

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**DANIEL FELIPE DA SILVA PINTO
WELINGTON PEDRO DA SILVA**

**MATERIAL FILTRANTE PARA RADOME COM BASE EM
METAMATERIAL DE LAMINADO FIBRA METAL PARA
ANTENAS 5G EM AERONAVES – UM ESTUDO DA
CONFIGURAÇÃO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE
FREQUÊNCIA**

São José dos Campos
2025

**DANIEL FELIPE DA SILVA PINTO
WELINGTON PEDRO DA SILVA**

**MATERIAL FILTRANTE PARA RADOME COM BASE EM
METAMATERIAL DE LAMINADO FIBRA METAL PARA
ANTENAS 5G EM AERONAVES – UM ESTUDO DA
CONFIGURAÇÃO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE
FREQUÊNCIA**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.

**Orientador: Dr. Jorge Tadao Matsushima
Coorientador: Dr. Braulio Haruo Kondo Lopes**

São José dos Campos
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Pinto, Daniel Felipe Da Silva

Silva, Welington Pedro

MATERIAL FILTRANTE PARA RADOME COM BASE EM METAMATERIAL DE LAMINADO FIBRA METAL PARA ANTENAS 5G EM AERONAVES – UM ESTUDO DA CONFIGURAÇÃO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE FREQUÊNCIA. São José dos Campos, 2025.

61f

Trabalho de Graduação – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronauticas.

FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal, 2025.

Orientador: Dr. Jorge Tadao Matsushima

Coorientador: Dr. Bráulio Haruo Kondo Lopes

1. Metamaterial. 2. Frequência Seletiva de Superfície. 3. Radome. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. Divisão de Informação e Documentação. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Silva Pinto, D. F.; Silva, W. P; MATERIAL FILTRANTE PARA RADOME COM BASE EM METAMATERIAL DE LAMINADO FIBRA METAL PARA ANTENAS 5G EM AERONAVES – UM ESTUDO DA CONFIGURAÇÃO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE FREQUÊNCIA. 2025. 61f. Trabalho de Graduação - FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal.

CESSÃO DE DIREITOS

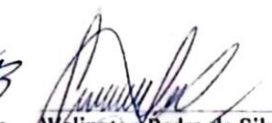
NOME(S) DO(S) AUTOR(ES): Daniel Felipe da Silva Pinto; Welington Pero da Silva

TÍTULO DO TRABALHO: Título do MATERIAL FILTRANTE PARA RADOME COM BASE EM METAMATERIAL DE LAMINADO FIBRA METAL PARA ANTENAS 5G EM AERONAVES – UM ESTUDO DA CONFIGURAÇÃO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE FREQUÊNCIA.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Graduação/2025.

É concedida à FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal permissão para reproduzir cópias deste Trabalho e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho pode ser reproduzida sem a autorização do autor.


Daniel Felipe da Silva Pinto
Rua Guararapes
12215-250, São José dos
Campos- SP


Welington Pedro da Silva
Praça Bahía São Salvador
12238-090, São José dos
Campos- SP

**DANIEL FELIPE DA SILVA PINTO
WELINGTON PEDRO DA SILVA**

**MATERIAL FILTRANTE PARA RADOME COM BASE EM
METAMATERIAL DE LAMINADO FIBRA METAL PARA
ANTENAS 5G EM AERONAVES – UM ESTUDO DA
CONFIGURAÇÃO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE
FREQUÊNCIA**

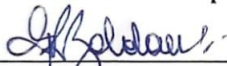
Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.



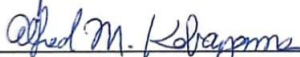
Dr. Jorge Tadao Matsushima – Fatec São José dos Campos



Dr. Brauilo Haruo Kondo Lopes – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE



Dr. Mauricio Ribeiro Baldan - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE



Dr. Alfred Makoto Kabayama - Fatec São José dos Campos

01 / 12 / 2025

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus pelo dom da vida e por colocar em nosso caminho pessoas extraordinárias que contribuíram de forma significativa para a realização deste estudo.

Manifestamos nossa profunda gratidão ao nosso orientador, Prof. Dr. Jorge Tadao Matsushima, e ao nosso coorientador, Dr. Braulio Haruo Kondo Lopes, pelos valiosos conselhos, pela dedicação incansável e pelo apoio constante em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho de graduação.

Estendemos nossos agradecimentos ao Grupo de Materiais Avançados e Pesquisas Espaciais (MAPA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por ter disponibilizado os meios técnicos e a infraestrutura essencial para a execução desta pesquisa.

Agradecemos, ainda, à Profa. Dra. Divani Barbosa Gavinier, da Fatec Taubaté, pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e pela orientação no uso do software FEKO, fundamentais para a consolidação das análises eletromagnéticas realizadas.

RESUMO

A crescente adoção de aeronaves elétricas, como drones e veículos eVTOL, tem impulsionado o desenvolvimento de materiais estruturais com propriedades multifuncionais, que combinem leveza, desempenho mecânico e compatibilidade eletromagnética (EMC). Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e análise de radomes filtrantes compostos por Laminados de Fibra Metal (LFM) integrados a Superfícies Seletivas de Frequência (FSS), otimizadas para operação na faixa de 24 a 27 GHz, correspondente à tecnologia 5G. Foram simuladas e manufaturadas quatro geometrias distintas de FSS do tipo abertura: dipolo, dipolo cruzado, trípolo e cruz de Jerusalém, aplicadas sobre lâminas de alumínio e integradas a laminados de fibra de vidro com resina epóxi, utilizando o processo de laminação manual com bolsa de vácuo. As propriedades eletromagnéticas do material foram obtidas por meio de ensaios em guia de onda e medições em sistema de espaço livre, sendo os coeficientes de transmissão (S_{21}) analisados via simulação no software FEKO. Os resultados revelaram que a Cruz de Jerusalém foi a única geometria que apresentou coincidência entre a frequência simulada e a medida (25,5 GHz), com baixa perda de transmissão (apenas 4%), destacando-se como a mais estável frente às condições reais de medição. As demais geometrias apresentaram deslocamentos espectrais e perdas variáveis, com destaque para o dipolo (deslocamento de 0,9 GHz e perda de 32%) e o trípolo (1,2 GHz e 40%). Além disso, foi observada forte correlação entre a complexidade geométrica das FSS e o tempo de usinagem CNC, impactando a viabilidade prática de fabricação. O estudo demonstrou a viabilidade técnica da integração entre estruturas FSS e laminados LFM para aplicações em radomes filtrantes aeronáuticos, oferecendo soluções promissoras para estruturas 5G que demandam seletividade espectral e robustez mecânica, contribuindo para o avanço da compatibilidade eletromagnética embarcada.

Palavras-Chave: - Laminados de Fibra Metal; Radomes filtrantes; Superfície Seletiva de Frequência; Tecnologia 5G.

ABSTRACT

The increasing adoption of electric aircraft, such as drones and eVTOLs (Electric Vertical Take-Off and Landing vehicles), has driven the development of multifunctional structural materials that combine low weight, mechanical performance, and electromagnetic compatibility (EMC). In this context, the present work presents the development and analysis of filtering radomes composed of Fiber Metal Laminates (FMLs) integrated with Frequency Selective Surfaces (FSS), optimized for operation in the 24–27 GHz frequency range, which corresponds to 5G communication systems. Four distinct FSS geometries of the aperture type: dipole, crossed dipole, tripole, and Jerusalem cross, were simulated and fabricated over aluminum foils, then integrated into fiberglass/epoxy laminates using the vacuum bag hand lay-up method. The electromagnetic properties of the composite were obtained through waveguide tests and free-space measurement systems, and the transmission coefficients (S_{21}) were evaluated via full-wave simulations using FEKO software. The results showed that the Jerusalem cross was the only geometry to exhibit matching between the simulated and measured resonance frequency (25.5 GHz), with minimal transmission loss (4%), standing out as the most stable under real measurement conditions. The other geometries showed spectral shifts and varying transmission losses, with the dipole (0.9 GHz shift and 32% loss) and tripole (1.2 GHz and 40% loss) being the most affected. Additionally, a strong correlation was observed between the geometric complexity of the FSS and the CNC milling time, directly impacting the practical viability of large-scale fabrication. This study demonstrated the technical feasibility of integrating FSS structures with FMLs for aerospace filtering radome applications, offering promising solutions for 5G-compatible structures that require spectral selectivity and mechanical robustness, and contributing to the advancement of embedded electromagnetic compatibility technologies.

Keywords: Keywords: Laminated Metal Fibers; Filtering Radomes; Frequency Selective Surface; 5G Technology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivo Geral	10
1.2. Objetivos Específicos	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	30
3.1. Pesquisa Bibliográfica	31
3.2. Seleção da FSS	32
3.3. Simulação Eletromagnética	32
3.4. Compósito Epóxi Reforçado com Tecido de Vidro -Processo de Laminação Manual à Vacuo	33
3.5. Caracterização eletromagnética da CERFV usando o método de guia de onda	34
3.6. Elaboração das Geometrias da FSS no CATIA V5	35
3.7. Extrusão da geometria das FSS	35
3.8. Parametrização das dimensões	36
3.9. Verificação da integridade geométrica	36
3.10. Exportação do modelo	36
3.11. Procedimento para a Simulação Eletromagnético na FEKO	36
3.11.2 Configuração dos Parâmetros de Frequência	38
3.11.3 Definição da Fonte de Excitação	38
3.11.4 Geração e Verificação da Malha de Discretização	39
3.11.5 Execução da Simulação	40
3.11.6 Pós-Processamento e Extração dos Resultados	40
3.12. Manufatura das FSS	41
3.13. Caracterização eletromagnética das FSS	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Geometria e Manufatura das FSS	43
4.2. Simulação Eletromagnética usando o software FEKO	44
4.3 Comparação entre Simulação e Medição Experimental das FSS	53
5. CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

Na era tecnológica atual, a crescente demanda por novos materiais multifuncionais é reconhecida como um fator importante no desenvolvimento de aeronaves elétricas, incluindo drones e veículos eVTOL (Veículos Elétricos de Decolagem e Pouso Vertical). Neste contexto, os materiais compósitos multifuncionais, em especial, os Laminados de Fibra Metal (LFM), estão sendo destacados por suas propriedades de leveza, resistência e multifuncionalidade (ETRI et al., 2022; COSTA et al., 2023). A valorização dos LFM na indústria aeronáutica é atribuída à sua capacidade de reduzir o peso e o número de peças, ao mesmo tempo em que oferecem superioridade em características como fadiga, resistência à corrosão e ao fogo (ASUNDI, CHOI, 1997; NORROW et al., 2018; DING et al., 2021; DROSSLER et al.; 2018). Essas propriedades tornam os LFM candidatos atraentes para futuras estruturas aeronáuticas.

Adicionalmente, a necessidade de atender a novas regulamentações relacionadas às emissões atmosféricas e à economia de recursos naturais é enfatizada, levando a indústria aeronáutica a buscar soluções inovadoras. A importância do desempenho eletromagnético é igualmente ressaltada, uma vez que a comunicação nas aeronaves está cada vez mais voltada para tecnologias sem fio, como o 5G, que opera em frequências mais altas. Portanto, a demanda por materiais que garantam compatibilidade eletromagnética, além de proteger contra ondas eletromagnéticas indesejáveis, é amplamente reconhecida.

Neste cenário, o desenvolvimento de radomes filtrantes baseados em metamateriais LFM para antenas 5G se torna um objetivo relevante, com a expectativa de que esses novos sistemas atendam às exigências tecnológicas e estruturais das aeronaves modernas. 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 (OZIZ, OSIPOV, EIBERT, 2017; MARTINEZ et, al; 2023).

Esta proposta de trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de um radome filtrante para antenas 5G e para a autonomia tecnológica do Brasil no setor aeronáutico, posicionando o país como líder em tecnologias avançadas de blindagem eletromagnética, ao mesmo tempo em que promove o desenvolvimento sustentável de sistemas mecanicamente resistentes e leves.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo consiste no estudo da configuração FSS como uma interface no desenvolvimento de materiais filtrantes para radomes inspirados em metamateriais LFM para antenas 5G na faixa de frequência entre 24 e 27 GHz, visando aplicações em estruturas aeronáuticas. Essa proposta busca estudar o comportamento eletromagnético através de modelagem e simulação de arranjos espaçados entre os elementos estruturais, projetados para manipular ondas eletromagnéticas utilizando o *software* FEKO.

1.2. Objetivos Específicos

Para a consecução deste objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre os atuais materiais no revestimento do radome.
- Selecionar os materiais (fibra, resina e lâmina metálica) e de geometria de FSS para a faixa de frequência de 24 a 27 GHz.
- Fabricar as amostras em material LFM com diferentes quantidades relativas de fibra e resina, gramatura e arranjos do tecido de fibra de vidro para medir no sistema de guia de onda, na faixa de frequência de 24 a 27 GHz.
- Realizar a modelagem e simulação de diferentes geometrias de FSS variando a dimensão e quantidade de elementos de superfície para a faixa de frequência de 24 a 27 GHz.
- Simular o desempenho eletromagnético dos materiais caracterizados e as FSS.
- Comparar os resultados simulados e medidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente demanda por aeronaves mais leves, seguras, autônomas e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de materiais multifuncionais com alto desempenho estrutural. Drones e veículos eVTOL (Veículos Elétricos de Decolagem e Pouso Vertical) representam uma nova geração de aeronaves que exigem soluções estruturais que combinem leveza, resistência e funcionalidade integrada (ETRI et al., 2022). Esses requisitos são potencializados pelas normas internacionais que exigem eficiência energética, redução de emissões e uso consciente de materiais. Como resultado, observa-se uma tendência na substituição de materiais metálicos convencionais por compósitos avançados, especialmente aqueles capazes de responder simultaneamente a exigências mecânicas e funcionais, como por exemplo, os LFM.

2.1. Laminados Fibra Metal

LFM são materiais híbridos compostos por camadas alternadas de metais, principalmente alumínio e titânio, intercaladas com camadas de fibras como vidro, carbono ou aramida. O desenvolvimento dessa classe de materiais visa explorar as vantagens específicas de cada constituinte, resultando em um desempenho superior, especialmente em aplicações na indústria aeronáutica, que demanda estruturas leves, de alta resistência mecânica e durabilidade elevada (VLOT; GUNNINK, 2001)

A eficácia dos LFM reside na combinação das propriedades individuais do metal e da fibra. O metal contribui com elevada resistência ao impacto, boa ductilidade e proteção contra corrosão. Por sua vez, as fibras proporcionam alta resistência mecânica, rigidez elevada e excelente desempenho à fadiga. Essa junção de materiais com características distintas origina uma estrutura híbrida capaz de oferecer benefícios que não seriam plenamente alcançados por cada material isoladamente (ALDERLIESTEN, 2017).

Dentre os tipos de LFM, destacam-se o GLARE (*Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy*) e o ARALL (*Aramid Reinforced Aluminum Laminate*), amplamente utilizados na indústria aeronáutica. O GLARE, composto por alumínio e fibra de vidro apresenta elevada resistência à fadiga, alta tenacidade e capacidade de retardar a propagação de trincas. Estudos de Hagenbeek et al (2006) indicam que o GLARE possui resistência à tração acima 1200 MPa e módulo de elasticidade de 50~60 GPa, com uma massa específica baixa, aproximadamente $2,5\text{g/cm}^3$. O ARALL, formado por alumínio e fibras de aramida, destaca-se por sua maior resistência a impactos e à fadiga, além de ser ainda mais leve, com

densidade em torno de $2,3 \text{ g/cm}^3$. Segundo Vogelesang e Vlot (2000), o ARALL apresenta resistência à tração de 700~1000 MPa e módulo de elasticidade de cerca de 55 GPa.

A aplicação de LFM no setor aeroespacial é recorrente, dada a necessidade de atender a requisitos rigorosos, como leveza, resistência estrutural e confiabilidade. Um exemplo notável é o Airbus A380, que emprega GLARE em partes de sua fuselagem. A adoção desse material contribui para a redução do peso total da aeronave, prolonga a vida útil estrutural e diminui os custos de manutenção (HASHAGEN et al., 2007).

As propriedades únicas decorrentes da combinação de metais e fibras tornam os LFM materiais estratégicos para aeronaves que operam sob condições adversas e exigem baixos riscos de falhas estruturais.

Na combinação do metal com fibras em um LFM, as propriedades se tornam superiores devido ao efeito sinérgico observado na estrutura híbrida.

O metal, especificamente, o alumínio na forma de lâminas com baixa espessura, apresenta como funções, a atuação como camada metálica que fornece a rigidez básica e resistência a deformação plástica, aliada a resistência ao impacto que garante ductibilidade, a proteção contra corrosão que serve como barreira protetora contra ambientes agressivos, a condutividade térmica e elétrica que auxilia na dissipação de calor e no controle de cargas eletrostáticas, o que pode ser relevante em aeronaves (ANNAMALAI et al., 2021).

Já as fibras, em especial tecidos de vidro, apresenta como principais funções, a resistência a tração e a fadiga que contribui com alta resistência mecânica e elevada durabilidade à fadiga, uma das principais falhas em estruturas aeronáuticas submetidas a ciclos de carga, a rigidez específica que proporciona alta rigidez com baixo peso, ajudando a manter o material leve, ao retardo na propagação de trincas que age como barreira ao crescimento e trincas, atuando de forma importante no mecanismo de fratura e ao isolamento elétrico, já que as fibras de vidro não conduzem eletricidade, o que pode ser vantajoso em certas zonas da aeronave (WU; YANG, 2005).

A combinação dessas duas fases resulta em um material com propriedades superiores às das fases individuais, o que configura um efeito sinérgico conforme é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do alumínio e da fibra de vidro e o efeito sinérgico na combinação do GLARE.

