

METAMATERIAIS EM AERONÁUTICA: LAMINADO FIBRA METAL (LFM) PARA RADOME FILTRANTE PARA ANTENAS 5G – Projeto de Pesquisa

JORGE TADAO MATSUSHIMA¹, DIVANI BARBOSA GAVINIER², RITA DE CASSIA MENDONÇA SALES CONTINI¹, BRAULIO HARUO KONDO LOPES³; MAURÍCIO RIBEIRO BALDAN³

¹Fatec São José dos Campos – Projeto de Estruturas Aeronáuticas

²Fatec Taubaté – Análise e Desenvolvimento de Sistemas

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -Materiais Avançados e Pesquisas Espaciais – MAPA/INPE
jorge.matsushima@fatec.sp.gov.br

Metamaterials in Aeronautics: Fiber Metal Laminated (FML) for Filtering Radome for 5G Antennas

Eixo Tecnológico: *Produção Industrial / Desenvolvimento Educacional e Social*

Resumo

No atual cenário tecnológico para o desenvolvimento de aeronaves elétricas, como drones e veículos eVTOL (Veículos Elétricos de Decolagem e Pouso Vertical), há uma demanda crescente por materiais estruturais que combinem leveza, resistência mecânica e multifuncionalidade. Entre as funcionalidades desejadas destaca-se a mitigação de interferência eletromagnética, essencial para a comunicação sem fio baseada em tecnologias como o 5G. Essas tecnologias, operando em frequências elevadas, requerem materiais que assegurem compatibilidade eletromagnética ao blindar ou filtrar ondas indesejáveis. Neste contexto, propõe-se o desenvolvimento de um radome filtrante para antenas 5G em plataformas aeronáuticas, utilizando metamateriais na configuração de Laminado Fibra Metal (LFM). Este tipo de laminado, além de ser leve e resistente, pode ser projetado para interagir com ondas eletromagnéticas, proporcionando blindagem e filtragem seletiva na faixa de 24 a 27 GHz, relevante para comunicações por satélite e aplicações aeronáuticas. A proposta é particularmente relevante considerando a ausência de produção nacional de radomes com essas características. Para obter o desempenho filtrante desejado, será incorporada ao LFM uma superfície seletora de frequência (FSS – *Frequency Selective Surface*), composta por arranjos periódicos de elementos geométricos que atuam como filtros passivos para diferentes frequências. O desenvolvimento será realizado em parceria com o Grupo MAPA do INPE, utilizando infraestrutura para análise físico-química, propriedades mecânicas e avaliação eletromagnética dos protótipos. O projeto prevê a validação inicial das configurações de FSS por modelagem e simulação (TRL 3), seguida da construção e testes de protótipos em ambiente operacional (TRL 7). Resultados preliminares da revisão de literatura já indicam possíveis geometrias de FSS a serem otimizadas e integradas ao LFM.

Palavras-chave: *Metamaterial, Laminado fibra metal, Radome, Superfície seletiva frequência, Filtragem de ondas eletromagnéticas.*

Abstract

In the current technological scenario for the development of electric aircraft, such as drones and eVTOLs (Electric Vertical Take-Off and Landing vehicles), there is a growing demand for structural materials that combine lightness, mechanical strength, and multifunctionality. Among the desired functionalities, the mitigation of electromagnetic interference stands out as essential for wireless communication technologies such as 5G. These technologies, operating at increasingly higher frequencies, require materials that ensure electromagnetic compatibility by shielding or filtering unwanted electromagnetic waves. In this context, the development of a frequency-selective radome for 5G antennas in aeronautical platforms is proposed, based on metamaterials configured as Fiber Metal Laminates (FMLs). This type of laminate, besides being lightweight and mechanically strong, can be engineered to interact with electromagnetic waves, providing shielding and selective filtering within the 24–27 GHz range, which is important for satellite communications and aeronautical applications. The proposal is particularly relevant given the current lack of national production of radomes for this purpose in Brazil. To achieve the desired filtering performance, a Frequency Selective Surface (FSS), consisting of periodic arrays of geometrically specific elements acting as passive spatial filters, will be integrated into the FML. The development will be conducted in partnership with the Advanced Materials and Space Research Group (MAPA) at the National Institute for Space Research (INPE), using its infrastructure for physicochemical analysis, mechanical property evaluation, and electromagnetic

performance testing of the prototypes. The project plans initial validation of FSS configurations through modeling and simulation (TRL 3), followed by the construction and testing of prototypes in operational environments (TRL 7). Preliminary results from the literature review already indicate possible FSS geometries to be optimized and integrated into the FML structure.

