



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTECENTRO
DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO



ANÁLISE DE UM SISTEMA DE MICRO-ONDAS NA MEDIÇÃO DE UMIDADE EM BLOCOS DE CONCRETO

Francisco Magno Monteiro Sobrinho

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira
Campos

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação da
UFRN (área de concentração: Engenharia
Elétrica, Telecomunicações) como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.

Número de Ordem do PPgEEC: D367

NATAL – RN

Setembro/2024

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Monteiro Sobrinho, Francisco Magno.

Análise de um sistema de micro-ondas na medição de umidade em blocos de concreto / Francisco Magno Monteiro Sobrinho. - 2024.
74f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos.

1. FSS - Tese. 2. Sensor - Tese. 3. Umidade - Tese. I. Campos, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e incentivo de pessoas especiais, às quais expresso minha profunda gratidão.

Aos meus pais, Rubens e Magnólia, por todo o amor, dedicação e sacrifício ao longo da minha jornada. Vocês foram e sempre serão minha maior fonte de inspiração e força.

Aos meus irmãos, Paulo e Vanessa, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem no meu potencial. A amizade e cumplicidade de vocês me deram a confiança necessária para seguir em frente.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos de dificuldade e de celebração. Em especial, ao Daniel, por toda a parceria, risadas e conversas que me ajudaram a manter o equilíbrio durante essa trajetória.

Ao meu orientador, Antônio Campos, pela orientação precisa, paciência e incentivo ao longo desse processo. Sua sabedoria e dedicação foram fundamentais para que eu pudesse concluir este trabalho com sucesso.

A todos, meu mais sincero agradecimento.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise de um sensor baseado em superfícies seletivas de frequência (FSS) para a medição indireta da umidade em blocos de concreto. O sensor proposto utiliza a variação na frequência de ressonância da FSS para detectar mudanças na umidade relativa dos blocos, oferecendo uma abordagem não destrutiva e eficiente para a monitorização de materiais de construção. Foram realizados experimentos para comparar os resultados simulados e medidos, demonstrando uma boa concordância entre eles. A análise revelou uma forte correlação negativa ($r = -0,981$) entre a frequência de ressonância e a umidade relativa, indicando que a frequência diminui conforme a umidade aumenta. A comparação entre o sensor proposto e o sensor de referência mostrou uma melhoria significativa na sensibilidade e na precisão do sensor desenvolvido. Os resultados indicam que o sensor proposto é eficaz em detectar variações de umidade e supera os sensores existentes na literatura em termos de sensibilidade e precisão. Esta abordagem não destrutiva proporciona uma solução inovadora para a monitorização de umidade em blocos de concreto, contribuindo para a avaliação e manutenção de estruturas de construção com maior eficiência e confiabilidade.

Palavras-chave: FSS, SHM, Sensor, Umidade.

Abstract

This work presents the development and analysis of a sensor based on frequency selective surfaces (FSS) for the indirect measurement of moisture in concrete blocks. The proposed sensor utilizes the variation in the resonance frequency of the FSS to detect changes in the relative humidity of the blocks, offering a non-destructive and efficient approach for monitoring construction materials. Experiments were conducted to compare simulated and measured results, demonstrating good agreement between them. The analysis revealed a strong negative correlation ($r = -0.981$) between the resonance frequency and relative humidity, indicating that the frequency decreases as the moisture increases. Comparison between the proposed sensor and a reference sensor showed significant improvements in sensitivity and accuracy. The results indicate that the proposed sensor is effective in detecting moisture variations and surpasses existing sensors in the literature in terms of sensitivity and precision. This non-destructive approach provides an innovative solution for moisture monitoring in concrete blocks, contributing to the evaluation and maintenance of construction structures with greater efficiency and reliability.

Keywords: FSS, SHM, Sensors, Moisture.