Propriedade	Alumínio	Fibra de Vidro	GLARE (Combinação)
Densidade	Média (~2,7 g/cm ³)	Baixa (~2,5 g/cm ³)	Reduzida em relação a ligas metálicas convencionais
Resistência à fadiga	Média	Alta	Muito alta
Ductilidade	Alta	Baixa	Compensada, equilíbrio entre rigidez e deformabilidade
Tenacidade à fratura	Moderada	Alta resistência à trinca	Excelente, trinca é defletida nas interfaces
Resistência ao impacto	Boa	Baixa	Muito boa, especialmente em condições multiaxiais
Retardamento de propagação de trinca	Baixa	Alta	Sinérgica, trincas desviam nas interfaces fibra/metal

Fonte: Autores (2025)

Em termos gerais, a função do alumínio no GLARE é conferir resistência ao impacto, ductilidade e proteção superficial, enquanto a fibra de vidro contribui com resistência à tração, rigidez e resistência à fadiga. A interface entre esses dois materiais impede a propagação direta de trincas, prolongando a vida útil do componente. Esse comportamento é essencial em aplicações aeronáuticas, onde redução de peso, resistência mecânica e segurança contra falhas catastróficas são cruciais.

Dessa forma, os LFM representam um salto significativo na engenharia de materiais, ao aliarem leveza, segurança e durabilidade. Sua versatilidade também os credencia para aplicações em outros setores tecnológicos que demandam materiais de alto desempenho.

Além de suas qualidades mecânicas, os LFM podem conferir outras propriedades fundamentais na configuração de um metamaterial. Essa configuração, hoje, representa um avanço tecnológico, pois permite que esse material adquira, além da exigência mecânica, propriedades eletromagnéticas capazes de adquirir funcionalidades como materiais de compatibilidade eletromagnética, como por exemplo, filtros eletromagnéticos.

Recentemente, têm sido desenvolvidos LFM com desempenho eletromagnético customizado, especialmente úteis em estruturas de radomes aeronáuticos, elementos que protegem antenas, sensores e sistemas de comunicação de alta frequência. A estrutura em camadas dos LFM pode ser adaptada para incorporar FSS, permitindo que o radome atue simultaneamente como filtro passivo de ondas eletromagnéticas, além da proteção estrutural leve, sem comprometer a aerodinâmica ou a integridade dos sistemas embarcados (CHE et al., 2025).

Essa capacidade de integrar propriedades estruturais e funcionais torna os LFM particularmente adequados para aeronaves modernas, que demandam não apenas redução de peso e aumento da vida útil estrutural, mas também compatibilidade eletromagnética com sistemas 5G, radares de banda Ka e sensores avançados. Um exemplo emblemático dessa abordagem é o Airbus A380, que emprega GLARE em diversas partes de sua fuselagem, com ganhos expressivos em leveza, durabilidade e economia em manutenção (WANG; LI, 2004; VLOT; GUNNINK, 2001).

Portanto, os LFM representam um avanço notável na engenharia de materiais ao oferecer uma plataforma versátil que combina resistência mecânica, leveza, durabilidade e funcionalidade eletromagnética. Essa multifuncionalidade é crucial não apenas para o setor aeronáutico, mas também para aplicações emergentes em drones, veículos eVTOL, sistemas espaciais e defesa, onde desempenho estrutural e eletromagnético devem coexistir harmonicamente.

2.2. Compatibilidade Eletromagnética em Aeronaves

A evolução acelerada das tecnologias de comunicação sem fio, impulsionada pela implementação da rede 5G, tem promovido transformações significativas no setor aeroespacial, especialmente no desenvolvimento de aeronaves não tripuladas (UAVs) e veículos elétricos de decolagem e pouso vertical (eVTOLs). A crescente integração de sistemas de comunicação embarcados, como antenas inteligentes, enlaces de dados de alta velocidade e conectividade Wi-Fi impõe exigências rigorosas em termos de compatibilidade eletromagnética, a fim de garantir o funcionamento seguro e eficiente dos sistemas de navegação, controle e comunicação diante de possíveis interferências eletromagnéticas.

A tecnologia 5G, quinta geração de redes móveis, representa um marco na comunicação sem fio ao permitir densidade de conexão superior a 1 milhão de dispositivos por quilômetro quadrado em cenários de comunicações massivas do tipo máquina-máquina, além de latência da ordem de 1 milissegundo em aplicações de comunicação ultra-confiável e de baixa latência e taxas de pico que podem atingir até 20 Gbps (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2017; TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE, 2019; LOGHIN *et al.*, 2020). Isso representa uma melhoria substancial em comparação com as velocidades oferecidas pelas redes 4G, que alcançam até 1 Gbps. Tais características a tornam essencial para aplicações críticas, como veículos autônomos, realidade aumentada e sensores embarcados conectados à Internet das Coisas (IoT), além de possibilitar o tráfego de dados em tempo real entre aeronaves e sistemas de controle em solo.

No entanto, a adoção dessa tecnologia requer infraestrutura específica, planejamento regulatório e mitigação dos efeitos de interferência.

A faixa de 24 GHz a 27 GHz, localizada na porção inferior da banda EHF (*Extremely High Frequency*), está entre as mais relevantes para aplicações aeroespaciais de curto alcance, como comunicação Wi-Fi de bordo entre antenas integradas em UAVs, eVTOLs e estações terrestres. A operação nessa faixa oferece alta capacidade de dados, porém impõe limitações de penetração e cobertura, exigindo soluções tecnológicas precisas para a propagação eficiente do sinal, principalmente em ambientes dinâmicos e sensíveis à EMI, como o interior de uma aeronave (YANG et. al, 2025; KANDREGULA et. al., 2024))

No contexto aeronáutico, a introdução do 5G vem sendo tratada com cautela, sobretudo devido ao potencial de interferência em instrumentos críticos, como os altímetros de rádio, que operam em faixas adjacentes e são fundamentais para operações de pouso e controle de altitude (KURZWEIL, 2024). Em resposta a essa preocupação, órgãos reguladores como a Federal Aviation Administration (FAA) propuseram medidas mitigadoras, como o uso de altímetros tolerantes à faixa C do 5G ou a instalação de filtros de frequência apropriados para proteger os sistemas embarcados (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Airworthiness Directives; MHI RJ Aviation ULC... Federal Register, 21 Mar. 2025). Ainda assim, a coexistência segura entre aviação e redes 5G continua sendo um desafio regulatório e tecnológico em constante avaliação (AIRWAYS MAGAZINE, 2022).

Paralelamente às questões regulatórias, a indústria aeronáutica tem explorado o uso do 5G não apenas para fins operacionais, como por exemplo, como a otimização da comunicação no cockpit e o monitoramento remoto de sistemas, mas também para melhorar a experiência dos passageiros, por meio da oferta de conectividade de alta velocidade durante o voo. No entanto, a viabilidade dessa integração depende diretamente da capacidade dos materiais aeronáuticos em controlar e filtrar seletivamente os sinais eletromagnéticos.

Sistemas que operam em bandas milimétricas, como os enlaces 5G de 24–27 GHz, tornam as aeronaves particularmente vulneráveis a interferências eletromagnéticas, especialmente quando não há uma proteção adequada nas estruturas que envolvem antenas e eletrônicos. A utilização de materiais compósitos multifuncionais com propriedades eletromagnéticas específicas, como os LFM ou compósitos condutivos com FSS torna-se essencial para garantir a blindagem seletiva, a transparência eletromagnética nas bandas de interesse e a proteção passiva contra interferência eletromagnética (MARTINEZ et al., 2023).

Além disso, o desenvolvimento de radomes e estruturas integradas com funcionalidades eletromagnéticas, capazes de atuar simultaneamente como parte da fuselagem e como filtros seletivos, representa um avanço promissor na arquitetura de aeronaves conectadas. Tais soluções devem ser projetadas com base em critérios como constante dielétrica, fator de perdas, espessura e resistência mecânica, além de atender às exigências de leveza, conformabilidade e resistência ambiental, típicas de aplicações aeronáuticas.

Em síntese, a incorporação da tecnologia 5G em aeronaves UAVs e eVTOLs abre um novo capítulo na integração entre comunicação de alta velocidade e sistemas embarcados. No entanto, sua implementação segura e eficiente requer não apenas inovações na infraestrutura e regulamentação, mas também avanços na engenharia de materiais voltados à compatibilidade eletromagnética, blindagem seletiva e multifuncionalidade estrutural.

2.3. Metamateriais e FSS

Os metamateriais são materiais artificiais projetados para exibir propriedades físicas, eletromagnéticas, mecânicas, térmicas, acústicas, entre outras, que não são encontradas em materiais naturais (MATEI et al., 2025). Essas propriedades incomuns não derivam unicamente da composição química dos constituintes, mas sim da estrutura geométrica submicrométrica ou periódica que os define. Tais estruturas podem interagir com campos externos de forma controlada, possibilitando comportamentos como índice de refração negativo, absorção seletiva e controle da direção de propagação de ondas.

Dentre as diversas configurações de metamateriais, destaca-se a classe das metassuperfícies, que se caracterizam por arranjos periódicos bidimensionais (2D) de aberturas ou elementos condutores sobre uma superfície plana. Essas estruturas são projetadas para manipular seletivamente a propagação de ondas eletromagnéticas, controlando propriedades como amplitude, fase, polarização e direção de propagação do campo incidente (ANWAR et al., 2018).

Um caso particular e amplamente utilizado de meta superfície é a FSS, que consiste em um padrão geométrico de elementos com geometrias específicas, podendo ser do tipo abertura (*slots*) ou condutor (*patches*), sobre uma camada dielétrica ou metálica (MUNK, 2000). A FSS atua como um filtro passivo, capaz de permitir a transmissão seletiva de determinadas faixas de frequência enquanto reflete ou atenua outras, dependendo da sua

topologia, periodicidade, espessura e parâmetros eletromagnéticos do substrato (ANWAR et al 2018).

O princípio de funcionamento de uma FSS está fundamentado na ressonância eletromagnética dos elementos estruturais. No caso das FSS com elementos do tipo abertura, a estrutura opera tipicamente como um filtro passa-faixa. À medida que os elementos atingem a frequência de ressonância, a superfície torna-se progressivamente transparente à onda incidente, culminando em transmissão máxima na frequência central da banda de operação. Por outro lado, as FSS compostas por elementos condutores funcionam como filtros rejeita-faixa, refletindo a energia incidente em sua frequência de ressonância, comportando-se como um espelho eletromagnético ou condutor perfeito (CAMPOS, 2009).

A aplicação de geometrias específicas e estruturas periódicas sobre superfícies metálicas ou dielétricas permite que as FSS controlem a polarização e a direção de propagação das ondas eletromagnéticas (ANWAR et al, 2018; YANG et al., 2019). Devido à sua espessura reduzida, muitas vezes na ordem de micrômetros, essas superfícies apresentam alto potencial de integração em sistemas aeronáuticos, espaciais e de telecomunicações, com impacto mínimo no peso e volume estrutural.

Além de suas funcionalidades como filtros, as FSS têm sido amplamente exploradas no desenvolvimento de metamateriais, permitindo o projeto de materiais artificiais com propriedades não disponíveis na natureza, como permissividade elétrica negativa ($\epsilon < 0$) ou permeabilidade magnética negativa ($\mu < 0$) (HANNAN et al., 2022; MISHRA, 2023; SHAKIBUL HASAN et al., 2024). Essa característica abre caminho para aplicações avançadas, como camuflagem eletromagnética, radomes filtrantes, absorvedores seletivos e antenas com diretividade aprimorada.

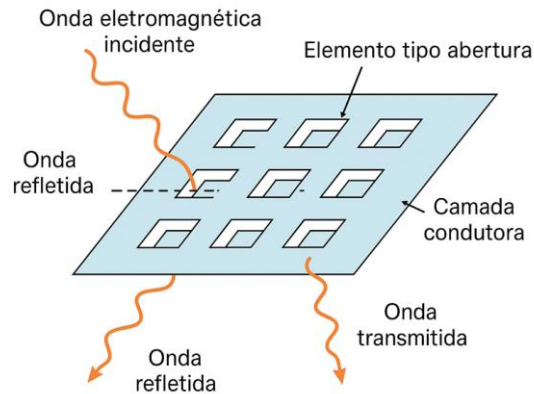
2.3.1. FSS com arranjo de elementos do tipo abertura (slot)

Este tipo de FSS se refere a uma estrutura onde a funcionalidade eletromagnética da FSS é definida por aberturas (ou vazios) recortadas em uma superfície condutora, geralmente metálica, dispostas de forma periódica sobre um substrato dielétrico ou diretamente em uma superfície condutora (MUNK, 2000).

A funcionalidade deste tipo de FSS consiste em bloquear ou ressoar com a onda incidente que funcionam como filtros passa-faixa baseados em ressonância por transmissividade, no qual elementos em forma de aberturas na superfície (slots) permitem ou bloqueiam seletivamente a passagem de ondas eletromagnéticas com base no comprimento de onda e no formato da abertura (MUNK, 2000). A Figura 1 representa

esquemáticamente uma FSS do tipo abertura com a incidência, reflexão e transmissão de onda eletromagnética.

Figura 1 – Representação esquemática de uma FSS do tipo abertura.



Fonte: Autores (2025)

Estruturalmente, este tipo de FSS é formada por uma camada condutora contínua, sobre a qual se faz aberturas recortadas com formatos geométricos diversos, como por exemplo, aberturas retangulares, circulares ou ovais e formas ressonantes específicas como anéis, cruzes, chevrons, etc, obedecendo um padrão de espaços, que as vezes são dispostos em um substrato dielétrico para suporte mecânico e controle de resposta em frequência.

Quanto a funcionamento, a onda eletromagnética incide sobre a abertura e induz correntes ao redor da borda da abertura, que por sua vez geram ressonância local. Nessa interação apenas frequências específicas são transmitidas através da abertura, enquanto as demais são refletidas ou atenuadas. Isso é análogo a um filtro passa-faixa. A resposta do arranjo pode variar com a polarização da onda incidente (vertical, horizontal, circular) e com o ângulo de incidência.

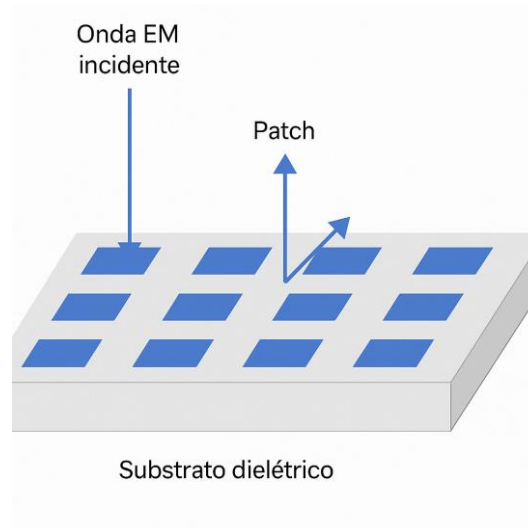
Com o ajuste do formato, dimensão, período do arranjo e características do substrato, pode-se projetar a FSS para permitir ou bloquear faixas específicas do espectro eletromagnético de forma a se comportar, como por exemplo, a transparência para 26 GHz, refletividade para sinais radar X ou Ku ou com função de polarização seletiva.

2.3.2. FSS com arranjo de elementos condutores (*patch*)

Uma FSS com um arranjo periódico formado por elementos condutores, também denominado de elementos do tipo patch refere-se a uma disposição de pequenas ilhas metálicas condutoras, geralmente quadradas, circulares, retangulares ou de geometria mais

complexas, depositadas sobre um substrato dielétrico (MUNK, 2000). Esses elementos funcionam como ressonadores eletromagnéticos planares, ajustados para interagir com ondas incidentes em determinadas frequências. Uma representação esquemática de uma FSS do tipo *patch* é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática de uma FSS do tipo patch.



Fonte: Autores (2025)

O arranjo *patch* funciona como um filtro rejeita-faixa atuando como uma barreira seletiva onde na frequência de ressonância, os patches podem refletir a onda, bloquear a transmissão ou em arranjos ajustados permitem a passagem da onda eletromagnética. O comportamento desse arranjo depende do tamanho do patch, do período entre os patches, da espessura e permissividade do substrato, da geometria do patch e da perda do material dielétrico e condutor do substrato (MUNK, 2000).

O patch deve possuir espessura desprezível em comparação com o comprimento de onda, embora ainda deva ser maior do que a profundidade de penetração da corrente (denominada de skin depth) no metal, que representa a profundidade até a qual a corrente elétrica penetre no material condutor, devido ao efeito peculiar em altas frequências. Essa profundidade de penetração de corrente (δ) é expressa pela Equação 1:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad \text{Equação 1}$$

onde ω é a frequência angular; μ é a permeabilidade magnética e σ é a condutividade elétrica. (LI,2022)

Caso o patch seja mais fino do que δ , ela não conduz corrente adequadamente e, desta forma, não se comportará um condutor ideal, prejudicando a ressonância da FSS. Ao garantir que a espessura do patch seja maior que δ assegura-se que a corrente fique confinada na camada externa, de forma que o elemento reflita ou transmita energia conforme projetado e o comportamento do patch se aproxima de um condutor perfeito. Portanto, quando o patch apresenta uma espessura maior que o δ garante eficiência eletromagnética e condutiva, funcionando como um elemento ressonante confiável de FSS.

Essa característica ressonante do FSS se define ocorre quando o patch é projetado com dimensão comparável a uma fração do comprimento de onda de interesse, geralmente, $\lambda/2$ ou $\lambda/4$, gerando comportamentos específicos de transmissão ou reflexão para uma determinada frequência de interesse.

