber composites reinforced with graphene oxide and carbon nanotubes.** Engineering Fracture Mechanics, v. 223, 2020, art.106764. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106764. Acesso em: 19 ago. 2025.

JIA, L.J.; PHULE, A.D.; GENG, Y.; WEN, S.; LI, L.; ZHANG, Z.X. **Microcellular Conductive Carbon Black or Graphene/ PVDF Composite Foam with 3D Conductive Channel: A Promising Lightweight, Heat-Insulating, and EMI-Shielding Material**. MacromoLecular Materials and Engineering**.** v. *306*, 2021, art.2000759. DOI: 10.1002/mame.202000759. Acesso em: 1 set.2025.

KAPLAN, M.; ALP, E.; KRAUSE, B.; POTSCHKE, P. **Improvement of the piezoresistive behavior of poly (vinylidene fluoride) /carbon nanotube composites by the addition of inorganic semiconductor nanoparticles.** Materials, v. 17, n.4, 2024, art. 774. https://doi.org/10.3390/ma1704774. Acesso em: 14 jun. 2025.

KARDEK, R.A.; RODRIGUES, C. L.C. **Eletricidade em CA**. Ouro Preto: Instituto Federal de Minas Gerais – CEAD, 127 f, 2015.

KHARMOUDI, H.; LAMTAI, A.; ELKON, S.; ROBERT, M.; DIEZ C.**Effect of graphene on the mechanical properties of recycled high-density and high-molecular-weight polyethylene blends.** Materials, v.17, n. 19, 2024, art.4377. https://doi.org/10.3390/ma17194733.Acesso em: 20 jan. 2025.

KRISHNA, Munishamaiah**. Investigação multiescalar do desempenho de blindagem EMI em compósitos de epóxi reforçados com negro de fumo**. Journal of Materials Science: Materials in Engineering, v. 21, 2026, art. 21. DOI: 10.1186/s40712-025-00388-4.Acesso em: 6 mar. 2026.

kuester, S. **Preparação e caracterização de compósitos de poli(estireno-b-etileno-ran-butileno-b-estireno) com grafite expandido: estudo comparativo com compósitos contendo negro de fumo condutor**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

LEE, C.H.; HUANG, W.K.; LIN, M.F.; KUO, Y.H.; LIU, S.J.; ITO, H. **Augmented triboelectric properties of graphene filled poly(vinylidene difluoride-co-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) nanofibers.** RSC Advances. v.14, n.52, p.38416-38425, 2024. https://doi.org/1039/D4RA07550A. Acesso em: 20 abr.2026.

LEE, S. H.; LUVNISH, A.; SU. X.; MENG, Q.; LIU, M.; KUAN, H. C.; BOSTROM, M.; MA, J. **Advancements in polymer (Nano)composites for phase change material-based thermal storage: A focus on thermoplastic matrices and ceramic/carbon fillers**. Smart Materials in Manufacturing,v. 2, n.100044, p1- 11, 2024.

LEPAK-KUC, S.; NOWICHI, Y.; RAUS, A. L.; JAKUBOWSKA, M. **Multifiller carbon nanotube, graphene, and carbon black composite filaments: A path to versatile electromaterials.**MRS BULLETIN, V.49, p.1-9, 2024. doi:10.1557/s43577-024-00757-y. Acesso em: 6 jun. 2025.

LEVY, L.; CHAUDHURI, I.S.; KRUEGER, N.; MCCUNNEY, R.J. **Does carbon black disaggregate in lung fluid?** A critical assessment. Chemical Research Toxicology, v. 25, p. 2001–2006, 2012.

LI, YI.; DONGDONG, L.; CHENG, H.; HAND.C.; XIAO, L. **Morphology and physical properties of composites based on high-density polyethylene/propylene-ethylene random copolymers blends and carbon black**. Polymer Testing,v. 123, p.1-12, 2023. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108050. Acesso em: 3 abr.2025.

MAITY, Arjun. **Polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding: recent advances, challenges and future perspectives**. Results in Chemistry, v. 18, p. 102877, 2025.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos**: fundamentos e tecnologia. São Paulo:Artliber, 2011.

MARTINS, D.; MIGLIORINI, F.L.; TEODORO, K.B.R.; FACURE, M.H.M.; DANIEL.S. **Nanocompósitos poliméricos**. In: Corrêa, D.S; OLIVEIRA J, OSVALDO Novais de (org.). **Nanotecnologia aplicada a polímeros**. Rio de Janeiro: LTC, 2022. cap.4, p. 133-170.

MARTINS, J.N; **Nanocompósitos de poli (fluoreto de vinilideno)/polianilina com nanotubos de carbono**. 2013, 116f. Tese de Doutorado (Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MEI, X.; LU, L.; XIE, Y.; WANG, W.; TANGA, Y.; TEH, K.S**. An ultra-thin carbon-fabric/graphene/poly (vinylidene fluoride) film for enhanced electromagnetic interference shielding.** Royal Society of Chemistry. V. 11, p. 13587–13599, 2019. DOI: 10.1039/c9nr03603b. Acesso em: 10 set. 2025.