Lista de Abreviaturas e Símbolos

AE - Emissão Acústica

FSS - Frequency selective surfaces

PRFS- Alteração Percentual na Frequência de Ressonância

PRFSE - Aprimoramento da Alteração Percentual na Frequência de Ressonância

S – Sensibilidade

SE - Aumento de Sensibilidade

SHM - Structural Health Monitoring

TE - Transverso Elétrico

TM - Transverso Magnética

UT - Ultrassom

φ - Ângulo de incidência da onda

λ - comprimento de onda

XL- indutância

w - espessura da espira;

d - comprimento da espira;

g - espaçamento entre a espira referência e a subsequente

p - periodicidade da espira.

W – Largura da antena de microfita

L – Comprimento da antena de microfita

ϵ_{ref} - Permissividade efetiva;

ϵ_r - Permissividade relativa do material;

h - Espessura do substrato;

ΔL - acréscimo de comprimento

L_m - linha de microfita

W_m - largura da linha de microfita

D1 - distância entre o elemento a ser medido

D - maior dimensão física da antena

ϵ_0 - constante dielétrica do vácuo

W_s - peso saturado do bloco

W_d - peso seco do bloco em estufa

B_d - densidade do bloco.

UR - umidade relativa

Δf_r - Variação observada na frequência de ressonância;

f_r - Frequência de ressonância;

$\Delta \epsilon_r$ - Variação da permissividade relativa;

$\Delta \mu$ - Variação na permeabilidade magnética;

μ_0 - Permeabilidade do espaço livre;

E_0 - Distribuição de campo elétrico sem perturbação externa;

H_0 - Distribuição de campo magnético sem perturbação externa;

E_1 - Distribuição de campo elétrico com perturbação externa;

H_1 - Distribuição de campo magnético com perturbação externa;

v - Volume do elemento a ser perturbado na análise.

Sumário

Agradecimentos.....	3
Resumo.....	4
Abstract.....	5
Lista de Abreviaturas e Símbolos.....	6
Sumário.....	8
Lista de Figuras.....	10
Lista de Tabelas.....	11
Capítulo 1: Introdução.....	12
Capítulo 2: Fundamentação Teórica.....	15
2.1 Monitoramento da Saúde Estrutural - SHM - <i>Structural Health Monitoring</i>	15
2.1.1 Etapas do SHM.....	18
2.1.2 Aplicação de antenas de microfita no SHM	20
2.1.3 Sensores ressonadores de microondas	21
2.2 Superfície Seletiva de Frequência – <i>frequency selective surface</i> - FSS.....	22
2.2.1 Formas dos elementos	24
2.2.2 Relação da espessura com a resposta em frequência da FSS.....	28
2.2.3 Técnicas de análise da FSS	30
2.2.4 Método do circuito equivalente	31
2.2.4.1 Geometria espiras quadradas.....	33
2.2.5 Técnicas de medição da FSS.....	34
2.3 Antenas de microfita	36
2.3.1 Método de alimentação por linha de microfita	39
2.3.2 Método de análise por linha de transmissão	40

Capítulo 3: Materiais e Métodos.....	44
3.1 Caracterização do bloco de concreto.....	47
3.2 Caracterização da antena de microfita.....	49
3.3 Caracterização da FSS	51
3.4 Método de medição utilizado	52
3.5 Análise da eficácia do sensor.....	54
Capítulo 4: Resultados e Discussões.....	56
4.1 Elementos do sistema	56
4.2 Resultados experimentais do sensor	59
4.3 Análise estatística dos dados	62
4.4 Análise de sensibilidade do sensor	64
Conclusão	67
Referências.....	70