2.3.3. Formas dos Elementos em Padrões Geométricos de Espaçamentos de FSS

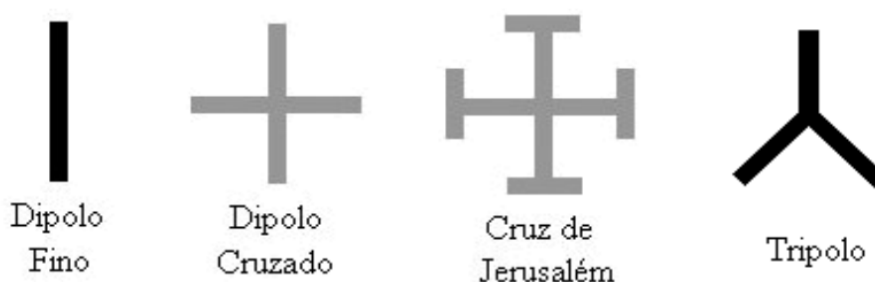
As FSS utilizam arranjos periódicos de elementos ressonantes, cujas formas geométricas influenciam diretamente as características espectrais da estrutura, como as bandas de transmissão e reflexão. Como já mencionado anteriormente, esses elementos podem ser condutores (*patches*) ou aberturas (*slots*) e são organizados em padrões bidimensionais que interagem com ondas eletromagnéticas.

Campus (2000), classifica os elementos de FSS em quatro grandes grupos, conforme sua geometria e funcionalidade eletromagnética:

- Grupo 1: N – pólos conectados pelo centro;
- Grupo 2: as espiras;
- Grupo 3: os elementos de interior sólido;
- Grupo 4: combinações

O Grupo 1 é formado por elementos lineares conectados em um ponto comum, apresentam boa resposta em múltiplas direções de polarização e são utilizados principalmente em estruturas com geometria simétrica e capazes de funcionar em uma faixa ampla de frequências (estruturas de banda larga). As formas dos elementos mais comuns dentro desse grupo incluem, dipolo fino (WU, 1995), cruz de Jerusalém, dipolo cruzado [TSAO; MITTRA, 1984] e o tripolo (MUNK, 2000)], conforme ilustração feita na Figura 3.

Figura 3 - Grupo 1: N – pólos conectados pelo centro.

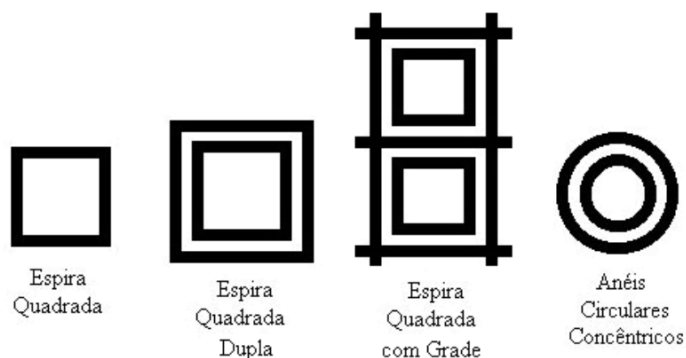


Fonte:

Fonte: Campus (2009)

O Grupo 2 é formado por elementos do tipo loop (espiras metálicas ou aberturas em forma de anel), com forte comportamento indutivo e são amplamente usados para projetar filtros com alta seletividade e estruturas com múltiplas bandas de operação. Os tipos mais comuns envolvem, espiras quadradas (LANGLEY; PARKER, 1982)], quadradas duplas (LANGLEY; PARKER, 1983, quadradas com grades (LEE; LANGLEY, 1985) e anéis circulares concêntricos (PARKER; VARDAXOGLU, 1985) que se encontram ilustrados na Figura 4.

Figura 4 - Grupo 2: Espiras



Fonte: Campus (2009)

No Grupo 3 incluem elementos maciços com geometria fechada (patches metálicos), como retângulos (WU, 1995), círculos ou hexágonos (MUNK, 2000), conforme ilustrados na Figura 5 e apresentam resposta capacitiva dominante e são comuns em FSS do tipo rejeita-faixa.

Figura 5 - Grupo 3: Interior sólido

Fonte: Campus (2009)

Por fim, no Grupo 4 incluem elementos com estruturas híbridas que combinam os elementos anteriores em uma única célula, com o objetivo de alcançar respostas multifuncionais ou ressonância em múltiplas frequências. Um exemplo de combinação pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Grupo 4: Combinações.

Fonte: Campus (2009)

Para uma melhor visualização são mostrados na Quadro 1, os respectivos grupos, tipos de elementos, exemplos e função eletromagnética das formas dos elementos de FSS.

Quadro 1 – Formas dos elementos aplicados como FSS para diferentes funções eletromagnéticas.

Grupo	Tipo de Elemento	Exemplos	Função Eletromagnética
1	N-pólos conectados pelo centro	Dipolo fino, cruz de Jerusalém, tripolo	Ressonância direcional, multifrequência
2	Espiras (loops)	Espira quadrada, dupla, com grade, anel	Indutiva, múltiplas bandas, seletividade
3	Elementos sólidos	Patches retangulares, circulares, hexagonais	Capacitância dominante, rejeita-faixa
4	Combinações	Híbridos dos grupos anteriores	Multifuncionalidade, dual/triple band

Fonte: Campus (2009)

No contexto de radomes, que são estruturas de proteção transparente ao eletromagnetismo para antenas, a utilização de FSS permite seletividade espectral, o que é

essencial em sistemas modernos de comunicação como o 5G e aplicações aeroespaciais. A integração de FSS em radomes permite que apenas frequências desejadas atinjam a antena, mitigando interferências e promovendo compatibilidade eletromagnética.

Diversas publicações e relatórios técnicos de referência foram analisados ao longo deste trabalho. Entre eles, destacam-se documentos da Saint-Gobain, que há mais de uma década investiga materiais avançados e superfícies funcionais aplicadas a radomes aeronáuticos e blindagens eletromagnéticas, com foco em alta transparência eletromagnética e robustez mecânica (SAINT-GOBAIN PERFORMANCE PLASTICS, 2021; SAINT-GOBAIN AEROSPACE, 2023).

Em paralelo, a literatura e materiais técnicos apontam que geometrias ressonantes periódicas, como dipolos e cruces de Jerusalém, oferecem resposta previsível, boa estabilidade angular e um controle eficiente da transparência em faixas de alta frequência, incluindo bandas de interesse para aplicações aeronáuticas e 5G.

De forma complementar, documentos de fabricantes e centros de pesquisa, como a Airbus Defence & Space, ao descreverem radomes eletromagneticamente altamente transparentes para aplicações multibanda e banda larga (AIRBUS DEFENCE AND SPACE GMBH, 2015), e os guias e exemplos de simulação da Altair Engineering, que abordam a caracterização de FSS de segunda ordem e de geometrias como cruces de Jerusalém no FEKO (ALTAIR ENGINEERING, 2021), convergem ao demonstrar a eficácia dessas topologias na redução de reflexão e no controle da transparência seletiva.

Em conjunto, essas evidências sustentam e motivam a adoção dessas geometrias ressonantes neste trabalho, com o objetivo de projetar superfícies seletivas em frequência com desempenho adequado às exigências de aplicações aeronáuticas.

2.4. Propriedades Eletromagnéticas de um Meio Material

O comportamento de um material frente à incidência de uma onda eletromagnética é determinado principalmente por duas grandezas fundamentais: a permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e a permeabilidade magnética relativa (μ_r). Essas propriedades descrevem a forma como o meio material responde, respectivamente, a campos elétricos e magnéticos aplicados, influenciando diretamente os mecanismos de propagação, absorção e reflexão das ondas eletromagnéticas (SADIKU, 2004).

Tanto ϵ_r quanto μ_r são grandezas complexas, expressas no plano complexo com componentes real e imaginária. Ambas as propriedades descrevem fenômenos capacitivos e dissipativos que podem ocorrer no interior de um material e são descritos pelas componentes

reais m' e ε' e imaginárias m'' e ε'' , grandezas expressas pelas Equações 2 e 3 (SADIKU, 2004).

$$m_r = m' - jm'' \quad \text{Equação 2}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad \text{Equação 3}$$

onde:

m' é a componente real da permeabilidade relativa complexa;

m'' é a componente imaginária da permeabilidade relativa complexa,

ε' é a componente real da permissividade relativa complexa;

ε'' é a componente imaginária da permissividade relativa complexa.

Esses termos são adimensionais, onde as componentes reais das grandezas m' e ε' referem-se a energia armazenada e relacionada aos fenômenos reativos ou capacitivos, representando a capacidade do material de armazenar energia eletromagnética em resposta à excitação externa, enquanto que a parte imaginária, m'' e ε'' , estão relacionadas aos fenômenos dissipativos, refletindo a perda de energia por meio de mecanismos como condução elétrica, relaxação dielétrica e histerese magnética, sendo sempre maior que zero e geralmente muito menor que ε' e m' (SADIKU, 2004).

Assim, a parte real da permissividade ou permeabilidade contribui para a definição da velocidade de propagação e impedância intrínseca do meio, enquanto a parte imaginária representa as perdas internas do material, afetando diretamente a atenuação da onda.

A correta caracterização dessas propriedades é essencial para o projeto de estruturas como por exemplo radomes seletivos de frequência, nos quais a interação entre a onda incidente e o meio material determina a efetividade da transmissão seletiva, da blindagem ou da absorção eletromagnética.

2.5. Parâmetro S

Os parâmetros S (do inglês *Scattering Parameters*), também conhecidos como parâmetros de espalhamento, são ferramentas fundamentais na análise e caracterização eletromagnética de materiais e, especialmente, importantes em aplicações envolvendo materiais absorvedores, radomes, FSS, etc, onde o controle da transmitância e da refletância é essencial (GHODGAONKAR, 1990; PINTO; REZENDE, 2017; SILVA; REZENDE, 2020).

Esses parâmetros descrevem o comportamento das ondas eletromagnéticas quando ocorre interação com um material de análise. Uma representação esquemática desta

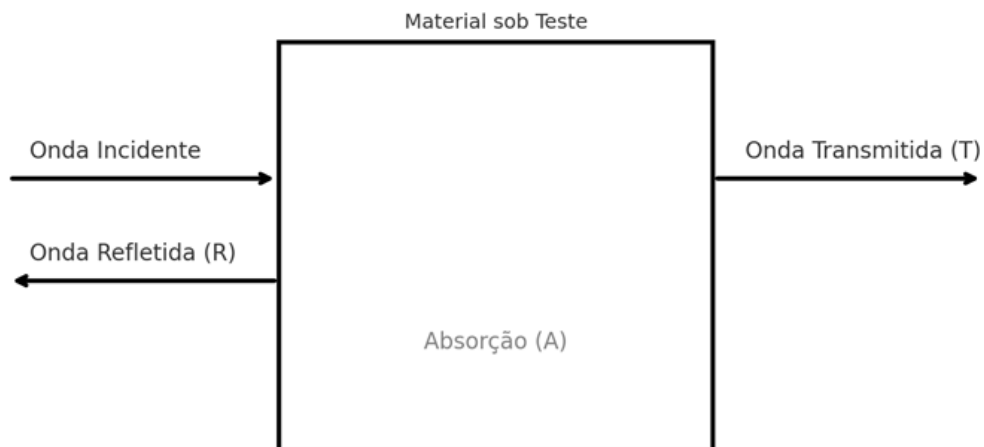
interação é ilustrada na Figura 7 na qual mostra como uma onda eletromagnética é parcialmente refletida (R), transmitida (T) e absorvida (A) ao incidir sobre um material. A avaliação dessa interação é viabilizada por meio da medição desses parâmetros

Durante a interação de uma onda eletromagnética com um meio material, duas componentes principais são geradas:

- A onda refletida, que retorna à fonte após incidir sobre a superfície do material,
- A onda transmitida, que propaga através do material em direção à sua segunda face.

Ao atravessar o material, parte da energia da onda transmitida pode ser absorvida e convertida em calor, resultando em uma atenuação exponencial de sua amplitude. Quando a onda atinge a face oposta, uma fração é transmitida e outra parte pode ser refletida internamente.

Figura 7 – Representação esquemática da interação da onda eletromagnética com um material sob teste.



Fonte: Autores(2025)

Os parâmetros S são expressos por uma matriz de elementos complexos, cuja magnitude e fase representam as amplitudes das ondas refletidas e transmitidas em diferentes portas de um sistema. Em um sistema de duas portas, a matriz S pode ser expressa genericamente pela Equação 4:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 4}$$

onde cada elemento S_{ij} indica a resposta na porta i devido a um sinal aplicado na porta j .

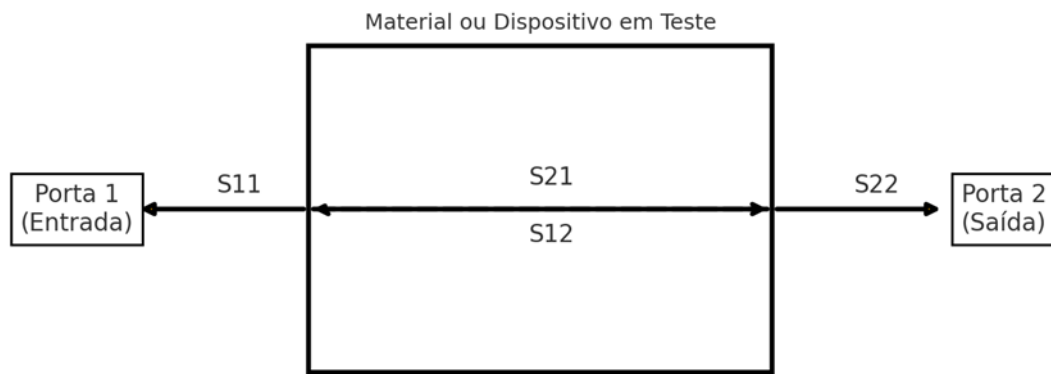
A Figura 8 mostra um sistema de duas portas com os coeficientes S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22} .

Em particular:

- S_{11} : Coeficiente de reflexão na porta 1 (entrada).
- S_{22} : Coeficiente de reflexão na porta 2 (saída).
- S_{21} : Coeficiente de transmissão da porta 1 para a porta 2.
- S_{12} : Coeficiente de transmissão da porta 2 para a porta 1.

Estes coeficientes representam as razões entre a energia refletida (ou transmitida) e a energia incidente em cada porta do sistema, conforme estabelecido por Hiebel (2007).

Figura 8 – Sistema de duas portas representando a resposta do material em teste.



Fonte: Autores (2025)

A partir dos parâmetros S, é possível derivar as grandezas físicas de interesse para a caracterização do desempenho eletromagnético de um material, como (LOPES, 2025):

- Refletância (R) que representa a fração de energia refletida (Equação 2);
- Transmitância (T) que representa a fração de energia transmitida (Equação 3)
- Absorbância (A) que representa energia absorvida pelo material (Equação 4).

Essas grandezas estão relacionadas aos parâmetros S conforme as seguintes equações:

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \quad \text{Equação 2}$$

$$(T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \quad \text{Equação 3}$$

$$A = 1 - (R + T) \quad \text{Equação 4}$$

Em sistemas bidimensionais como as FSS, os parâmetros S_{11} e S_{21} são os mais relevantes. O coeficiente S_{11} representa a razão entre a onda refletida e a incidente (porta 1), enquanto S_{21} expressa a razão entre a onda transmitida e a incidente (porta 2). Esses valores

são geralmente apresentados em decibéis (dB) e variam com a frequência, conforme as propriedades geométricas e materiais da estrutura.

De acordo com Munk (2000), o comportamento dos parâmetros S fornece informações diretas sobre a ressonância geométrica, acoplamento entre células periódicas e largura de banda útil da estrutura FSS. Assim, a partir da análise espectral desses coeficientes, é possível determinar frequências de ressonância, bandas de rejeição e níveis de atenuação, parâmetros fundamentais para o projeto de filtros eletromagnéticos e metamateriais funcionais.

É importante ressaltar que, para análises mais precisas do desempenho eletromagnético, torna-se fundamental realizar a caracterização dessas propriedades do material na frequência exata de operação, garantindo que os parâmetros obtidos possam ser empregados com confiabilidade em simulações numéricas e projetos de engenharia aplicados.

2.6. Análises eletromagnética utilizando o método de espaço livre

O método de espaço livre consiste em uma técnica de medição dos parâmetros de espalhamento eletromagnético (parâmetros S) utilizando antenas transmissoras e receptoras posicionadas em campo aberto ou em câmaras anecóicas. Essa abordagem permite a caracterização de materiais planos ou amostras estruturadas, como FSS e metamateriais, operando sem contato direto com o dispositivo sob teste.

O princípio do método baseia-se na medição dos coeficientes de reflexão (S_{11} , S_{22}) e transmissão (S_{21} , S_{12}), que descrevem o comportamento da onda eletromagnética ao interagir com o material em análise, isto é, a fração refletida, transmitida e absorvida da onda incidente.

As antenas utilizadas devem ser compatíveis com a faixa de frequência de interesse, e podem operar com ou sem o uso de lentes colimadoras, dependendo da distância de medição. A propagação da onda eletromagnética apresenta duas regiões distintas:

- Campo próximo (near-field): região onde a onda ainda não assumiu um perfil plano, apresentando frentes de onda curvas e comportamento não uniforme, o que pode resultar em reflexões imprecisas.
- Campo distante (far-field): região onde a onda se comporta como onda plana, propagando-se predominantemente no modo TEM (Transversal Eletromagnético). Esse é o regime ideal para medições de parâmetros S com alta fidelidade.