MIGNONI, M. L. ***Síntese, caracterização e aplicações de nanocompósitos polímero-argila*. 2008. 95f. Dissertação** (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PEREIRA, José Jesus. **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de micro-ondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda X.** 2007. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.

ROY, AMRITA.; KAR, SAPTARSHI.; GHOSAL, RANJAN.; NASKAR, KINSUK.; BHOWMICK, ANIL K. **Flourishing an electrochemical synthetic route toward carbon black-intercalated graphene as a neoteric hybrid nanofiller for multifunctional polymer nanocomposites.** Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 60, n. 16, p. 5758-5769, 2021. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c00618. acesso em: 13 jan. 2026.

SARKAWI, S. S.; KAIDOU, M.; DOUGLAS, A.; YEHIA, A.; THOMAS, S. **Effect of graphene as hybrid filler on filler–rubber interactions and dynamic properties of natural rubber and epoxidized natural rubber composites**. Polymer, v. 112, p. 74–82, 2017. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.01.041.Acesso em: 20 jan.2026.

SCHWARTZ, M.M. **Composite Materials: Processing, Fabrication and Applications** (Vol. 2). New Jersey: Prentice Hall, 1997.

SIMUNEC, D.P.; BREEDON, M.; MUHAMMAD, F.U.R.; KYRATZIS, A.S. **Electrical capability of 3D printed unpoled polyvinylidene fluoride (PVDF)/ thermoplastic polyurethane (TPU) sensors combined with carbon black and barium titanate.** Additive Manufacturing,v. 73.p.1-18, 2023.

SOARES, Ketly Pontes**. Efeito do líquido iônico nas propriedades elétricas e absorvedoras de ondas eletromagnéticas de compósitos à base de poli (Fluoreto de Vinilideno-co-Hexafluorpropileno) (PVDF-HFP) e Polianilina (PAni).** 2016.101f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SOARES, Ketly Pontes. **Preparação, caracterização e aplicações de compósitos condutores à base de polianilina**. 2020. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

SUN, J.; ZHOU, D. **Advances in graphene–polymer nanocomposite foams for lectromagnetic interference shielding**. Polymers, v. 15, p.1-18, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15153235. Acesso em: 10 out. 2025.

TANG, J.; HUANG, X.; ZHANG, H.; LI, Y.; CHEN, T. **Excellent microwave absorption of carbon black/reduced graphene oxide composite with low loading**. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Londres, v. 30, p. 20764–20774, 2019. DOI: 10.1007/s10854-019-02489-9. Acesso em: 15 out. 2025.

VAN LOOCK, F.; RAVICHANDRAN, P.; LI, X.; ANDERSON, P. D.; CARDINAELS, R. **Design of lossy dielectric polymer nanocomposite alternating A-B multilayers for absorption-dominated EMI shielding in the X-band regime**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 191, art. 108715, 2025. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.108715.Acesso em: 20 jun. 2026.

VIDAKIS, N.; PETOUSIS, M.; MICHAILIDIS, N.; MOUNTAKIS, N.; ARGYROS, A.; SPIRIDAKI, M.; MOUTSOPOULOU, A.; PAPADAKIS, V.; CHARITIDIS, C. **High-density polyethylene/carbon black composites in material extrusion additive manufacturing: conductivity, thermal, rheological, and mechanical responses.** Polymer, v.15, n.24, 2023, art.4717. DOI:10.3390/POLYM15244717. Acesso em: 10 nov. 2025.

WANG, JIE.; LI, H.; WANG, Z.; XIN, D.; LUO, J.; BAI, S.; ZHOU, H. **Improved electromagnetic interference shielding properties of poly (vinylidene fluoride) composites based on carbon nanotubes and grapheme nanoplatelets**. Polymer composites. V.43, p. 6966-6974, 2022. Acesso em: 5 jun. 2026.

WANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, X.; LI, Z.; LIU, L. **Graphene/carbon black/natural rubber composites prepared by a wet compounding and latex mixing process**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 114, p. 356–364, 2018. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.08.025.Acesso em: 1 jun. 2026.

WENTWORTH, S. **Eletromagnetismo aplicado**: Abordagem antecipada das linhas de transmissão. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008

YANG, R.; ZHOU, Y.; REN, Y.; XU, D.; GUAN, L.; GUO, X.; RUI, Z.; ZHAO, R. **Promising PVDF-CNT-Graphene-NiCO chains composite films with excellente electromagnetic interferences shielding performance**. Journal of Alloys and Compounds, V.908, 2022, art.164538. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164538. Acesso em: 5 set.2025.

ZACHARIAH, BINU.; NARAYANAN, THULASI K.; JOSEPH, RANI. **Electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer-based composites: a review.** Journal of Materials Science, v. 57, p. 11865–11910, 2022. DOI: 10.1007/s10853-022-07361-7.Acesso em: 6 out. 2025.

ZARBIN, A. J. G.; ORTH, E. S**. Algumas estruturas do carbono elementar e sua importância para o desenvolvimento e soberania do Brasil**. Química nova**.** n. 42, 2019. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170437.Acesso em: 15 abr.2025.

ZARBIN, A. J.G. **Química de (nano)materiais**. Química Nova, v. 3, n.6, p.1469-1479, 2007.