Key-words: *Metamaterial, Fiber metal laminate, Radom, Frequency selective surface, Electromagnetic wave filtering.*

1. Introdução

Na era tecnológica atual, a demanda por novos materiais multifuncionais é crucial, especialmente no desenvolvimento de aeronaves elétricas como drones e veículos eVTOL. Destacam-se os materiais compósitos multifuncionais, particularmente os laminados de fibra metal (LFM), que combinam leveza, resistência e multifuncionalidade [1]. Os LFM são especialmente valorizados na indústria aeronáutica devido à sua capacidade de reduzir o peso e o número de peças, além de oferecerem superioridade em fadiga, resistência à corrosão e ao fogo, tornando-os candidatos atraentes para futuras estruturas aeronáuticas [2-4].

No atual cenário do setor aeronáutico focado em tecnologias voltadas para drones e eVTOL, estruturas baseadas em LFM despertam enorme interesse devido ao caráter multifuncional [5]. Além do que, hoje, esse caráter torna-se primordial para que a indústria aeronáutica atenda novas regulamentações relacionadas as questões voltadas as emissões atmosféricas, a economia de recursos naturais e ao aumento dos custos de combustíveis.

Uma das multifuncionalidades requeridas na tecnologia de drones e veículos eVTOL é destacada pela necessidade de apresentar um alto desempenho eletromagnético, visto que, hoje, toda a comunicação tende para tecnologias sem fio, como por exemplo, 5G, que vem operando em bandas de frequências cada vez mais altas [6]. Assim, a estrutura dessas aeronaves demanda de materiais que garantam compatibilidade eletromagnética e que trabalhem corretamente em ambiente eletromagnético seja blindando ou filtrando ondas eletromagnéticas indesejáveis.

A tecnologia 5G, cuja implementação total no Brasil ainda está distante, representa o mais recente avanço na tecnologia de comunicação sem fio que veio para aumentar a velocidade e a capacidade de transmissão de dados através de conexões de banda larga podendo atingir velocidades de até 20 Gbps e uma latência tão baixa quanto 1 milissegundo. Isso representa uma melhoria substancial em comparação com as velocidades oferecidas pelas redes 4G, que chegam a até 1 Gbps, tornando-as capaz de conectar vários dispositivos simultaneamente e essencial para Internet das Coisas (IoT), o que pode ter efeitos significativos nas aeronaves e nos seus equipamentos [7].

Como resultado, a utilização da tecnologia 5G avançando para 6G, no contexto da aviação, terá um papel inovador no que diz respeito a melhoria dos sistemas de comunicação das aeronaves, de conectividade para os passageiros, de transmissão de dados de comunicação do cockpit e a racionalização das operações terrestres. Entretanto, é crucial reconhecer que a realização destes avanços exigirá um desenvolvimento substancial de infraestruturas resultando em novos desafios regulamentares para garantir a segurança e a eficiência das operações das aeronaves [6,7].

Desta forma, para que a comunicação sem fio ocorra de forma eficiente, a transferência e captação de sinal eletromagnético por antenas deve ocorrer com o máximo de desempenho eletromagnético. Para que isso ocorra, essas antenas demandam de uma proteção feita por uma estrutura que garanta compatibilidade eletromagnética, totalmente transparente e sem perdas de sinal, garantindo alta transmissão e baixa reflexão e absorção dentro da banda de frequência de operação da antena [8-10].

Nas aeronaves, essa estrutura se trata do radome, que além do desempenho eletromagnético deve atender outros requisitos relacionados a proteção contra adversidades climáticas que podem prejudicar o funcionamento de durabilidade do sistema, tais como vento, umidade excessiva, alta salinidade da atmosfera, alta incidência de areia ou outros resíduos sólidos em suspensão [11].

Esses requisitos demandam do uso de sistemas que apresentem elevado compromisso de desempenho estrutural que dependem da seleção adequada dos materiais para a composição estrutural. Neste quesito destacam os materiais compósitos que além de reunir as características de desempenho estrutural pode agregar outras funcionalidades através do efeito sinérgico dos materiais.

Compósitos produzidos com diferentes resinas poliméricas reforçados com fibras de carbono, vidro e aramida são amplamente aplicados como materiais de desempenho estrutural devido as suas propriedades relacionadas a resistência mecânica e leves [12].