Lista de Figuras

Figura 1: Etapas do processo SHM	18
Figura 2: Elementos da FSS (a) Tipo abertura (b) Tipo <i>Patch</i>	23
Figura 3: Geometria das células (a) Tripolo (b) Dipolo fino (c) Dipolo cruzado e (d) Crus Jerusalém.	25
Figura 4: Configurações das espiras (a) Espiras quadradas (b) Espira quadrada dupla (c) Espira quadrada dupla com grade e (d) anéis circulares	27
Figura 5: Tipos de <i>patches</i> (a) <i>Patch</i> Retangular (b) <i>Patch</i> hexagonal e (c) <i>patch</i> circular	28
Figura 6: Grupo 4 com combinação de elementos	28
Figura 7: Método do circuito equivalente (a) Dipolos periódicos em fitas paralelas, (b) Ângulo de inciência donda, largura e periodicidade.....	31
Figura 8: Arranjo da FSS(a) Espira circular com os parâmetros (b) Circuito equivalente	33
Figura 9: Medição de FSS com um par de antenas	34
Figura 10: Medição da FSS com antenas e lentes	35
Figura 11: Antena de microfita.....	36
Figura 12: Alimentação por linha de microfita	40
Figura 13: Antena de microfita (a) Linha de transmissão e (b) Linhas de campos	41
Figura 14: Efeito de borda no <i>patch</i> (a) Vista superior do <i>patch</i> e (b) Efeito do franjamento no comprimento da antena	42
Figura 15: Fases de monitoriamento.....	45
Figura 16: Processo de medição utilizado	46
Figura 17: Configuração da antena de microfita utilizada, dimensões em mm.....	50
Figura 18: Estrutura FSS	52
Figura 19: Fluxograma do processo de medição.....	53
Figura 20: Comparação entre resultados simulados e medidos para a antena de microfita.....	57
Figura 21: Comparação entre resultados simulados e medidos para a FSS projetada	58
Figura 22: Resposta em frequência dos coeficientes de transmissão dos blocos para todos os valores de umidades testados: (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 e (e) B5	60
Figura 23: Gráfico de regressão.	64
Figura 24: Comparativo do Δf_r do sensor proposto com a referência [74].	64
Figura 25: Comparativo do PRFS do sensor proposto com o da referência [74].	65
Figura 26: PRFSE comparado com a referência [74].....	65
Figura 27: Comparativo da sensibilidade do sensor proposto com [74].	66
Figura 28: Sensibilidade melhorada do sensor proposto.	66

Lista de Tabelas

Tabela 1: UR em (%) e as frequências de ressonância obtidas em (GHz) para as medições dos 5 blocos durante os experimentos.....	61
Tabela 2: Tipo e função de regressão e suas métricas de erro.	63

Capítulo 1: Introdução

A durabilidade e integridade estrutural de construções são de extrema importância na engenharia civil. Uma das principais preocupações é a presença de umidade em blocos de concreto, que pode comprometer a resistência mecânica e a durabilidade da estrutura ao longo do tempo. O Monitoramento da Saúde Estrutural (*Structural Health Monitoring - SHM*) surge como uma solução para identificar precocemente esses problemas, permitindo intervenções corretivas antes que os danos se tornem críticos [1], [2], [3].

Neste contexto, o uso de superfícies seletivas de frequência (*frequency selective surfaces - FSS*) como sensores para detecção de umidade em blocos de concreto apresenta-se como uma abordagem promissora para aprimorar o SHM na construção civil. O desenvolvimento de uma metodologia eficaz para monitorar a umidade em blocos de concreto utilizando FSS poderia revolucionar a forma como a integridade de estruturas é avaliada, proporcionando maior segurança e durabilidade às construções [4] a [10].

A justificativa para o desenvolvimento desta tese baseia-se na detecção da umidade em blocos de concreto, pois a água é um dos principais agentes de degradação das estruturas de concreto. A presença de umidade pode provocar corrosão das armaduras, expansão de materiais e redução das propriedades mecânicas, comprometendo a vida útil da construção. Além disso, o monitoramento contínuo da umidade permite a realização de manutenções preventivas, evitando reparos custosos e prolongando a durabilidade das estruturas. A implementação de sistemas de SHM baseados em FSS e antenas de microfita é justificada pela necessidade de soluções inovadoras e eficientes para o monitoramento contínuo de estruturas, visando aumentar a segurança e reduzir os custos de manutenção.

O Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM) vem evoluindo com o uso de tecnologias avançadas para a detecção de falhas e degradação em estruturas. Dentre as técnicas utilizadas, as FSS destacam-se por sua capacidade de responder a variações no ambiente, como a presença de umidade, através da alteração de suas propriedades ressonantes. As antenas de microfita, conhecidas por sua compactação e flexibilidade de design, têm sido amplamente empregadas em conjunto com FSS para o desenvolvimento de sensores eficientes. Normas internacionais, como a ASTM C90, estabelecem limites e parâmetros para a absorção de água em blocos de concreto, o que reforça a importância de monitoramento contínuo e preciso, alinhando-se ao estado da arte em SHM e sensorística.