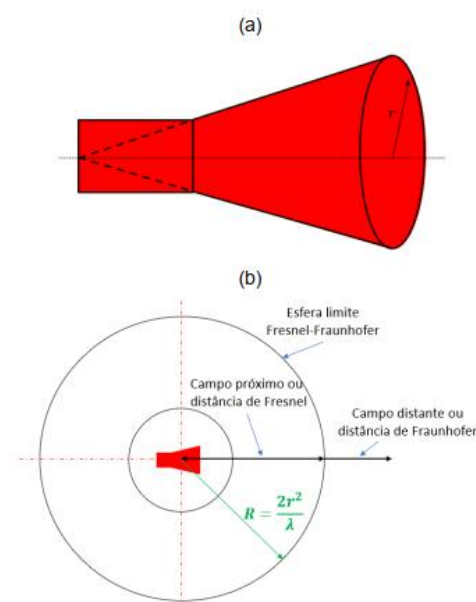
A distância mínima necessária para garantir a condição de campo distante (R) é dada pela Equação 5:

$$R > \frac{2r^2}{\lambda} \quad \text{Equação 5}$$

onde: R é a distância mínima entre antena e amostra, r é o raio efetivo da abertura da antena (corneta), λ é o comprimento de onda na frequência de operação.

A relação entre o raio da corneta e a distância que separa a região de campo próximo e campo distante pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática, (a) do raio da corneta da relação, e (b) da relação entre o raio r a distância que separa a região de campo próximo e campo distante.



Fonte: Lopes (2025)

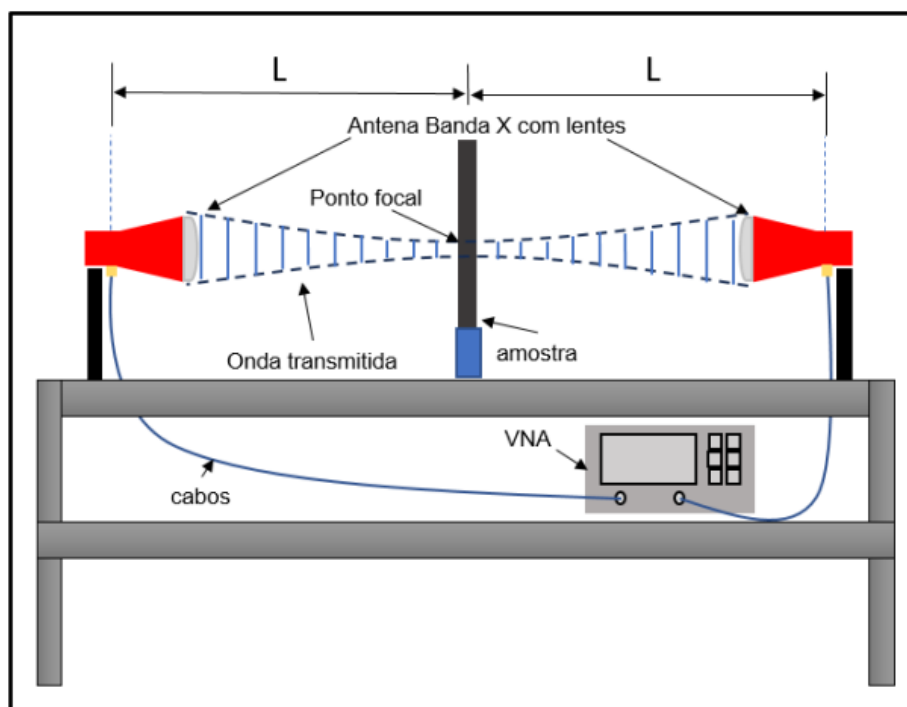
Para reduzir o valor de R e compactar o arranjo experimental, podem ser utilizadas lentes colimadoras, que atuam por refração, transformando frentes de onda esféricas em ondas planas.

As medições em espaço livre devem ocorrer em ambiente controlado, preferencialmente em câmara anecóica, para evitar interferências externas e múltiplas reflexões, onde reflexões em paredes, teto ou estruturas metálicas próximas podem afetar a leitura dos parâmetros S. Equipamentos eletrônicos próximos também podem gerar ruído eletromagnético adicional.

Portanto, é indispensável realizar calibração rigorosa do sistema, levando em conta a sensibilidade do VNA (Analisador de Rede Vetorial) e a supressão de sinais espúrios.

A amostra a ser analisada deve atender aos seguintes critérios, (i) estar posicionada a uma distância $L > R$, assegurando campo distante e (ii) ter dimensões superiores à área de incidência da onda – proporcional à abertura do feixe. O setup experimental do método de espaço livre está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Representação esquemática do setup necessário para utilizar o método de espaço livre com o uso de antenas com lente.



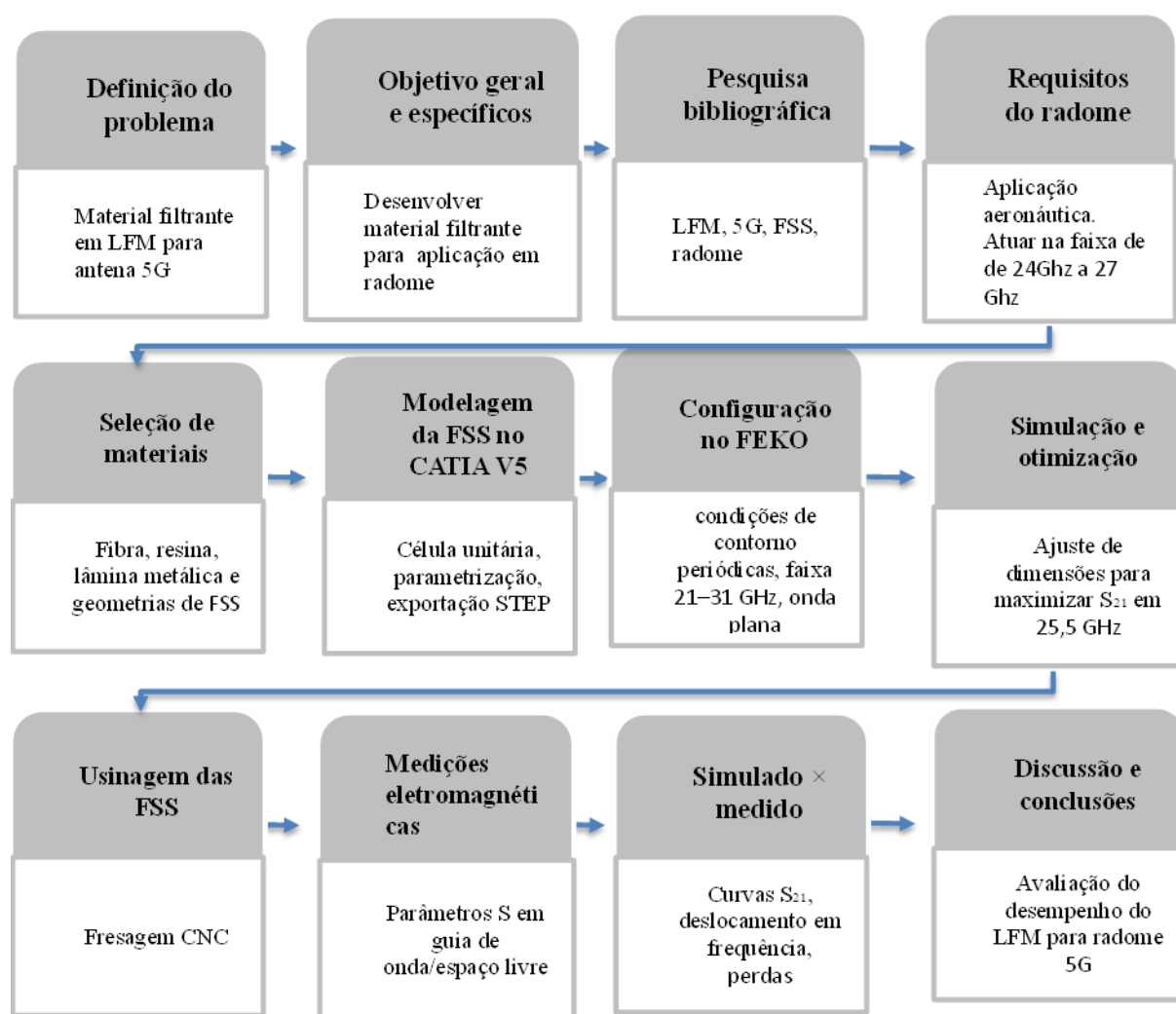
Fonte: Lopes (2025)

Para garantir a precisão das medições, o método de espaço livre deve ser implementado em ambientes controlados, como câmaras anecóicas, que evitam reflexões indesejadas provenientes de paredes, equipamentos ou fontes externas de radiação. A correta calibração do sistema, aliada à verificação da ausência de interferências eletromagnéticas externas, é essencial para assegurar a acurácia dos parâmetros S obtidos.

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O fluxograma apresentado na Figura 11 organiza de forma lógica e sequencial as principais etapas do processo de desenvolvimento de um material filtrante baseado em Laminado de Fibra Metal (LFM), com aplicação em radomes para antenas 5G. As atividades estão distribuídas em três grandes fases: (i) concepção e pesquisa, (ii) modelagem e simulação, e (iii) manufatura, testes e avaliação final.

Figura 11 - Fluxograma metodológico.



Fonte: Autores (2025)

Na primeira linha, correspondente à etapa de concepção e pesquisa, o processo se inicia com a definição do problema, que identifica a necessidade de um radome seletivo para antenas que operam na faixa de 24 a 27 GHz, compatível com aplicações aeronáuticas. Em seguida, são estabelecidos o objetivo geral e os objetivos específicos, orientando o

desenvolvimento de um sistema filtrante funcional e estruturalmente viável. Com base nisso, é realizada uma pesquisa bibliográfica focada em temas como LFM, tecnologia 5G, FSS e propriedades eletromagnéticas de materiais aplicados a radomes. A partir dessa revisão, são determinados os requisitos do radome, incluindo a faixa de frequência alvo e as restrições da aplicação aeronáutica.

A segunda linha do fluxograma aborda a fase de modelagem e simulação numérica. Essa etapa tem início com a seleção dos materiais e geometrias, considerando combinações de fibra de vidro, resina epóxi e lâmina de alumínio, além de quatro geometrias distintas de FSS: dipolo, dipolo cruzado, tripolo e cruz de Jerusalém. Na sequência, realiza-se a modelagem tridimensional das FSS no software CATIA V5, por meio da construção da célula unitária, parametrização geométrica e exportação dos modelos no formato STEP. Esses modelos são então importados e configurados no software FEKO, onde se definem as condições de contorno periódicas (PBC), a excitação por onda plana e a faixa de análise de 21 a 31 GHz. Por fim, realiza-se a simulação eletromagnética e otimização, ajustando as dimensões para maximizar o coeficiente de transmissão (S_{21}) na frequência central de 25,5 GHz.

A terceira linha representa a transição para o domínio experimental, incluindo as etapas de manufatura das FSS, medições eletromagnéticas e análise comparativa. As FSS são usinadas por fresagem CNC em lâminas de alumínio, a partir dos modelos parametrizados. Em seguida, são realizadas as medições dos parâmetros S, utilizando um VNA em duas configurações: guia de onda e espaço livre. Com os dados obtidos, compara-se o desempenho simulado e medido, analisando o comportamento das curvas de S_{21} , deslocamentos espectrais e perdas associadas. Por fim, a etapa de discussão e conclusões avalia o desempenho geral dos materiais desenvolvidos, com destaque para a geometria Cruz de Jerusalém, que apresentou menor deslocamento e maior estabilidade espectral, indicando sua viabilidade como elemento filtrante em radomes 5G aeronáuticos.

3.1. Pesquisa Bibliográfica

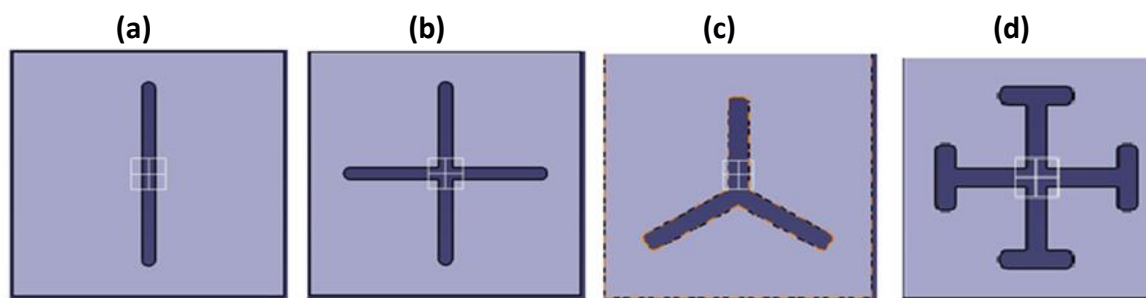
Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre o assunto abordado neste trabalho que envolveu LFM, tecnologia 5G, compatibilidade eletromagnética, radomes de aeronaves e metamateriais e FSS. Esta pesquisa bibliográfica foi feita para uma revisão da literatura e fundamentação teórica sobre os assuntos, focos deste trabalho, utilizando sites de pesquisas especializadas sobre os assuntos, base de dados da biblioteca do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e do Google Acadêmicos.

3.2. Seleção da FSS

Uma parte estruturante e fundamental desta pesquisa, consistiu no levantamento de informações atuais sobre FSS, em particular, sobre os tipos de geometria empregadas para compor a FSS com desempenho eletromagnético na faixa de 24 a 27 GHz (Banda K e Ka). A partir deste levantamento, foram selecionados quatro tipos de geometria para compor a FSS conforme mostra a Figura 12.

Como pode ser visualizado na Figura 12, foi definida a FSS constituída por elementos do tipo abertura, devido a sua forma mais comum e difundida para a compor o LFM da estrutura do radome filtrante, devido ao comportamento passa-faixa (CAMPOS, 2000), além da transmissão seletiva da onda eletromagnética dentro da faixa de frequência de estudo, com a minimizando as perdas por reflexão e absorção.

Figura 12 – Geometrias de composição das FSS selecionadas neste trabalho. (a) dipolo; (b) dipolo cruzado; (c) tripolo; (d) cruz de Jerusalem.



Fonte: Autores (2025)

3.3. Simulação Eletromagnética

A simulação eletromagnética das quatro geometrias da FSS foi realizada para a otimização do desempenho eletromagnético da FSS na composição do LFM. Para a realização desta simulação se definiu um LFM constituído por apenas uma única camada do Compósito Epóxi Reforçado com Fibra de Vidro (CERFV) e uma lâmina de alumínio com 0,3 mm de espessura que serviu como substrato para a simulação das FSS.

Para cada geometria da FSS, foram analisadas as dimensões dos elementos a fim de identificar a condição mais adequada ao funcionamento como filtro na faixa de 24 a 27 GHz. Além disso, as simulações contemplaram a avaliação do espaçamento entre os elementos da FSS, bem como a influência da espessura da lâmina de alumínio utilizada como substrato.

As simulações eletromagnéticas foram realizadas no software FEKO, da empresa ALTAIR, considerando a faixa de frequência de 21 a 31 GHz. Essa faixa foi definida para

possibilitar a análise da banda completa destinada ao 5G, conforme regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

3.4. Compósito Epóxi Reforçado com Tecido de Vidro -Processo de Laminação Manual à Vacuo

Para a realização da simulação eletromagnética foi requerido as propriedades eletromagnéticas do CERFV quanto a propriedades de permissividade elétrica complexa relativa ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$), e a permeabilidade magnética complexa relativa ($\mu_r = \mu' - j\mu''$). Para medir essas duas propriedades, foi utilizada uma amostra de CERTV produzida por Laminação Manual à Vácuo.

Para produzir essa amostra foi utilizado um tecido de vidro com gramatura de 200 g/m² (TEXglass) e uma resina Epoxi transparente 2001 com endurecedor 3154 (Redelease).

O molde utilizado para a laminação do CERFV consistiu em uma placa de alumínio previamente limpo e recoberto com agente desmoldante (cera de carnaúba e/ou solução de PVA), a fim de evitar aderência do compósito e facilitar a etapa de desmoldagem após a cura.

As folhas de tecido de vidro foram cortadas de acordo com as dimensões finais da amostra, garantindo o alinhamento adequado das fibras e a integridade da trama, evitando desfiamentos e distorções.

A resina epóxi e o endurecedor foram pesados conforme a proporção recomendada de 100:30 em massa.

A mistura foi realizada manualmente por cerca de 3 a 5 minutos, de forma homogênea e cuidadosa, para minimizar a formação de bolhas de ar.

Sobre o molde previamente preparado, foi aplicada uma fina camada de resina epóxi.

Em seguida, depositou-se a primeira camada do tecido de vidro, que foi completamente impregnada com resina utilizando rolo aplicador e pincel.

Após a aplicação de todas as camadas, o conjunto foi recoberto com filme perfurado (perforated film); manta de absorção (breather) e filme de vácuo (vacuum bag) devidamente selado.

O sistema foi conectado a uma bomba de vácuo, aplicando uma pressão negativa aproximada de -0,8 bar. Essa etapa foi essencial para remover bolhas de ar, eliminar o excesso de resina e promover a compactação uniforme entre as camadas.

O laminado permaneceu sob vácuo durante toda a cura inicial de 24 horas à temperatura ambiente (25 °C). Posteriormente, foi submetido à pós-cura em estufa a 60 °C

por 2 horas, conforme recomendação do fabricante da resina, a fim de assegurar a total polimerização e o desempenho térmico e mecânico adequado do compósito.