Tendo em vista a produção de compósitos de baixo custo aliado ao compromisso de desempenho estrutural destaca-se os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro. Além disso, esses materiais possuem geralmente transparência eletromagnética, especialmente nas frequências de micro-ondas e rádio, o que justifica em aplicações em radomes onde essas propriedades são necessárias [13].

Junto a essa configuração, pode-se agregar outras funcionalidades, como por exemplo, o compromisso com o desempenho eletromagnético. Sob essa condição, os materiais metálicos têm um papel de destaque por conta de suas propriedades elétricas e magnéticas. Dentre esses materiais inclui-se o Al que, além de sua característica relacionada a excelente relação resistência/peso para aeronaves, pode ser empregado como uma fase no compósito para que se adquira um metamaterial com comportamento eletromagnético através de uma configuração de LFM [14].

Metamateriais com estruturas projetadas podem manipular ondas eletromagnéticas de formas específicas, incluindo a filtragem de certas frequências [10,15]. O desempenho eletromagnético pode ser consideravelmente melhorado com a configuração de superfície seletiva de frequência (FSS – do inglês Frequency Selective Surface) definida por arranjos periódicos de elementos estruturais, projetados para manipular ondas eletromagnéticas. Essas estruturas podem controlar a amplitude, a fase e a polarização das ondas que interagem com elas, possibilitando funcionalidades avançadas como focagem de sinais, redirecionamento de ondas e redução de reflexões indesejadas [10,16].

Nos últimos anos, o uso de metamateriais tem sido proposto para serem combinadas com radomes para reduzir seus efeitos negativos no desempenho da antena, ou mesmo como radomes propriamente ditos [17,18]. Nesta proposta, a configuração LFM é uma abordagem promissora para criar um sistema metamaterial que combina desempenho estrutural e eletromagnético para antenas 5G.

Baseado no que foi exposto anteriormente, este projeto tem como objetivo geral, o desenvolvimento de um radome filtrante com base em metamateriais LFM para antenas 5G (24–27 GHz). Para alcançar o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos: (i) modelar e simular FSS em diferentes geometrias, (ii) produzir amostras de compósitos fibra-resina e laminados LFM, (iii) avaliar o desempenho eletromagnético dos materiais, (iv) produzir e validar o protótipo do radome e (v) publicar os resultados e formar alunos em iniciação científica.

O projeto será desenvolvido em parceria com o Grupo MAPA/INPE, com a FATEC SJC fornecendo infraestrutura e envolvendo alunos em estudos de simulação e produção de protótipos, enquanto o INPE realizará análises físico-químicas e testes de desempenho. Espera-

se demonstrar a eficácia do radome em ambiente operacional (TRL 7) após validação do radome em diferentes configurações e geometrias (TRL 3). Este projeto visa posicionar o Centro Paula Souza como um centro de excelência na formação de profissionais para o setor aeronáutico na região de São José dos Campos com impactos nas tecnologias de ponta do Brasil.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Para a produção dos laminados fibra e resina serão utilizados tecidos de fibras da Fibertex e resina epóxi. Neste processo a ser realizado por laminação hand lay up, será usado um sistema de vácuo que se constitui por um conjunto de materiais, tais como, peel ply, filme plástico respirador, manta absorvedora e filme plástico para envolver esse conjunto.

Para a produção das amostras de FSS serão utilizadas lâminas de alumínio com 0,3 mm de espessura.

2.2. Metodologia

As amostras de laminados fibra e resina serão processadas por laminação hand lay up usando diferentes quantidade relativas de fibra e resina, gramatura e arranjos do tecido de fibra de vidro. O processo de cura do laminado será realizado usando bolsa de vácuo. O processo de laminação e aplicação da bolsa de vácuo serão realizados no Laboratório de Materiais Compósitos e Reciclagem da FATEC SJC. Essas amostras serão submetidas a caracterização eletromagnética em guia de onda na faixa de frequência de 24 a 27 GHz.

O comportamento eletromagnético das FSS será analisado por modelagem e simulação utilizando o software FEKO® na faixa de frequência de 24 – 27 GHz estudando a influência de diferentes geometrias, dimensão e quantidade de elementos e produzidas empregado o processo de Controle Numérico Computadorizado (CNC). Após essa etapa, as FSS serão empregadas para preparar os laminados fibra e resina conforme o método de laminação Hand Lay Up descrito anteriormente e submetidas a caracterização eletromagnética usando o sistema de espaço livre, na faixa de frequência de 24 a 27 GHz

A caracterização eletromagnética será feita utilizando um analisador de rede vetorial (ou Vector Network Analyzer – VNA). As medidas serão realizadas através de 2 métodos: o método de guia de onda com o uso do KIT X11644 da empresa Keysight® e o método de espaço livre com o uso de antenas cornetas Banda X com lentes, da empresa ANTERAL®.