A hipótese desta tese propõe que a integração de antenas de microfita com a FSS possibilitará a análise de múltiplas frequências ressonantes, as quais se correlacionam diretamente com o nível de umidade presente em blocos de concreto. Com isso, espera-se o desenvolvimento de um sensor capaz de monitorar a umidade de forma precisa e eficiente, oferecendo uma contribuição relevante para o SHM no setor da construção civil.

O principal objetivo desta tese é desenvolver um sistema de monitoramento da saúde estrutural de blocos de concreto, avaliando a influência da umidade em sua estrutura e validando a eficácia do sistema proposto. Especificamente, pretende-se:

- Caracterizar os blocos de concreto, a FSS e as antenas de microfita;
- Desenvolver um método de medição utilizando FSS em conjunto com antenas de microfita;
- Analisar a eficiência do sensor em termos de variação de frequência de ressonância e sensibilidade;
- Validar o sistema através de testes experimentais e análise estatística dos dados.

Em relação as delimitações do sensor proposto, pode-se destacar:

- **Precisão e Sensibilidade:** esses sensores são capazes de medir a umidade com alta precisão, geralmente com um erro médio muito baixo. Isso é crucial para garantir a qualidade e durabilidade dos materiais de construção.
- **Faixa de Umidade:** a faixa de umidade que esses sensores podem medir é bastante ampla, geralmente de 10% a 90% de umidade relativa. Isso permite que sejam utilizados em diversas condições ambientais e de material.
- **Interferências:** a precisão dos sensores pode ser afetada por interferências eletromagnéticas e pela presença de outros materiais com diferentes constantes dielétricas. Portanto, é importante calibrar os sensores corretamente e considerar essas variáveis durante a medição.
- **Aplicabilidade:** esses sensores são especialmente úteis para monitorar a integridade estrutural (SHM) de edificações, permitindo a detecção precoce de falhas e danos. Eles são usados tanto em blocos de concreto vazados quanto em outros materiais de construção.
- **Tecnologia Utilizada:** a tecnologia de micro-ondas permite a medição não invasiva da umidade, o que é uma vantagem significativa em comparação com métodos tradicionais que podem danificar o material. Essas delimitações tornam os sensores de micro-ondas uma ferramenta valiosa na construção civil, ajudando a garantir a qualidade e a

segurança das estruturas.

A organização desta tese é estruturada da seguinte maneira:

Capítulo 2: Referencial Teórico: este capítulo trata-se de uma revisão sobre os conceitos de Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM), superfícies seletivas em frequência (FSS) e antenas de microfita, com foco nas normas e metodologias aplicadas à detecção de umidade em blocos de concreto. A abordagem detalha o uso dessas tecnologias para medir e monitorar a integridade estrutural de materiais, oferecendo suporte teórico para a implementação de técnicas de SHM específicas para o setor da construção civil.

Capítulo 3: Materiais e Métodos: este capítulo apresenta um detalhamento dos materiais utilizados, incluindo a caracterização dos blocos de concreto, das superfícies seletivas em frequência (FSS) e das antenas de microfita. Descreve-se o método de medição da FSS utilizando um par de antenas de microfita, seguido pela análise da eficiência do sensor, com enfoque na variação da frequência de ressonância e na alteração percentual da frequência de ressonância (PRFSE). Aspectos como sensibilidade e incremento de sensibilidade (SE) também são discutidos, destacando os parâmetros críticos para avaliar o desempenho do sistema de detecção de umidade.

Capítulo 4: Resultados e Discussões: neste capítulo, são apresentados os elementos constituintes do sistema de medição, seguidos dos resultados práticos obtidos com o sensor para detecção de umidade em blocos de concreto. São realizadas análises estatísticas dos dados coletados, proporcionando uma avaliação detalhada da sensibilidade do sensor em relação às variações de umidade. A discussão foca na interpretação dos resultados e na eficiência do sistema, abordando aspectos cruciais para validar a capacidade de detecção e precisão do sensor no monitoramento da saúde estrutural dos blocos.