Após a cura completa, o laminado foi cuidadosamente desmoldado. As bordas foram cortadas para ajuste dimensional e as superfícies lixadas, garantindo planicidade e acabamento uniforme. As amostras resultantes foram, então, destinadas à caracterização eletromagnética. A Figura 12 ilustra o passo a passo da laminação.

Figura 12 – Etapas do processo de laminação manual à vácuo.

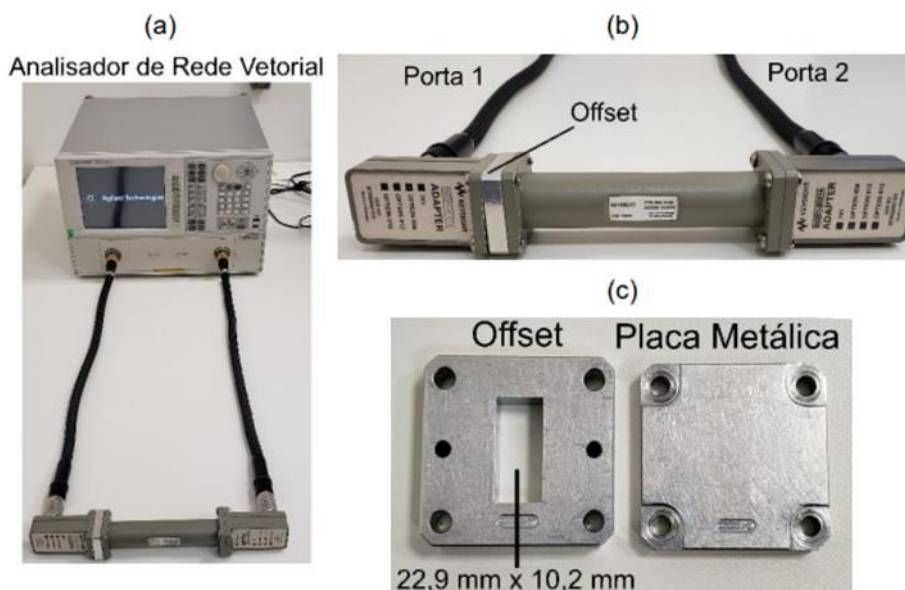


Fonte: Autores (2025)

3.5. Caracterização eletromagnética da CERFV usando o método de guia de onda

O material compósito CERFV foi caracterizado por meio do método de guia de onda, utilizando um Analisador de Rede Vetorial (VNA) da empresa *Agilent®* em conjunto com o kit de medição K11644A da *Keysight Technologies®* ilustrados na Figura 13. Essa caracterização permitiu a obtenção dos valores das propriedades eletromagnéticas complexas do material, especificamente a permissividade elétrica relativa complexa ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$) e a permeabilidade magnética relativa complexa ($\mu_r = \mu' - j\mu''$). Esses parâmetros foram posteriormente empregados como dados de entrada nas simulações eletromagnéticas das FSS, visando a integração e o comportamento conjunto das estruturas laminadas com o CERFV.

Figura 13 – Analisador de Rede Vetorial (VNA) da empresa *Agilent®* em conjunto com o kit de medição K11644A da *Keysight Technologies®*



Fonte: Autores (2025)

3.6. Elaboração das Geometrias da FSS no CATIA V5

Cada geometria da FSS foi desenhada em um plano base (XY) utilizando as ferramentas de Sketcher. As dimensões nominais inicialmente estabelecidas para as FSS são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Ilustração das dimensões das FSS.

Parâmetro	Dimensão
Célula unitária	15 x 15 mm
Abertura	1,5 mm
Espessura do substrato Al	0,3 mm
Periodicidade	20 x 20 mm

Fonte: Autores (2025)

3.7. Extrusão da geometria das FSS

Após o esboço, utilizou-se o comando Pad para realizar a extrusão da superfície metálica, gerando o modelo tridimensional da FSS com espessura de 0,3 mm. Com base na literatura especializada (MUNK, 2000; COSTA et al., 2013; XIA et al., 2019), essa espessura foi definida como adequada para estruturas metálicas de micro-ondas operando na banda K (24–27 GHz), por garantir o regime de campo superficial predominante e minimizar perdas

ômicas, mantendo o comportamento característico de uma superfície condutora ideal (PEC).

3.8. Parametrização das dimensões

Cada modelo foi parametrizado, permitindo a futura variação automática do fator de escala, espessura e periodicidade diretamente no software FEKO®. Essa parametrização garante flexibilidade na etapa de simulação, sem necessidade de reconstruir a geometria.

3.9. Verificação da integridade geométrica

Antes da exportação, todas as geometrias foram verificadas quanto à continuidade e fechamento das superfícies. O CATIA V5 fornece ferramentas de diagnóstico de geometria (*Healing Assistant*), que asseguram que não haja descontinuidades que prejudiquem o processo de malha no FEKO.

3.10. Exportação do modelo

As geometrias finais foram exportadas no formato *STEP* (.stp) por meio do módulo *File* → *Save As* → *STEP AP214*, garantindo compatibilidade plena com o *CADFEKO*.

Esse formato mantém a precisão métrica e a integridade dos vetores normais das superfícies, fundamentais para cálculos de campo eletromagnético.

A escolha das geometrias fundamenta-se em estudos clássicos e recentes sobre FSS, que destacam:

- Dipolo: resposta seletiva e simples de ajustar;
- Dipolo cruzado: maior independência de polarização;
- Trípolo: simetria angular e isotropia;
- Cruz de Jerusalém: largura de banda aumentada e múltiplas ressonâncias

Após a modelagem, os arquivos foram exportados em formato .stp (STEP) para posterior importação no FEKO.

3.11. Procedimento para a Simulação Eletromagnético na FEKO

As geometrias modeladas foram simuladas no software FEKO®, utilizando o módulo CADFEKO, responsável pela configuração do ambiente eletromagnético e execução numérica baseada no Método dos Momentos (MoM).

O procedimento foi conduzido de forma sistemática, com o objetivo de assegurar a

precisão dos resultados e a reprodutibilidade das condições de contorno aplicadas às FSS.

As geometrias desenvolvidas no CATIA V5® foram importadas para o FEKO® através da ferramenta Geometry Importer Tool, localizada na aba Construct.

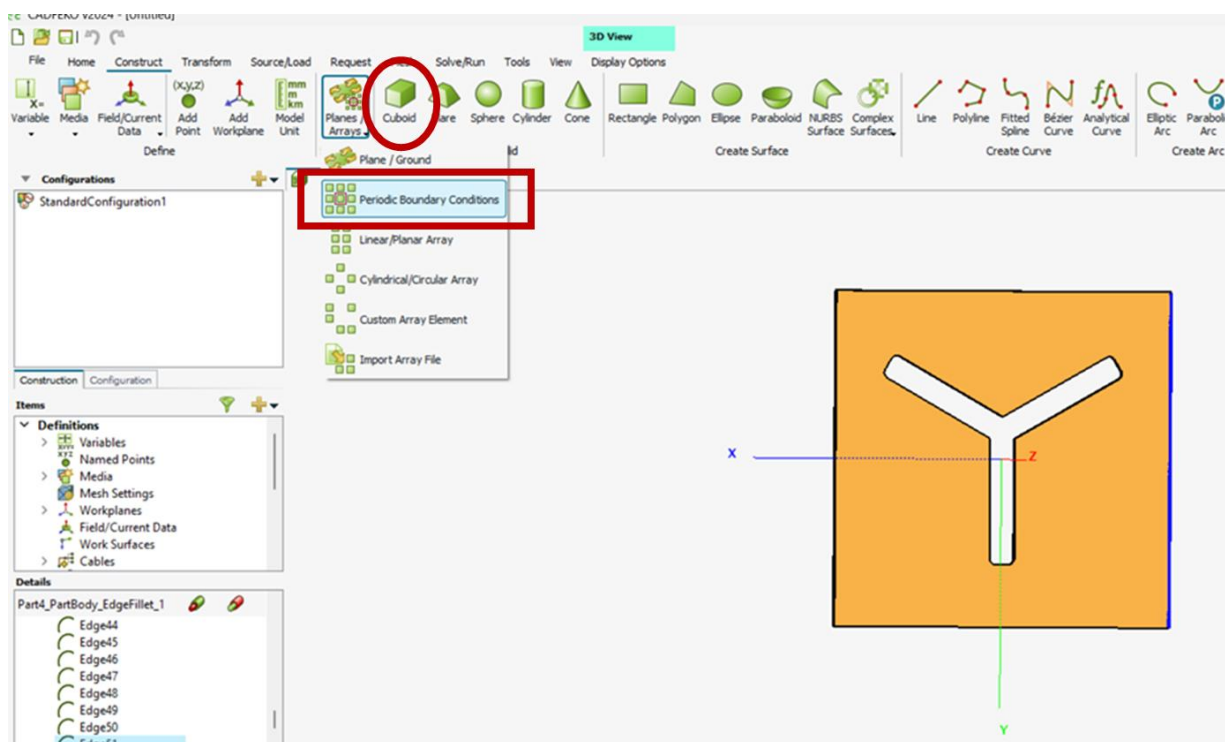
O formato STEP (.stp) foi selecionado, garantindo a fidelidade dimensional das estruturas tridimensionais criadas.

Em seguida, na mesma aba, o campo Model Unit foi ajustado para metros (m), compatibilizando as dimensões geométricas com a faixa de operação na banda K (24–27 GHz).

3.11. 1. Definição das Condições de Contorno

Ainda na aba Construct, foi aberta a seção Planes/Arrays, onde foram configuradas as Condições de Contorno Periódicas (Periodic Boundary Conditions – PBC) (ver Figura 14).

Figura 14 - Configuração das Condições de Contorno Periódicas (PBC).



Fonte: Autores (2025)

A opção Number of Dimensions foi definida como Two Dimensions, estabelecendo periodicidade nas direções X e Y para representar uma FSS infinita.

A função Determine from Plane-Wave Excitation foi ativada para que o FEKO determinasse automaticamente os vetores periódicos com base na direção de propagação da

onda incidente.

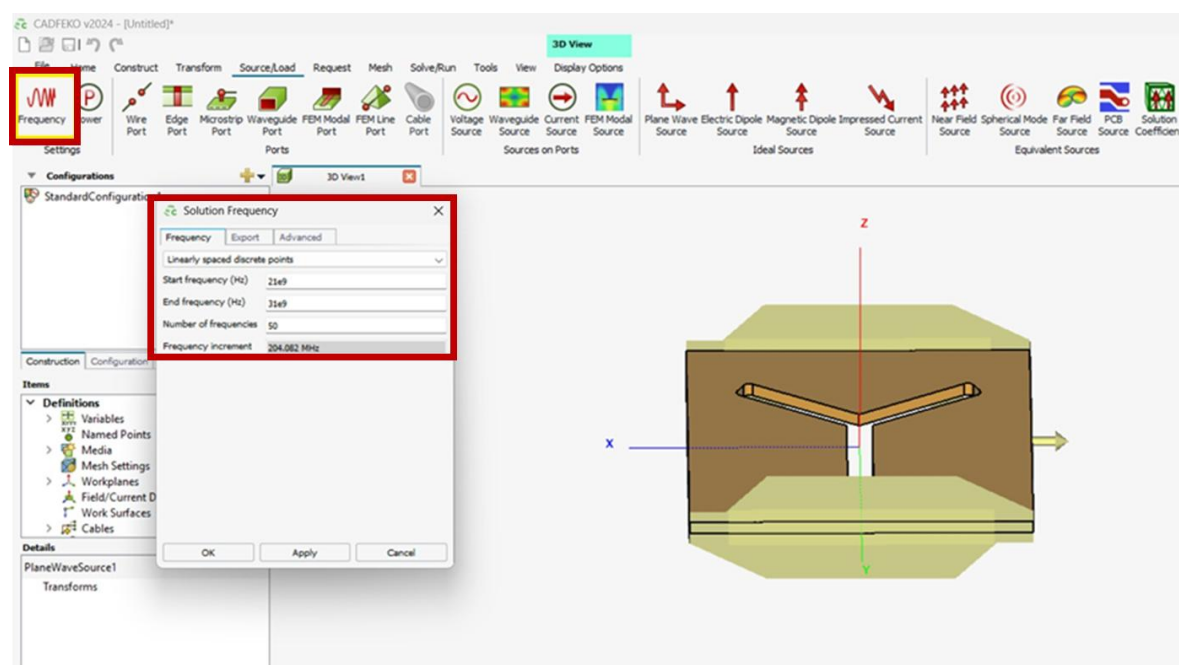
3.11.2 Configuração dos Parâmetros de Frequência

Na sequência, acessou-se a seção Source/Load, especificamente a aba Frequency, onde foram configurados os parâmetros de varredura de frequência (ver Figura 15).

Selecionou-se a opção Linearly Spaced Discrete Points, com os seguintes valores definidos: Start Frequency (Hz): 21×10^9 (21 GHz), End Frequency (Hz): 31×10^9 (31 GHz) Number of Frequencies: 50 pontos.

Essa configuração permitiu abranger o espectro completo da banda K, analisando o comportamento das geometrias no intervalo de 24 a 27 GHz com alta resolução.

Figura 15 - Definição da Faixa de Frequências de Simulação.



Fonte: Adaptado de Feko (2025)

3.11.3 Definição da Fonte de Excitação

Ainda dentro da seção Source/Load, foi aberta a aba Plane Wave Source, onde a opção Create foi selecionada (ver Figura 16).

A fonte foi configurada como uma onda plana incidente normal (0°) com polarização linear, permitindo análise direta dos coeficientes de transmissão e reflexão (S_{11} e S_{21}).

Essa escolha assegura que o comportamento observado decorra exclusivamente da geometria e não de interferências angulares.

Figura 16 - Configuração da Fonte de Onda Plana

Essa inspeção garante o equilíbrio entre precisão numérica e custo computacional, pois malhas muito densas aumentam o tempo de processamento, enquanto malhas grosseiras reduzem a exatidão dos resultados.

3.11.5 Execução da Simulação

Após as verificações, o modelo foi salvo no formato CADFEKO (.cfx) e executado na aba Solve/Run, iniciando o processamento numérico.

Durante a execução, o FEKO apresentou uma barra de progresso indicando a evolução do cálculo pelo solver, que aplica o Método dos Momentos (MoM) para resolver as equações integrais do campo elétrico sobre condutores perfeitos (PEC).

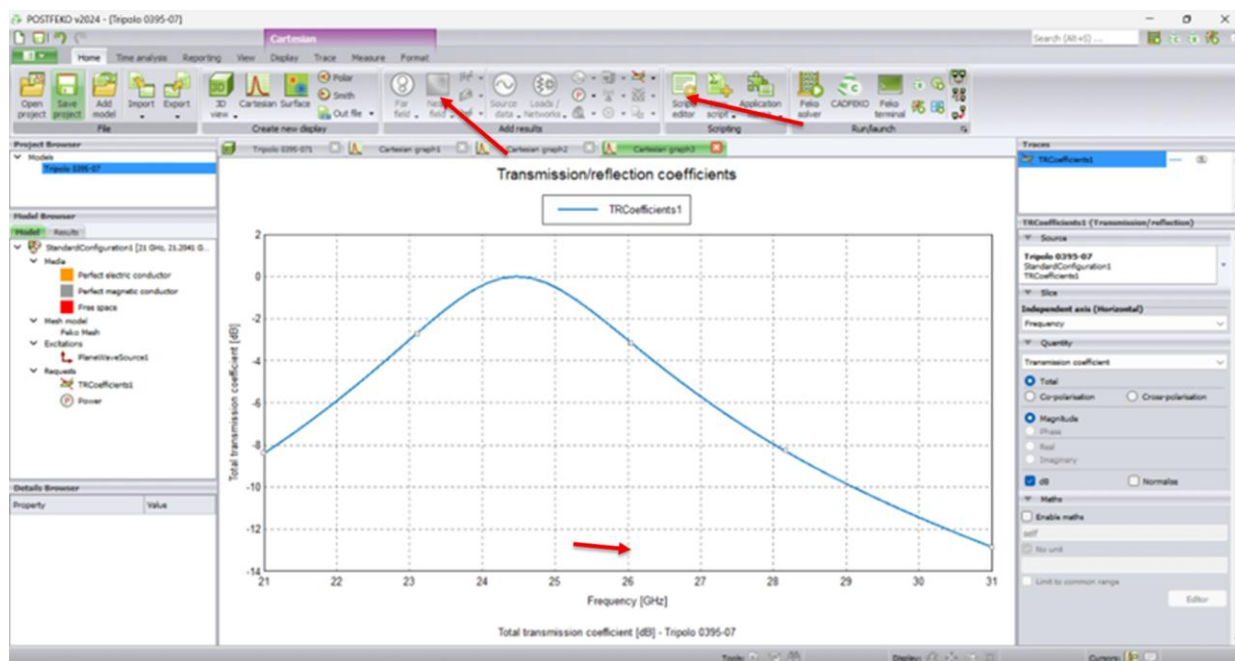
A simulação foi conduzida até a completa convergência das soluções, assegurando estabilidade nos parâmetros de espalhamento.

3.11.6 Pós-Processamento e Extração dos Resultados

Concluída a simulação, o PostFEKO® foi utilizado para o pós-processamento e análise dos resultados.

Na aba Home, a opção Cartesian Graph foi selecionada para gerar os gráficos dos parâmetros S_{11} (reflexão) e S_{21} (transmissão) (ver Figura 18).

Figura 18 -Resultado do Coeficiente de Transmissão (S_{21})



Fonte: Autores (2025)

O eixo horizontal foi definido em frequência (GHz) e o eixo vertical em coeficiente de transmissão (dB), permitindo visualizar o comportamento espectral de cada geometria

simulada.