A caracterização eletromagnética usando o sistema de guia de onda será feita para medir as propriedades de permissividade elétrica complexa relativa e a permeabilidade magnética complexa relativa, bem como para calcular os índices de tangente de perda elétrica e tangente de perda magnética para comparação da eficiência dos mecanismos de perda de energia. Também serão medidos os índices de refletância, absorbância e transmitâncias das amostras.

A caracterização eletromagnética realizada no espaço livre será por ensaios de refletância na faixa de frequência de 24 a 27 GHz para avaliar o potencial de atenuação da onda. Os resultados obtidos serão comparados com aqueles obtidos usando o guia de onda para confirmar, de forma, mais aplicada, o desempenho do material para aplicações em atenuadores de onda.

O protótipo de radome será produzido utilizando a geometria do radome simulado em sistema de espaço livre com a melhor configuração de fibra, resina e FSS para o desempenho eletromagnético do radome que será analisado usando Analisador de Rede Vetorial (VNA) para avaliar a compatibilidade eletromagnética. Além disso, ajustes baseados nos resultados dos

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

testes práticos do protótipo de radome serão realizados para melhorar o desempenho e repetições do ciclo de simulações e testes para o refinamento contínuo e o desempenho físico-químico será avaliado por ensaios mecânicos de tração, compressão e fadiga, ensaios de resistência ao calor e umidade usando um equipamento de acondicionamento ambiental.

A demonstração em ambiente operacional (TRL 7) será feita integrando a versão refinada do radome aplicada em antena 5G testada no Laboratório MAPA/INPE. Serão realizados testes de campo para validar o desempenho em condições reais de operação.

Por fim, serão documentados todo o processo de desenvolvimento e resultados obtidos e disseminados os resultados através de publicações científicas, apresentação em conferências e caso possível solicitar um pedido de patente.

3. Resultados e Discussão

Com a execução deste projeto, espera-se produzir um radome filtrante para antenas 5G de alto desempenho estrutural e eletromagnético que opere na faixa de frequência de aproximadamente 24 GHz a 27 GHz e atendam aos requisitos e performance no Plano de Uso do Espectro de Radiofrequências (2024).

Na primeira etapa do projeto, espera-se produzir LFM com diferentes composições de fibra de vidro e resina epóxi para determinar a combinação com maior transparência eletromagnética e resistência mecânica e a proporção ideal de reforço para maximizar a transmitância e minimizar perdas por reflexão/absorção.

Para que opere na faixa de frequência de 24 GHz a 27 GHz, espera-se produzir LFM usando FSS com geometrias otimizadas por meio de simulação e validação por meio de medidas de parâmetros como permissividade elétrica complexa, permeabilidade magnética, tangente de perda, refletância, transmitância e absorbância para que se obtenha uma estrutura que atinja valores de transmitância acima de 90% na banda alvo e atenuação seletiva fora dela.

Quanto ao desempenho mecânico e ambiental espera-se que se obtenha um LFM que adquira resistência a tração superior a 250 MPa, módulo acima de 10 GPa e resistência a fadiga superior a 10^6 ciclos, com tolerância a umidade e variações térmicas sem perda de desempenho eletromagnético. Com esse LFM, visa-se a produção de um radome com espessura inferior a 5 mm, peso de aproximadamente 1,5 kg, conformação curvilínea compatível com aeronaves leves e compatibilidade com antenas 5G validada em ambientes de testes.

O projeto visa alcançar o Technology Readiness Level (TRL) 7, demonstrando a funcionalidade do radome filtrante em condições reais de operação, validando sua eficiência e viabilidade prática.