Capítulo 2: Fundamentação Teórica

Este capítulo aborda os conceitos teóricos relacionados ao monitoramento da saúde estrutural (SHM), além dos principais parâmetros operacionais das superfícies seletivas de frequência (FSS) e das antenas de microfita, que serviram como base para o desenvolvimento deste estudo. Serão explorados os princípios fundamentais do SHM e como as FSS e as antenas de microfita desempenham papéis cruciais na detecção e análise de variações estruturais, com foco na aplicação em blocos de concreto e no impacto da umidade sobre suas propriedades.

2.1 Monitoramento da Saúde Estrutural - SHM - *Structural Health Monitoring*

O desenvolvimento tecnológico tem sido um dos principais fatores de transformação da sociedade nas últimas décadas, influenciando praticamente todos os aspectos da vida moderna. Desde a revolução digital, iniciada na segunda metade do século XX, até os avanços mais recentes em inteligência artificial e biotecnologia, a tecnologia tem redefinido a forma como trabalhamos, nos comunicamos, e interagimos com o mundo ao nosso redor.

Diversos estudos têm sido realizados para assegurar a segurança e a confiabilidade de grandes infraestruturas, especialmente em setores críticos como a construção civil, a indústria aeroespacial e a engenharia *offshore*. Com o avanço da tecnologia, aumentou-se a demanda por métodos de monitoramento contínuo e mais eficientes para detecção de danos em estruturas dessas áreas, especialmente à medida que essas se tornaram mais complexas e exigentes em termos de padrões de qualidade. Esse processo é definido como Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*).

No contexto do SHM, "dano" é caracterizado por alterações nas propriedades do material, na geometria da estrutura ou nas condições de contorno, como mudanças de conectividade ou na rigidez, impactando negativamente o desempenho estrutural, esses danos contribuem para a prevenção de falhas catastróficas, permitindo a intervenção antes que os problemas atinjam um estágio crítico. [1], [2] e [3].

Em estudos recentes, há uma crescente tendência de pesquisas focadas em métodos generalistas de identificação de danos. Embora isso tenha promovido um maior número de estudos acadêmicos voltados para o monitoramento de danos em diversas estruturas, a

abordagem generalista pode limitar o desenvolvimento de soluções específicas, que considerem a variabilidade de materiais e as condições ambientais distintas de cada tipo de estrutura. Isso torna necessária a busca por técnicas mais especializadas e soluções direcionadas, considerando as particularidades de cada aplicação e as normas específicas, especialmente em ambientes agressivos ou condições estruturais específicas, como a presença de umidade, corrosão e esforços mecânicos contínuos.

No mercado, existe uma ampla gama de soluções para avaliação não destrutiva (END) e monitoramento contínuo de processos estruturais. As técnicas END permitem avaliar a integridade e qualidade de materiais e estruturas sem causar danos físicos, sendo, portanto, ideais para inspeções contínuas. Abaixo, são descritas as principais tecnologias END empregadas para SHM, cada uma com aplicações específicas e vantagens técnicas:

- **Ultrassom (UT):** utilizado para detecção de fissuras, vazios, corrosão e variação de espessura em materiais como metais e concreto. Os transdutores ultrassônicos, especialmente as configurações *phased array*, permitem uma avaliação detalhada e a detecção de falhas internas [5].
- **Termografia Infravermelha:** ideal para identificar falhas térmicas, delaminações e umidade. As câmeras de alta resolução capturam as variações térmicas superficiais, associando-as a potenciais falhas estruturais. Essa técnica é amplamente aplicada em inspeções de fachadas e monitoramento de estruturas de concreto [6].
- **Ondas acústicas:** esse método detecta a liberação de ondas acústicas, provenientes de microfissuras e processos de corrosão em materiais submetidos a tensão. A técnica é eficaz para monitoramento contínuo, especialmente em componentes críticos, como cascos de navios e torres eólicas [7].
- **Radiografia Digital e Computadorizada (RX):** usada para inspeção interna de componentes e detecção de porosidade e trincas, essa técnica é amplamente adotada no setor aeroespacial e automotivo. A radiografia permite a visualização precisa de falhas internas sem a necessidade de desmontagem [8].
- **Sensores de Fibra Óptica:** empregados no monitoramento de deformação, temperatura, umidade e pressão, são altamente sensíveis e oferecem precisão na coleta de dados em estruturas de concreto e compósitos. Sensores de Rede de Bragg, por exemplo, detectam mudanças nas propriedades estruturais em tempo real [9].
- **Sensores Eletromagnéticos (FSS e RFID):** superfícies seletivas em frequência (FSS) e antenas RFID são utilizadas para detectar umidade e monitorar corrosão em estruturas metálicas. Eles oferecem alta sensibilidade a variações nas propriedades dielétricas,