Os resultados obtidos permitiram identificar as frequências centrais de ressonância, larguras de banda úteis (-10 dB) e níveis de transmissão máxima, correlacionando diretamente as variações geométricas com o deslocamento espectral observado.

Essa análise confirmou a eficiência das estruturas como filtros passa-faixa e sua coerência com os princípios teóricos das FSS planares.

3.12. Manufatura das FSS

A etapa de manufatura dos elementos FSS foi iniciada com a modelagem geométrica das estruturas unitárias por meio de um software de CAD. Para isso, utilizou-se o Catia V5®, da Dassault Systèmes, no qual foram desenhados modelos tridimensionais baseados em 4 diferentes geometrias ilustradas na Figura 1.

Após a modelagem, os arquivos foram exportados individualmente para o software de CAM PowerMill®, da Autodesk, responsável pela geração do percurso de usinagem (toolpath). Para a usinagem, foi utilizada uma Fresadora CNC, da marca Mekanodrill, modelo INVICTA 450 conforme mostra a Figura 19 e, definiu-se a utilização de uma fresa esférica de 0,3 mm de diâmetro, com parâmetros de corte otimizados: rotação de 20.000 rpm e avanço de 300 mm/min. O percurso gerado foi posteriormente pós-processado, originando o código G necessário para o controle da máquina CNC.

Figura 19 – Foto da Fresadora utilizada para a usinagem das FSS.



Fonte: Autores (2025)

Com o programa de usinagem carregado na memória da máquina, procedeu-se à fixação da lâmina de alumínio com 0,3 mm de espessura sobre a mesa da fresadora (Figura

20), garantindo alinhamento e fixação adequados para usinagem de precisão. O processo de fabricação foi então iniciado, seguindo rigorosamente os parâmetros definidos.

Figura 20 – Esquema de fixação da lâmina de Al sobre a mesa fresadora.



Fonte: Autores (2025)

3.13. Caracterização eletromagnética das FSS

A caracterização eletromagnética das FSS otimizadas na simulação usando o software FEKO foi realizada para analisar o potencial de atenuação com relação ao coeficiente de transmissão (S_{21}). As análises foram realizadas usando o sistema de espaço livre por um analisador de rede vetorial conforme já ilustrado na Figura 13.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Geometria e Manufatura das FSS

Um dos pontos-chave deste estudo foi a otimização das geometrias, dimensões e propriedades eletromagnéticas das FSS, considerando também a viabilidade do processo de fabricação por fresagem CNC sobre lâminas de alumínio.

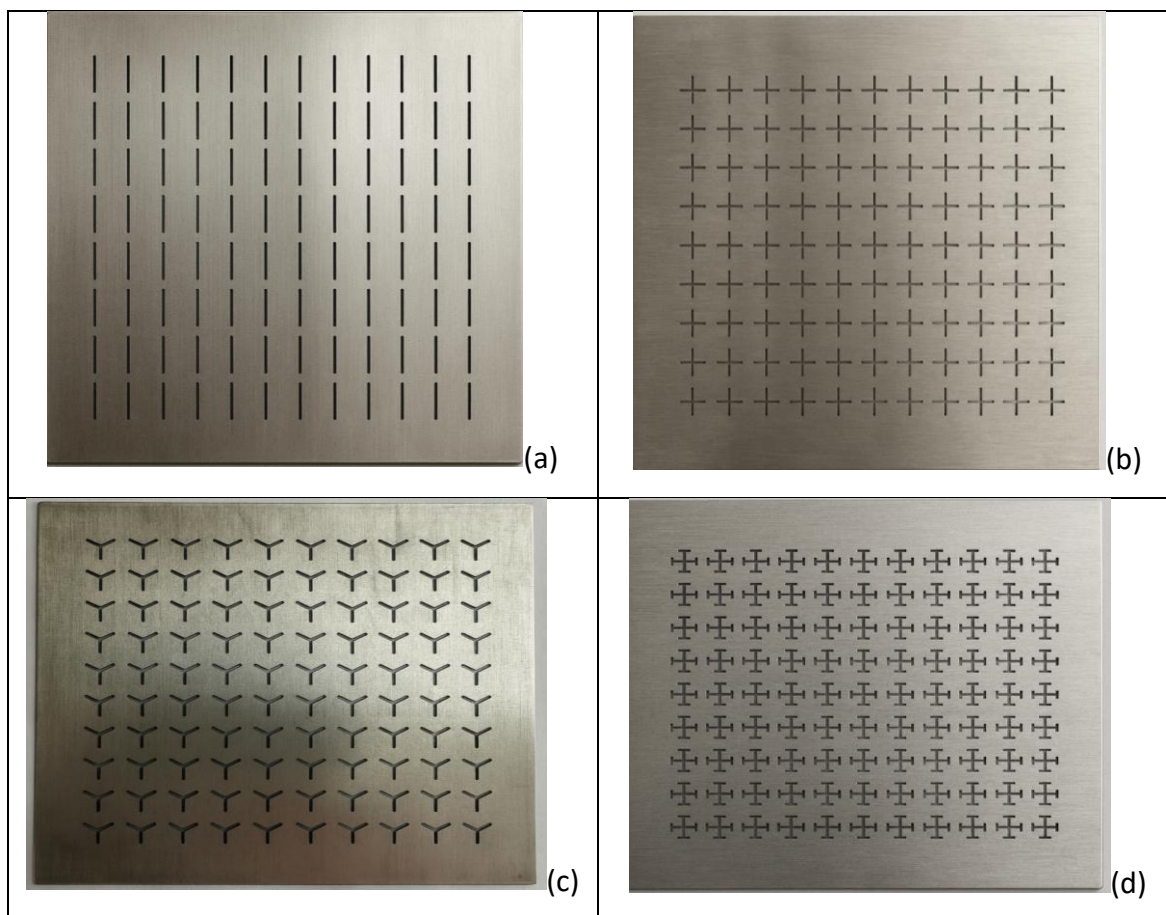
Para aplicação como filtro eletromagnético na faixa de 24 a 27 GHz, foi selecionada uma FSS do tipo abertura (slot), cuja topologia é reconhecida por permitir propagação seletiva de sinais eletromagnéticos em múltiplas direções de polarização. Essa escolha se justifica por sua adequação a estruturas simétricas de banda larga e pelo comportamento característico de filtro passa-faixa por transmissividade ressonante.

Além dos aspectos funcionais, a seleção desse tipo de FSS considerou a simplicidade e precisão do processo de manufatura adotado no projeto, que envolveu fresagem de alta precisão sobre chapas finas de alumínio. Foram projetadas quatro geometrias distintas, com formatos base semelhantes, porém diferenciando-se por detalhes estruturais específicos, como número de ramos, conectividade e simetria angular (ex.: dipolo, dipolo cruzado, tripolo e cruz de Jerusalém).

A Figura 21 apresenta as quatro FSS fabricadas, com dimensões determinadas a partir da otimização numérica realizada via simulação eletromagnética, utilizando o software FEKO® na faixa de 24 a 27 GHz. O processo de usinagem foi conduzido em fresadora CNC utilizando fresa esférica de 0,3 mm de diâmetro, rotação de 20.000 rpm e avanço de 300 mm/min, permitindo cortes limpos e sem deformações plásticas visíveis nas chapas metálicas.

Figura 21 – FSS fabricadas com dimensões otimizadas na simulação eletromagnética.

(a) dipolo; (b) dipolo cruzado; (c) tripolo; (d) cruz de Jerusalem



Nas imagens apresentadas na Figura 21, observa-se que as peças usinadas mantêm excelente qualidade dimensional e acabamento superficial, sem evidências de empenamento ou descontinuidade geométrica. Esses aspectos são cruciais para garantir a estabilidade estrutural do LFM que integrará as FSS, bem como a confiabilidade funcional como filtro eletromagnético.

Ressalta-se que as geometrias fresadas representam as condições otimizadas de resposta eletromagnética, previamente avaliadas por meio de simulação e detalhadas na próxima subseção deste capítulo. A manufatura validou, portanto, a exequibilidade prática das topologias projetadas, confirmando que o processo pode ser reproduzido com alta fidelidade e aplicabilidade industrial.

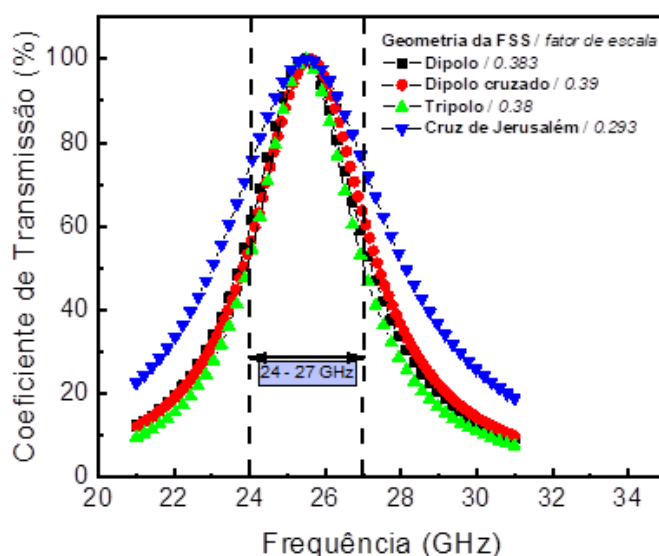
4.2. Simulação Eletromagnética usando o software FEKO

Como ponto inicial para a simulação eletromagnética, foram consideradas as FSS com dimensões nominais apresentadas na Tabela 2. A partir dessas dimensões, aplicou-se

um fator de escala com o objetivo de otimizar a máxima transmissividade em torno de 25,5 GHz, frequência central da faixa de operação visada (24–27 GHz). A Figura 22 apresenta os resultados simulados para o coeficiente de transmissão (S_{21}) no intervalo de 21 a 31 GHz. Os dados revelam que, dentro da faixa de interesse (24 a 27 GHz), a FSS com geometria em cruz de Jerusalém apresentou perdas de transmissão próximas a 20%, demonstrando desempenho superior em relação às demais geometrias testadas. As outras estruturas, dipolo, dipolo cruzado e trípolo, apresentaram perdas mais acentuadas, na ordem de 40%, ao longo da mesma faixa.

Dessa forma, conclui-se que, sob a perspectiva eletromagnética, a cruz de Jerusalém oferece maior eficiência como filtro passa-faixa na banda K. No entanto, esse ganho em desempenho vem acompanhado de uma desvantagem: a geometria mais complexa exige maior tempo de usinagem no processo de fresagem CNC, o que pode impactar a viabilidade de sua aplicação em larga escala.

Figura 22 -Coeficiente de transmissão (S_{21}) das FSS simuladas na faixa de 21 a 31 GHz, com otimização para máxima transmissividade (100%) em 25,5 GHz.



Fonte: Autores (2025)

Os dados da Tabela 3 resumem os percentuais de transmissão para diferentes geometrias nas frequências de interesse. A geometria do tipo trípolo apresentou o melhor alinhamento com a frequência de 25,5 GHz e menor perda de transmissão (~0%), reforçando seu potencial para aplicações específicas em 5G. Já a cruz de Jerusalém apresentou a maior largura de banda, mas também a maior perda em 25,5 GHz, indicando que sua eficiência depende de ajustes finos de escala e periodicidade.

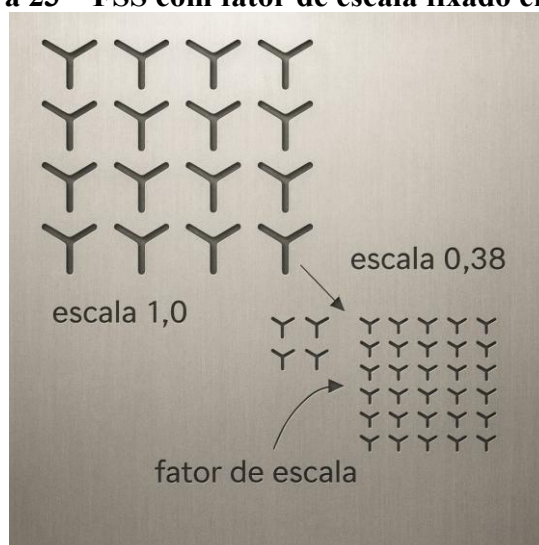
Tabela 3 – Valores de Transmissividade obtidos na simulação para as FSS com otimização para máxima transmissividade (100%) em 25,5 GHz.

FSS	Perda Transmissão (%) em 25.5 GHz	Transmissão máxima (%) em 24 GHz	Transmissão máxima (%) em 27 GHz	Máxima transmissão (%) na faixa de 24 - 27 GHz em 25.5 GHz
Dipolo	0,7	50,0	63,5	74,3
Dipolo cruzado	5,7	50,0	51,2	60
Tripolo	0,0	38,3	85,5	60
Cruz de Jerusalém	98	19,2	7,2	60

Fonte: Autores (2025)

As geometrias das FSS também foram simuladas com dimensões ajustadas a um fator de escala fixo de 0,38 (ver Figura 23), a fim de investigar seu comportamento espectral sem variações paramétricas adicionais. Como apresentado na Figura 24, três das quatro topologias analisadas, dipolo, dipolo cruzado e tripolo, apresentaram máxima transmissão dentro da faixa de interesse entre 24 e 27 GHz.

Figura 23 – FSS com fator de escala fixado em 0,38.

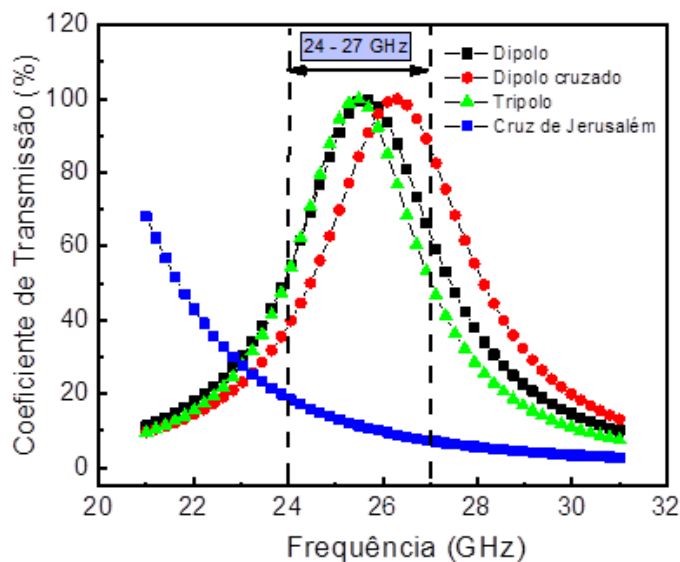


Fonte: Autores (2025)

A geometria do tripolo destacou-se por exibir o pico de transmissão mais próximo da frequência central de 25,5 GHz, sugerindo um melhor acoplamento entre o modo ressonante do elemento e o comprimento de onda correspondente. Já as geometrias de dipolo e dipolo cruzado demonstraram máximos levemente deslocados em relação a essa frequência, evidenciando diferenças no comprimento efetivo de ressonância das correntes superficiais

Por outro lado, a FSS com geometria de cruz de Jerusalém não apresentou pico de transmissão dentro da banda-alvo nas condições simuladas, indicando que o fator de escala 0,38 não é adequado para sintonizar esta topologia na faixa de 24 a 27 GHz. Esse comportamento pode estar relacionado à distribuição mais complexa de correntes ressonantes e ao acoplamento eletromagnético entre elementos adjacentes, que, em certos arranjos, desloca a frequência de ressonância para fora da banda desejada — fenômeno amplamente discutido por Munk (2000) e Yang e Rahmat-Samii (2009).

Figura 24 - Coeficiente de transmissão (S_{21}) das FSS simuladas na faixa de 21 a 31 GHz dimensionadas com fator de escala fixado em 0,38



Fonte: Autores (2025)

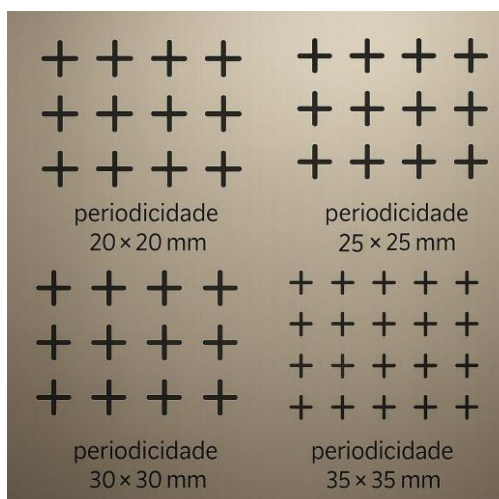
Além da análise espectral realizada por simulação, é essencial correlacionar os resultados obtidos com as condições críticas do processo de manufatura das FSS, particularmente no que se refere ao tempo e à complexidade de usinagem. Observou-se uma variação significativa no tempo necessário para a fresagem CNC entre as diferentes geometrias testadas. A estrutura do tipo dipolo apresentou o menor tempo de fabricação,

configurando-se como uma alternativa viável para produção em escala industrial, onde simplicidade e agilidade são fatores determinantes.

Em contrapartida, a geometria Cruz de Jerusalém, devido à sua elevada complexidade geométrica e número de segmentos finos, exigiu um tempo de usinagem consideravelmente maior, o que pode representar um entrave em aplicações que demandem alta produtividade. Já as geometrias intermediárias, como o tripolo e o dipolo cruzado, apresentaram um bom equilíbrio entre precisão de corte, tempo de execução e desempenho eletromagnético. Dentre essas, destaca-se o dipolo cruzado, que se mostrou a opção mais vantajosa em termos de relação custo-benefício, por aliar facilidade de fabricação à manutenção de uma resposta espectral adequada na faixa de interesse.