Espera-se que com a execução deste projeto venha a contribuir para

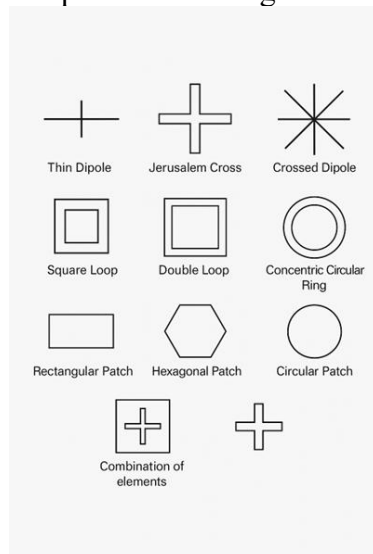
- a) a área acadêmica com a publicação de artigos em periódicos científicos Qualis, participação e apresentação de trabalhos em eventos técnico/científico, publicação de trabalhos completos e resumos em anais, palestras ministradas, estágios, orientações de iniciação científica e tecnológica, trabalhos de graduação, participação em banca de defesa de trabalho de graduação, mestrado e doutorado;
- b) educacional com a preparação de aulas teóricas e práticas mais bem elaboradas para as disciplinas dos cursos em Tecnologia em Materiais Avançados e Projetos de Estruturas Aeronáuticas, desenvolvimento de novas habilidade no âmbito pessoal dos alunos que estiverem efetivamente participando do projeto, que incluem: análise crítica, flexibilidade, iniciativa, polivalência, técnicas de comunicação, capacidade de improvisação, criatividade, comprometimento, além das habilidades técnicas que serão adquiridas, que inclui a preparação das amostras, realização de ensaios

- mecânicos e físico-químicos, produção do protótipo e validação do radome.
- c) econômica com a redução de custos com o desenvolvimento de um sistema eficiente a partir da modelagem e simulação computadorizada, aumento da capacidade e eficiência e crescimento do setor aeronáutico com autonomia no processo produtivo de radome que atualmente não é produzida no Brasil.
 - d) inovativa com o desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação com desempenho eletromagnético para drones e veículos eVTOL.
 - e) ambiental: práticas sustentáveis no desenvolvimento tecnológico, como a minimização da produção de amostras físicas e redução dos custos energéticos através do uso de simulações avançadas.

Espera-se que o desenvolvimento deste projeto mobilize todo o conhecimento científico e tecnológico para resolução do problema que está na fronteira do conhecimento. Este projeto possui alta aplicabilidade uma vez que a indústria aeronáutica tem interesse em melhorar e adequar as tecnologias de drones e veículos eVTOL para um desenvolvimento tecnológico cada vez mais atuante.

Os resultados iniciais da pesquisa sobre o tema do projeto envolveram um levantamento bibliográfico sobre os tipos de FSS e suas características a serem modelados e simulados na faixa de 24 GHz a 27 GHz. A Figura 1 ilustra tipos de FSS com geometrias otimizadas que serão modeladas e simuladas em diferentes geometrias, dimensão e quantidade de elementos quanto ao desempenho eletromagnético.

Fig. 1 – Tipos de FSS para desempenho eletromagnético como elementos filtrantes [19].



Fonte: (Adaptado de Campus, 2009).

Ressalta-se que essas condições refletem diretamente sobre o comportamento da onda eletromagnética incidente sobre a estrutura que exercerá a função de filtragem da onda dentro da faixa de frequência de interesse.

4. Considerações finais

Este projeto representa uma iniciativa estratégica para o avanço tecnológico do setor aeronáutico nacional, com a proposta em desenvolver um material multifuncional baseado em LFM alinhado às demandas futuras de conectividade e sustentabilidade. A abordagem integradora entre modelagem, simulação e prototipagem oferecerá não apenas resultados

acadêmicos e científicos, mas também impactos sociais e econômicos. A parceria entre FATEC SJC e MAPA/INPE vem proporcionando uma infraestrutura e expertise necessária para o sucesso da proposta, potencializando a formação de recursos humanos e a inovação em materiais estruturais com função eletromagnética. Com os objetivos alcançados, o Brasil poderá avançar rumo à independência tecnológica na produção de sistemas de proteção para comunicação aeronáutica de última geração.

Agradecimentos

Agradeço ao Centro Paula Souza e a FATEC SJC por oportunizar o desenvolvimento desse projeto de pesquisa e ao Grupo MAPA/INPE por colaborar e disponibilizar recursos materiais e infra-estrutura física para que seja possível a execução desse projeto de pesquisa.