tornando-os ideais para monitoramento em ambientes de construção civil [10].

- **Correntes de Eddy (EC):** essa técnica é utilizada para detectar fissuras em materiais condutores e medir espessura e corrosão. É amplamente aplicada na inspeção de soldas e revestimentos protetores, especialmente em estruturas expostas a condições ambientais agressivas [11].

No contexto técnico, dano refere-se a alterações no sistema que afetam negativamente seu desempenho, tanto a curto quanto a longo prazo. A avaliação do dano requer a comparação entre os estados inicial e final do sistema, evidenciando modificações nas suas propriedades. Importante notar que o termo "dano" não implica necessariamente na perda total da funcionalidade, mas sim em um desvio em relação ao desempenho ideal ou original do sistema. [1].

A aplicação do SHM na engenharia envolve a observação contínua de estruturas ou sistemas mecânicos ao longo do tempo, por meio de medições periódicas. Essas medições fornecem dados sensíveis aos danos, permitindo avaliar o estado atual do sistema e oferecer uma base de dados para a detecção de alterações do estado atual do sistema [1], [3] e [5].

A capacidade de monitorar a saúde das estruturas tem ganhado destaque nos últimos anos, especialmente no contexto comercial. A detecção rápida e eficiente de danos em produtos ou na infraestrutura de fabricação permite que os gestores tomem decisões precisas para a correção desses danos, impactando positivamente a economia e a vida útil da produção [12], [13] e [14].

Algumas aplicações de monitoramento de danos incluem por exemplo, a avaliação das superfícies estruturais de um satélite espacial afetadas por raios solares ou por impactos de objetos, bem como a verificação da segurança de um prédio para reocupação após um terremoto significativo. O SHM tem o potencial de oferecer a tecnologia necessária para reduzir significativamente a incerteza associada a essas avaliações de danos e melhorar a precisão das decisões sobre reparação e segurança. Os principais fatores que impulsionaram a aplicação do SHM e facilitaram a transição da pesquisa para a prática direta foram:

- **Avanços Tecnológicos:** o desenvolvimento de sensores mais precisos e sistemas de coleta de dados mais avançados permitiu uma monitorização mais detalhada e confiável das estruturas [5] e [6].
- **Redução de Custos:** a diminuição dos custos associados a sensores e tecnologias de monitoramento tornou a implementação do SHM mais viável economicamente para uma ampla gama de aplicações [5] e [8].

- **Aumento da Conscientização:** a crescente conscientização sobre a importância da manutenção preventiva e da segurança estrutural destacou a necessidade de soluções eficazes como o SHM [6] e [7].
- **Desenvolvimento de Algoritmos de Análise:** o progresso em algoritmos de processamento e análise de dados possibilitou a interpretação mais eficaz das informações coletadas, facilitando a detecção e a avaliação de danos [10] e [11].
- **Regulamentações e Normas:** a introdução de regulamentações e normas que exigem monitoramento contínuo de estruturas críticas incentivou a adoção do SHM em projetos práticos [12].
- **Casos de Estudo e Demonstrações:** estudos de caso e demonstrações bem-sucedidas mostraram os benefícios tangíveis do SHM, encorajando sua aplicação em contextos práticos [13].