Uma das variáveis avaliadas no estudo das FSS como filtros eletromagnéticos foi a periodicidade do arranjo dos elementos constituintes. Para esta análise, adotou-se a geometria do tipo dipolo cruzado, por apresentar uma configuração favorável à propagação eficiente de ondas eletromagnéticas com incidência normal (perpendicular), típica em aplicações de radome. Uma melhor representação desta variação da periodicidade do arranjo dos elementos é ilustrada na Figura 25.

Figura 25 - Variação do espaço entre os elementos do arranjo do tipo dipolo cruzado.

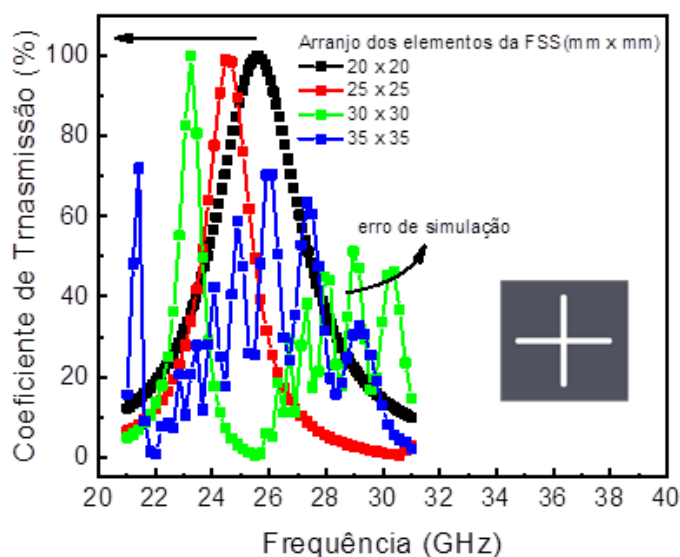


Fonte: Autores (2025)

A Figura 26 apresenta os resultados simulados do coeficiente de transmissão (S_{21}) para diferentes valores de periodicidade no arranjo do dipolo cruzado. Observa-se que a frequência de máxima transmissão é deslocada para valores menores à medida que a periodicidade aumenta: para 25×25 mm, a máxima transmissão ocorre em 25 GHz; já para 30×30 mm, esse pico é deslocado para 23 GHz.

Para periodicidades superiores a 35×35 mm, notou-se o surgimento de comportamentos anômalos, associados a erros numéricos e inconsistências na simulação. Esses resultados indicam que a periodicidade exerce influência direta na frequência de ressonância da estrutura e que, além de um certo limite, o modelo perde estabilidade espectral.

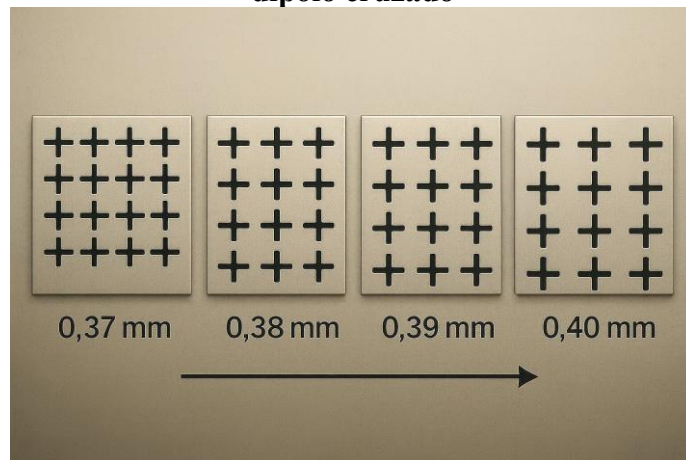
Figura 26 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) das FSS simuladas na faixa de 21 a 31 GHz com variação da periodicidade dos elementos do arranjo do tipo dipolo cruzado.



Fonte: Autores (2025)

Além da periodicidade, o estudo também investigou o efeito da variação dimensional dos elementos constituintes da FSS com geometria de dipolo cruzado. A partir da dimensão nominal previamente otimizada (fator de escala 0,38), foram simuladas variações para cima e para baixo, com o objetivo de analisar o impacto dessas mudanças no comportamento espectral da estrutura. A Figura 27 ilustra a variação do fator de escala definida para analisar a influência dimensional dos elementos constituintes da FSS com geometria dipolo cruzado.

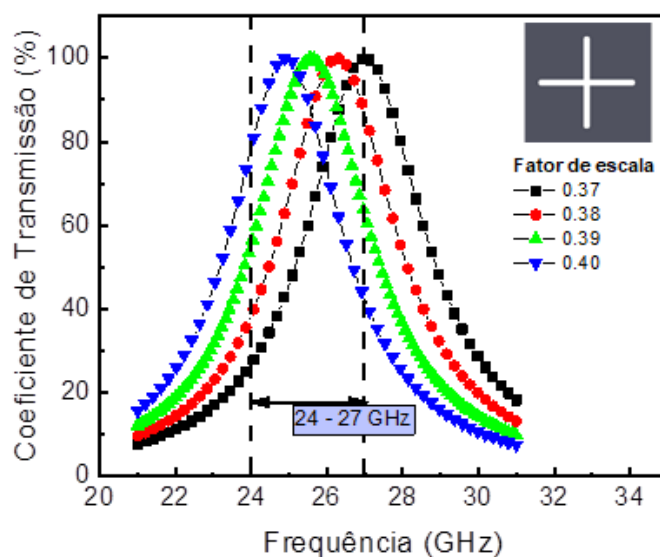
Figura 27 – Variação do fator de escala do elemento constituinte do arranjo do tipo dipolo cruzado



Fonte: Autores (2025)

A Figura 28 apresenta o coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS na faixa de 21 a 31 GHz para esses diferentes fatores de escala. Observa-se que, com o aumento do fator de escala, ocorre um deslocamento do pico de transmissão para frequências mais baixas, comportamento coerente com a relação inversa entre o comprimento de onda ressonante e as dimensões físicas do elemento. Esse deslocamento também influencia os limites de banda dentro da faixa de interesse (24 a 27 GHz), tornando a resposta espectral sensível ao escalonamento geométrico.

Figura 28 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) das FSS simuladas na faixa de 21 a 31 GHz com variação do fator de escala do elemento constituinte do arranjo do tipo dipolo cruzado



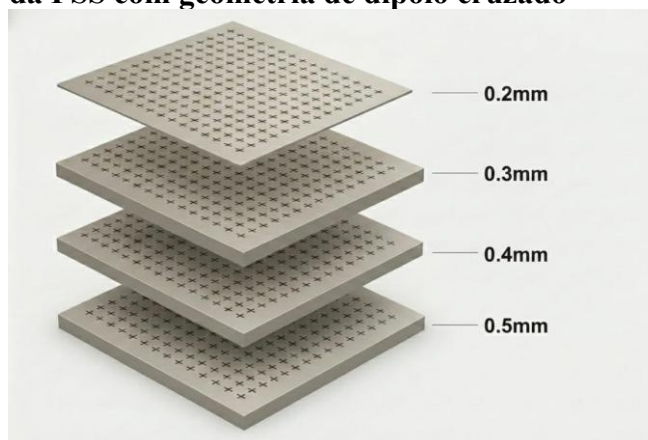
Fonte: Autores (2025)

Ao aumentar o fator de escala do dipolo cruzado, efetivamente alonga-se o caminho ressonante das correntes superficiais, o que reduz a frequência natural de ressonância da FSS.

Além disso, aumenta-se o acoplamento entre elementos vizinhos, alteram-se o campo efetivo dentro da estrutura periódica e deslocando toda a resposta espectral para frequências mais baixas.

Outro parâmetro físico investigado neste estudo foi a espessura da lâmina de alumínio utilizada na manufatura das FSS com geometria de dipolo cruzado, adotando-se um fator de escala fixado em 0,38. A análise teve como objetivo compreender de que forma a variação desse parâmetro pode influenciar tanto a resposta eletromagnética da estrutura quanto as propriedades mecânicas do laminado LFM, especialmente em aplicações que demandam simultaneamente robustez estrutural e transparência seletiva na faixa de 24–27 GHz. Para facilitar a compreensão, a variação das espessuras da lâmina de alumínio consideradas neste estudo está representada na Figura 29.

Figura 29 – Variação da espessura da lâmina de alumínio utilizada para a fabricação da FSS com geometria de dipolo cruzado

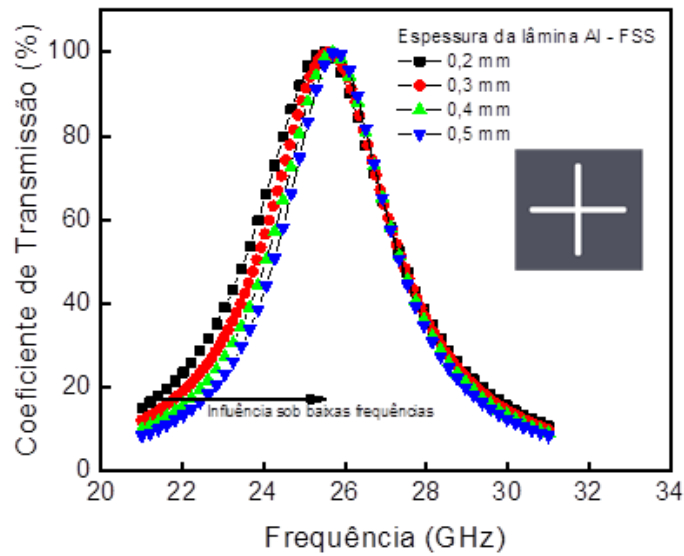


Fonte: Autores (2025)

A Figura 30 apresenta o coeficiente de transmissão (S_{21}) obtido por simulação eletromagnética na faixa de 21 a 31 GHz para diferentes espessuras da lâmina de alumínio. Os resultados mostram que a resposta espectral da FSS é pouco sensível à variação da espessura, com a curva de transmissão mantendo-se praticamente inalterada em termos de amplitude máxima ($\sim 100\%$). Entretanto, observa-se um leve deslocamento do pico de transmissão para frequências mais baixas com o aumento da espessura metálica, fenômeno

que pode ser atribuído à alteração da impedância de superfície e à distribuição das correntes superficiais induzidas.

Figura 30 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) das FSS simuladas na faixa de 21 a 31 GHz, considerando a variação da espessura da lâmina de alumínio aplicada à geometria de dipolo cruzado.



Fonte: Autores (2025)

Para frequências abaixo da banda de interesse (24–27 GHz), esse deslocamento é mais evidente, enquanto, para o limite superior da banda, a frequência de corte permanece estável. Este comportamento indica que o aumento da espessura tende a reforçar o confinamento das correntes condutoras, diminuindo as perdas ôhmicas, como previsto por Munk (2000) ao discutir os efeitos da espessura metálica na ressonância de superfícies seletivas.

A eficiência do condutor está relacionada à condição de espessura maior que a profundidade de penetração da corrente superficial (δ) (*skin depth*). Quando a espessura da lâmina metálica é superior a δ , o comportamento eletromagnético tende ao de um condutor perfeito (PEC), minimizando perdas e quando a integridade do campo ressonante.

Esses achados são coerentes com os resultados de Amabile et.al (2011), que reportaram que o aumento da espessura em estruturas de FSS pode suavizar as transições espectrais e ampliar a largura de banda, embora com impacto limitado sobre a frequência central de ressonância.

Portanto, a variação da espessura da lâmina metálica mostrou-se um parâmetro de ajuste fino, mais relevante para aspectos estruturais e mecânicos do LFM do que para o controle eletromagnético direto da FSS. Esta constatação é promissora para aplicações estruturais avançadas, permitindo otimizações mecânicas sem comprometer o desempenho espectral na banda K.

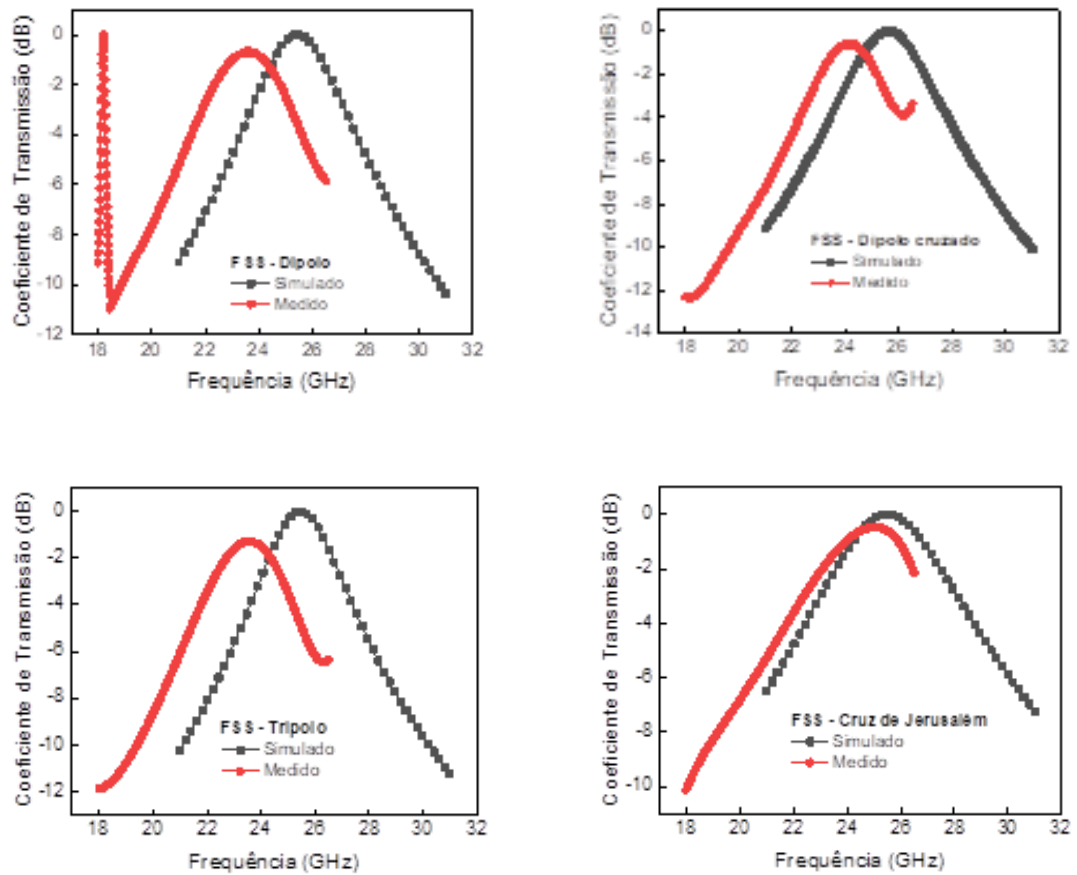
De forma geral, os dados obtidos demonstram que geometrias mais complexas tendem a apresentar múltiplas ressonâncias, mas requerem controle rigoroso de escala e espaçamento para alinhar a banda de operação com a faixa 5G. Os fatores geométricos demonstraram serem mais críticos que espessura metálica para o controle espectral. A manufatura precisa e modelagem paramétrica são essenciais para a integração em estruturas LFM funcionais.

4.3 Comparação entre Simulação e Medição Experimental das FSS

A Figura 31 apresenta os coeficientes de transmissão (S_{21}) obtidos por simulação e por medição experimental em sistema de espaço livre, para as quatro geometrias de FSS analisadas, todas otimizadas numericamente para atingir transmissão máxima em 25,5 GHz, dentro da faixa operacional de 24–27 GHz. A Tabela 4 quantifica as diferenças em termos de perda de transmissão e deslocamento de frequência entre os resultados simulados e os valores medidos.

Os dados evidenciam que todas as FSSs medidas apresentaram perdas significativas de transmissão em relação às curvas simuladas, além de deslocamentos espectrais do ponto de máxima transmissão. Entre as quatro configurações, apenas a geometria Cruz de Jerusalém manteve o pico de transmissão medido em alinhamento com a frequência simulada, demonstrando elevada estabilidade espectral e robustez dimensional frente às condições reais de medição.

Figura 31 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) das FSS simuladas na faixa de 21 a 31 GHz, com otimização para máxima transmissividade (100%) em 25,5 GHz e das FSS medidas usando o sistema de espaço livre.



Fonte: Autores (2025)

Tabela 4 – Tabela Comparativa das FSS simuladas e medidas experimentais.

Geometria	Frequência	Deslocamento GHz	Transmissão	Perda de Transmissão (%)
	Medida GHz		Medida %	
Dipolo	24,6	0,9	68	32
Dipolo cruzado	24,9	0,6	74	26
Tripolo	24,3	1,2	60	40
Cruz de Jerusalém	25,5	0	96	4

Fonte: Autores (2025)

As demais geometrias: dipolo, dipolo cruzado e trípolo, apresentaram deslocamentos relevantes do ponto de máxima transmissão. O trípolo foi o mais afetado, com o maior desvio espectral registrado, enquanto o dipolo também apresentou instabilidade acentuada, embora com usinagem mais simples. O dipolo cruzado, por sua vez, exibiu desempenho intermediário, com boa transmissão, viabilidade de fabricação e ótimo equilíbrio entre custo e precisão espectral, destacando-se como uma alternativa promissora do ponto de vista técnico e produtivo.

As diferenças observadas entre os dados simulados e experimentais podem ser atribuídas a diversos fatores, tais como, (i) erros de alinhamento ou inclinação angular das amostras no sistema de espaço livre, afetando a incidência da onda eletromagnética; (ii) Reflexões residuais e interferências externas, mesmo em ambientes parcialmente anecóicos; e limitações dos modelos numéricos, que consideram condições ideais de simulação (incidência normal, ausência de perdas dielétricas e condutivas, materiais homogêneos), contrastando com os comportamentos reais dos materiais e das interfaces dos laminados.