Referências

- [1] ETRI, H.E. et al. A state-of-the-art review on mechanical characteristics of different fiber metal laminates for aerospace and structural applications. **Int J Adv Manuf Technol**, v. 123, p. 2965–2991, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10277-1>
- [2] ASUNDI, A.; CHOI, Y.N. Fiber Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, Issues 1-3, p. 384-394, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02652-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02652-0)
- [3] NARROW, J. J.; JORDAN, J. B.; KURFESS, T. R.; HUANG, Y. Advanced manufacturing for aerospace and defense: Fiber metal laminates. **Journal of The Minerals, Metals & Materials Society**, v. 70, n. 11, p. 2325-2333, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41777-018-0040-x>
- [4] DROSSLER, R.; WAFER, R.; KRAHL, M.; HAIDER, D. Tool Technology for Lightweight Structures in 3-D Hybrid Designs. **Lightweight Design Worldwide**, v. 11(5), p. 42–47, 2018. <http://doi.org/10.1007/s41777-018-0040-x>
- [5] FAYZULLA, B.J.; EROGLU, M.; QADER, I.N. Multifunctional Properties of Metal Fibers Reinforced Polymer Composites – A Review. *Mechanics of Advanced Composite Structures*, v.11, p. 217 – 230, 2024. https://macs.semnan.ac.ir/article_8141.html
- [6] DOO, J. T. et al. NASA Electric Vertical Takeoff and Landing (eVTOL) Aircraft Technology for Public Services – A White Paper. Ames Research Center, 2021. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205000636/downloads/2021-08-20-eVTOL-White-Paper-Final_V48.pdf. Acesso em: 12 abr. 2025.
- [7] KUMARI, J.; HABEE, S.; ZAINA, K. 5G Technology Effects on Aircraft. *International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology*, v. 12, n.1, p. 297-301, 2024. <https://doi.org/10.55524/CSISTW.2024.12.1.52>
- [8] JEONG, H.; NGUYEN, T.T.; LIM, S. Meta-Dome for Broadband Radar Absorbing Structure. **Sci. Rep.** v. 8, p.17893, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36273-8>
- [9] COS GOMES, M.E.; BERDASCO, A.F.; LAS-HERAS ANDRES, F. **Metasurface-Based Radome for Wearable Antenna at 24 GHz**. META 2023. Disponível em <https://hdl.handle.net/10651/71993>. Acesso em 01ago2024.
- [10] MARTINEZ, A.G.; GARCIA, M.P.; REBENAQUE, D.C.; TORNERO, L.G. Metasurface Antenna for Fast Frequency Scanning with Application to Conical Direction Finding. **In IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 22, no. 7, pp. 1632-1636, 2023, [doi: 10.1109/LAWP.2023.3254433](https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3254433)

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

- [11] JOHNSON, R.C. **Antenna Engineering Handbook**, 3 ed. New York: McGraw-Hills, 1993.
- [12] LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência Tecnologia**. 2 ed., São Paulo: Blucher, 2016. ISBN-13: 9788521210788.
- [13] MILINKA, E., SIWAK, M. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of carbon-fibre-reinforced polymer composites—a topical review. **J Mater Sci: Mater Electron**, v. 32, p. 24585–24643, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06900-8>
- [14] WANG, Y.J., ZHU, P.L.; HU, Y.G.; ZHAO, T.; SUN, R.; WONG, C.P. Electromagnetic interference shielding materials: recents, progress, structure design and futures perspective. **J. Mater. Chem. C**, v. 10, p. 44-72, 2022. <https://doi.org/10.1039/D1TC04702G>
- [15] HE, Y.; ELEFThERIADES, G. V., A Thin Double-Mesh Metamaterial Radome for Wide-Angle and Broadband Applications at Millimeter-Wave Frequencies. In **IEEE Trans. Antennas Propag**, v. 68, n. 3, p. 2176-2185, 2020. <http://doi.org/10.1109/TAP.2019.2951491>
- [16] ÖZIZ, E., OSIPOV, A. V.; EIBERT, T. F. Metamaterials for Microwave Radomes and the Concept of a Metaradome: Review of the Literature, **International Journal of Antennas and Propagation**. v 2017, Article ID 1356108, 13 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1356108v.2017.p.1-13.2017>
- [17] BAH, A.O., QIN, P.Y., ZIOLKOWSKI, R.W., CHENG, Q.; GUO, Y.J. Realization of an Ultra-thin Metasurface to Facilitate Wide Bandwidth, **Wide Angle Beam Scanning**. Sci. Rep. v. 8, p. 476, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23288-4>
- [18] CAMERON, T. R.; ELEFThERIADES, G. V. Analysis and Characterization of a Wide-Angle Impedance Matching Metasurface for Dipole Phased Arrays. In **IEEE Trans. Antennas Propag**. v. 63, p. 3928–3938, 2015. <http://doi.org/10.1109/TAP.2015.2448231>
- [19] CAMPUS, A. **Superfícies seletivas em frequência: análise e projeto**. Natal:IFRN Editora, 2009.