Apesar das discrepâncias, os resultados indicam uma tendência coerente entre os comportamentos espectral simulados e medidos, validando a eficácia geral da abordagem de projeto. A Cruz de Jerusalém se destacou como a configuração mais precisa e robusta, sendo a única a manter o pico de transmissão em 25,5 GHz também no experimento, embora com maior tempo de usinagem devido à sua complexidade geométrica.

Já o dipolo cruzado representou a melhor relação custo-benefício, conciliando desempenho satisfatório com fabricação acessível. O dipolo teve a fabricação mais ágil, mas mostrou maior sensibilidade a desvios. O trípolo, embora eficiente na simulação, apresentou grande instabilidade nas medições reais, sendo o mais suscetível a variações de montagem ou dispersões dimensionais.

Em síntese, os resultados experimentais confirmam o potencial de uso de FSS integradas a LFM para aplicações em radomes 5G aeronáuticos, desde que sejam considerados aspectos práticos de manufatura e calibragem experimental para garantir o alinhamento entre projeto e desempenho real.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a manipulação geométrica de FSS aplicadas a LFM mostrou-se eficaz para ajustar a resposta espectral das estruturas na faixa de 24–27 GHz, atendendo aos requisitos de seletividade e transparência eletromagnética para aplicações em radomes 5G aeronáuticos.

A análise das quatro geometrias avaliadas: dipolo, dipolo cruzado, trípolo e cruz de Jerusalém, demonstrou que, embora todas apresentem potencial de aplicação, o trípolo destacou-se nos resultados de simulação com transmissividade máxima centrada em 25,5 GHz, configurando-se como uma alternativa promissora do ponto de vista espectral. No entanto, a geometria Cruz de Jerusalém foi a única a apresentar coincidência entre a frequência simulada e medida, com mínimo deslocamento espectral e menor perda de transmissão em medições reais, demonstrando maior robustez eletromagnética e estabilidade dimensional, apesar do maior tempo de usinagem CNC exigido para sua fabricação.

O estudo paramétrico confirmou a relação inversa entre o fator de escala dos elementos e a frequência de ressonância, conforme previsto pelo modelo de ressonadores $\lambda/2$. Também se constatou que, entre os parâmetros estruturais analisados, a periodicidade do arranjo teve impacto mais significativo sobre o desempenho espectral do que a espessura da lâmina de alumínio utilizada. Arranjos mais compactos (menores espaçamentos entre elementos) favoreceram a centralização da resposta espectral na faixa de interesse.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que a integração de FSS do tipo abertura a LFM representa uma solução viável e tecnicamente robusta para o desenvolvimento de radomes multifuncionais, capazes de aliar rigidez mecânica, leveza e filtragem eletromagnética seletiva, características essenciais para aeronaves de próxima geração como drones e eVTOLs. Essa abordagem contribui diretamente para a melhoria da compatibilidade eletromagnética e para a viabilização de enlaces confiáveis em sistemas embarcados de comunicação 5G.

Por fim, os resultados alcançados validam a viabilidade técnica do trabalho proposto, reforçando o potencial de aplicação das FSS de abertura na faixa de 24–27 GHz. Como perspectivas futuras, destaca-se a possibilidade de explorar novas geometrias com topologias híbridas, faixas de frequência adjacentes (Ka e mmWave), bem como a realização de ensaios estruturais e eletromagnéticos em protótipos de radomes completos, com vistas à aplicação em sistemas de aeronaves inteligentes e conectadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMABILE, C.; PRATI, E.; COSTA, E.; MONORCHIO, A. Effect of the Metal Sheet Thickness on the Frequency Blueshift in Single Layer Composite Materials at Ka Microwave Frequency. **Progress In Electromagnetics Research Letters**, Vol. 22, 47-58, 2011. doi:10.2528/PIERL11010405

AIRWAYS MAGAZINE. 5G Wireless **Communications and Aviation Safety**. 2022. [5G Wireless Communications and Aviation Safety](#)

AKHTER, A. E. M., “Free-Space Time Domain Position Insensitive Technique for Simultaneous Measurement of Complex Permittivity and Thickness of Lossy Dielectric Samples,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, pp. 2394-2405, 2016. [Free-Space Time Domain Position Insensitive Technique for Simultaneous Measurement of Complex Permittivity and Thickness of Lossy Dielectric Samples | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)

AIRBUS DEFENCE AND SPACE GMBH. **Electromagnetically highly transparent radome for multi and broadband applications**. Patente DE102014005299A1, 15 out. 2015. [DE102014005299A1 - Electromagnetically highly transparent radome for multi and broadband applications - Google Patents](#)

ALDERLIESTEN, R. C. **Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates**. Springer International Publishing, 2017.

ALTAIR ENGINEERING. Bandpass FSS. In: Feko Example Guide – Radar Cross Section (RCS). Altair Feko 2021 Documentation. 2021. Disponível em: [Bandpass FSS](#)

ALTAIR ENGINEERING. Periodic Boundary Conditions for FSS Characterisation: Jerusalem Cross FSS. In: *Feko Example Guide*. Altair Engineering, 2017 [Periodic Boundary Conditions for FSS Characterisation](#)

ANNAMALAI, V.; RAJESH, S.; SURESH, S.; et al. Experimental investigation of mechanical properties of the hybrid composite using aluminum alloy, bi-directional e-glass fibre and epoxy resin. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 6004-6013, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.216101

ANWAR, R. S.; MAO, L.; NING, H. **Frequency selective surfaces: A review**. Applied Sciences. v. 8, n. 9, art. 1689, 2018. DOI: 10.3390/app8091689. [Frequency Selective Surfaces: A Review](#)

ASUNDI, A.,E CHOI, H. (1997). **Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft**. *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1–3), 384–394. [Link: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013696026520](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013696026520)

CAMPOS, A. L. P. S. **Superfícies seletivas em frequência: análise e projeto**. Natal: IFRN Editora, 2008.

CHALAPAT, K. et al. Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials.2010. Disponível em https://arxiv.org/abs/1009.4277?utm_source.

COSTA, J. T., SILVEIRINHA, M. G., MASLOVSKI, S. I. "Finite-difference frequency-domain method for the extraction of effective parameters of metamaterials." arXiv preprint arXiv:0907.3699, 2009. [\[0907.3699\] Finite-difference frequency-domain method for the extraction of effective parameters of metamaterials](#)

ETRI, H.; KORKMAZ, M. E.; GUPTA, M. K.; GÜNAY, M.; XU, J. A state-of-the-art review on mechanical characteristics of different fiber metal laminates for aerospace and

structural applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 123, n. 9-10, p. 2965-2991, 2022. doi:10.1007/s00170-022-10277-1.

Federal Register : Airworthiness Directives; MHI RJ Aviation ULC (Type Certificate Previously Held by Bombardier Inc.) Airplanes

GHODGAONKAR, D. K.; VARADAN, V. V.; VARADAN, V. K.

Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 39, n. 2, p. 387–394, 1990. DOI: 10.1109/19.52520.

GIUBBOLIN, GHODGAONKAR^R, AZLIN “**Materials using Free-Space Microwave Measurement Techniques,” 15a WCNDT, 2000. 15th World Conference on Nondestructive Testing** Roma (Italy), pp. 15-21, 2000 [Microwave Nondestructive Testing of Composite Materials using Free-Space Microwave Measurement Techniques](#)

HAGENBEEK, M., ET AL.. (2006). 203f **Characterisation of fibre metal laminate (GLARE) under impact loading.** *Journal of Composite Materials*

HANNAN, S.; ISLAM, M. T.; SOLIMAN, M. S.; MOHD SAHAR, N. B.; JIT SINGH, M. S.; FARUQUE, M. R. I.; ALZAMIL, A. **A filling-factor engineered, perfect metamaterial absorber for multiple applications at frequencies set by IEEE in C and X bands.** *Journal of Materials Research and Technology*. v. 19, p. 934–946, 2022. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.071. [A filling-factor engineered, perfect metamaterial absorber for multiple applications at frequencies set by IEEE in C and X bands - ScienceDirect](#)

HANSEN, R. C. (n.d.). *Phased Array Antennas*. Wiley, 2009

HASAN, M. S.; ISLAM, M. T.; SAMSUZZAMAN, M.; ALAMRI, S.; ALBADRAN, S.; MONIRUZZAMAN, M.; SOLIMAN, M. S. **Double elliptical resonator based quad-band incident angle and polarization angle insensitive metamaterial absorber for wireless applications.** *Optics and Laser Technology*. v. 171, art. 110334, 2024. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110334. [Double elliptical resonator based quad-band incident angle and polarization angle insensitive metamaterial absorber for wireless applications - ScienceDirect](#)

HASHAGEN, F.; KALMER, K. Application of Fibre Metal Laminates to Aircraft Structures. In: **CEAS EUROPEAN AIR AND SPACE CONFERENCE**, 2007. [S.l.], 2007. 12 f. [Application of Fibre Metal Laminates to Aircraft Structures](#)

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*. Geneva: ITU, 2017. 9 p. (Report ITU-R M.2410-0). [Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface\(s\)](#)

LANGLEY, R. J.; PARKER, E. A. **Equivalent circuit model for arrays of square loops.** *Electronics Letters*. v. 18, n. 7, p. 294–296, 1982. DOI: 10.1049/el:19820201. [Equivalent circuit model for arrays of square loops | Electronics Letters](#)

LANGLEY, R. J.; PARKER, E. A. **Double-square frequency selective surfaces and their equivalent circuit.** *Electronics Letters*. v. 19, n. 17, p. 675–677, 1983. DOI: 10.1049/el:19830460. [Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit | Electronics Letters](#)

LEE, C. K.; LANGLEY, R. J. **Equivalent-circuit models for frequency-selective surfaces at oblique angles of incidence.** *IEE Proceedings H: Microwaves, Antennas and Propagation*. v. 132, n. 6, p. 395–399, 1985. [Equivalent-circuit models for frequency-](#)

[selective surfaces at oblique angles of incidence | IEE Proceedings H \(Microwaves, Antennas and Propagation\)](#)

LI, Z.; LI, G.; WANG, Y.; ZHANG, Q.; SONG, M.; JI, X. **Numerical simulation of transient electromagnetic over casing wells with compensating coils.** *Scientific Reports*, v. 15, art. 35552, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-19448-y. [Numerical simulation of transient electromagnetic over casing wells with compensating coils | Scientific Reports](#)

LOGHIN, D.; CAI, S.; CHEN, G.; DINH, T. T. A.; FAN, F.; LIN, Q.; NG, J.; OOI, B. C.; SUN, X.; TA, Q.-T.; WANG, W.; XIAO, X.; YANG, Y.; ZHANG, M.; ZHANG, Z. **The disruptions of 5G on data-driven technologies and applications.** *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, v. 32, n. 6, p. 1179-1198, 2020 [The Disruptions of 5G on Data-Driven Technologies and Applications | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)

KURZWEIL, L. **Interference of 5G with aircraft radio altimeters:** How to protect aviation safety in rapidly changing environment of expanding C-band networks. *Aerospace Traffic and Safety*, v. 1, n. 1, 2024.

LOPES, B. H. K. **Desenvolvimento de material atenuador de radiação eletromagnética com base em compósitos magnéticos e superfícies seletoras de frequência para a banda X.** 2025. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais – Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2025. [Código 4 \[Braulio Lopes\] - Efeitos de superfícies seletoras.pdf](#)

KANDREGULA, V. R.; ZAHARIS, Z. D.; AHMED, Q. Z.; KHAN, F. A.; LOH, T. H.; SCHREIBER, J.; SERRES, A. J. R.; LAZARIDIS, P. I. A Review of Unmanned Aerial Vehicle Based Antenna and Propagation Measurements. *Sensors*, v. 24, n. 22, art. 7395, 2024. DOI: 10.3390/s24227395 [A Review of Unmanned Aerial Vehicle Based Antenna and Propagation Measurements](#)

KANDREGULA, V.R., ZAHARIS, Z.D.; AHMED, Q.Z.; KHAN, F.A.; LOH, T.H. SCHREIBER, J.; SERRES, A.J.R.; LAZARIDIS, P.I. **A Review of Unmanned Aerial Vehicle Based Antenna and Propagation Measurements.** 2024, 24, 7395. [A review of Unmanned Aerial Vehicle Based Antenna and Propagation Measurements | NPL Publications](#)

LI, Z.; PESTOURIE, R.; LIN, Z.; et al.
Empowering metasurfaces with inverse design: **principles and applications.** *ACS Photonics*, v. 9, n. 7, p. 2178–2192, 2022

MARISSEN, R. (2003). Fatigue crack growth in ARALL: A hybrid aluminium-aramid composite material. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 11(4), 241–256.

MARTINEZ, A. G.; GARCIA, M. P.; REBENAQUE, D. C.; TORNERO, L. G. Metasurface Antenna for Fast Frequency Scanning with Application to Conical Direction Finding. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 22, n. 7, p. 1632–1636, 2023. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3254433.

MATEI, A. T.; VIŞAN, A. I.; POPESCU-PELIN, G. F. **Design and Processing of Metamaterials.** *Crystals*, v. 15, n. 4, art. 374, 2025. DOI: 10.3390 [Design and Processing of Metamaterials](#)

MISHRA, R. K.; DATAR, S. **Design, Simulation, and Fabrication of High-Bandwidth Metamaterial Microwave Absorber (MMA) in X-band for EMI Shielding and Stealth**

Capability. Journal of Electronic Materials. v. 52, n. 4, p. 2626–2644, 2023. DOI: 10.1007/s11664-023-10225-z. [Design, Simulation, and Fabrication of High-Bandwidth Metamaterial Microwave Absorber \(MMA\) in X-band for EMI Shielding and Stealth Capability | Journal of Electronic Materials](#)

MUNK, B. A. **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design.** New York: Wiley-Interscience, 2000.

NARROW, J. J.; JORDAN, J. B.; KURFESS, T. R.; HUANG, Y. Advanced manufacturing for aerospace and defense: Fiber metal laminates. *JOM – The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, v. 70, n. 11, p. 2325–2333, 2018. DOI: 10.1007/s41777-018-0040-x.

ÖZİŞ, 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 p., 2017. DOI: 10.1155/2017/1356108.

PARKER, E. A.; VARDAXOGLU, J. C. **Plane-wave illumination of concentric-ring frequency-selective surfaces.** IEE Proceedings H: Microwaves, Antennas and Propagation. v. 132, n. 3, p. 176–180, 1985. DOI: 10.1049/ip-h-2:19850033. [Plane-wave illumination of concentric-ring frequency-selective surfaces | IEE Proceedings H \(Microwaves, Antennas and Propagation\)](#)

POZAR, D. M. **Microwave Engineering.** 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012. ISBN 978-0-470-63155-3.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo.** Porto Alegre: Bookman, 2004.

SAINT-GOBAIN PERFORMANCE PLASTICS.

Radome solutions for the 5G mmWave. White Paper. October 2021. [Radome solutions for 5G mmWave - Amazon Web Services](#)

SHAVIT, R. **Radome Electromagnetic Theory and Design.** New York: Wiley–IEEE Press, 2018. ISBN 978-1-119-41079-9.

SHERET, T.; PARINI, C.; ALLEN, B. Efficient Design of a Radome for Minimised Transmission Loss. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, v. 10, n. 15, p. 1662–1666, 2016.

SIEVENPIPER, D. et al. "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, 1999. [Wikipédia](#)

SIJABAT, J. P.; INDRIYANTO, T. Radar cross section analysis of unmanned combat aerial vehicle (UCAV) using FEKO software. *International Journal of Aviation Science and Engineering*, v. 2, n. 2, p. 50–56, 2020.

TASSIN, P. et al. "Low Loss Metamaterials Based on Classical Electromagnetically Induced Transparency." arXiv preprint arXiv:0807.2478, 2008. https://arxiv.org/abs/0807.2478?utm_source

TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE. *Study paper on 5G – Key Capabilities & Applications.* New Delhi: FN Division, TEC, 2019. [5G Study Paper-approved by Sr DDG.pdf](#)

Tutorial com FSS de cruz de Jerusalém (Feko Example Guide / eBook):

VLOT, A.; GUNNINK, J. W. **Advanced Fibre Metal Laminates (FML) for aeronautical applications.** Dordrecht: Springer, 2001.

VOGELESANG, L. B.; VLOT, A. *Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures*. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 103, n. 1, p. 1–5, 2000. **Xu, J., et al.** (2021).

YANG, Y.; MAO, M.; XU, J.; LIU, H.; WANG, J.; SONG, K. Millimeter-Wave Antennas for 5G Wireless Communications: Technologies, Challenges, and Future Trends. *Sensors*. v. 25, n. 17, art. 5424, 2025. DOI: 10.3390/s25175424 https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5424?utm_source

YANG, Z.; REN, W.; ZHU, L.; QING, Y.; HUANG, Z.; LUO, F.; ZHOU, W. **Electromagnetic-wave absorption property of Cr₂O₃–TiO₂ coating with frequency selective surface**. **Journal of Alloys and Compounds**. v. 803, p. 111–117, 2019. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.106. [Sci-Hub : {title} \[{doi}\]](#)

YANG, Y., MAO, M., XU, J., LIU, H., WANG, J. SONG, K. Millimeter-Wave Antennas for 5G Wireless Communications Technologies, Challenges, and Future Trends. *Sensors* 2025, 25, 5424, [Millimeter-Wave Antennas for 5G Wireless Communications: Technologies, Challenges, and Future Trends](#)

ZHANG, L. et al. "Reconfigurable all-dielectric metamaterial frequency selective surfaces." *Scientific Reports*, vol. 6, 2016. [Nature+1AIP Publishing+1](#)