2.1.1 Etapas do SHM

A literatura mostra que é possível classificar o processo de SHM em quatro etapas apresentada na Figura a seguir e detalhando a função de cada etapa no processo [4], [5], [6] [7] e [8]:

Figura 1: Etapas do processo SHM



Fonte: Autoria própria

- **Avaliação Operacional:** nesta etapa, busca-se justificar a aplicação do SHM em termos econômicos, identificando danos e suas possíveis implicações. A avaliação permite determinar quais danos são mais críticos e quais múltiplas possibilidades de

falha devem ser consideradas. Além disso, é essencial analisar as condições ambientais nas quais o sistema monitorado operará para garantir a eficácia do SHM. Finalmente, são identificadas as principais limitações do monitoramento realizado, considerando fatores como custo, precisão e capacidade de detecção em diferentes condições operacionais [4] e [5].

- **Aquisição e normalização de dados:** essa etapa é classificada como a seleção do método adotado para o SHM. Inclui a escolha dos tipos de sensores para a aquisição de dados, bem como os hardwares necessários para o armazenamento ou transmissão dos dados em um intervalo definido. A normalização das medições durante a coleta é crucial devido à variabilidade nas condições de medição. Isso permite a separação dos dados alterados por condições adversas, garantindo a precisão e a consistência das informações coletadas [6] e [7].
- **Extração e condensação de informações:** essa é uma etapa muito importante para o estudo da aplicação do SHM do sistema, pois a identificação de características de dados permite determinar qual estrutura está ou não danificada. O método bastante utilizado para a extração de recursos se baseia na correlação de grandezas de respostas do sistema medido, como: amplitude ou frequência de vibração. O uso de ferramentas analíticas, como testes finitos validados experimentalmente, modelos de elementos constituem um recurso estratégico para este processo. Em muitos casos, as análises de ferramentas são usadas para realizar experimentos numéricos onde as falhas são introduzidas através de simulação computacional [6] e [8].
- **Desenvolvimento de modelos estatístico:** nesta etapa final é possível desenvolver modelos estatísticos para discriminar as características das estruturas, se estão ou não danificadas. Os modelos estatísticos são normalmente usados para responder a perguntas sobre a existência e localização do dano, quando aplicado em um modo de aprendizado supervisionado e acoplados a modelos analíticos [8].

Portanto, o monitoramento da saúde estrutural (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*) é um processo que utiliza diversas técnicas e tecnologias para avaliar a condição de estruturas como pontes, edifícios e outras infraestruturas. Assim, o objetivo principal do SHM é garantir a segurança e a eficiência operacional das estruturas ao longo do tempo, pois consegue detectar danos ou deterioração em estágios iniciais, prevenindo falhas catastróficas e aumentando a vida útil das estruturas. Além disso, com o avanço de tecnologias como a inteligência artificial e a aprendizagem de máquina, o SHM está se tornando cada vez mais

eficiente e preciso.

2.1.2 Aplicação de antenas de microfita no SHM

No estudo apresentado em [9], verificou-se que antenas de microfita circulares podem detectar deformações em materiais compósitos, como fibra de carbono e alumínio. A pesquisa evidenciou uma relação linear entre a deformação e o deslocamento percentual na frequência ressonante das antenas, independentemente dos materiais utilizados na sua fabricação. As antenas detectaram deformações com uma variação de 100 kHz na frequência ressonante para cada etapa de carregamento.

Para aprimorar a sensibilidade do sensor na aplicação de SHM, foi implementada uma antena de microfita com *patch* circular e *slots* regulares no centro da antena. Essa configuração introduz uma nova frequência de ressonância acima da segunda frequência, tornando a antena três vezes mais sensível à tensão em comparação com o sensor inicial. O efeito do slot no *patch* facilita a medição da tensão, com a frequência de trabalho do slot sendo mais que o dobro da do *patch* simples. A sensibilidade do sensor de antena depende da direção relativa da tensão e do comprimento (ou largura) da ranhura, permitindo a detecção de tensões em diferentes direções por meio de uma combinação de sensores de antena [9].

O trabalho analisado em [10] destaca a importância de implementar uma antena de microfita de *patch* circular com *slots* regulares no centro, o que aumenta a sensibilidade do sensor em três vezes em relação ao modelo inicial para a detecção de deformações. A nova configuração introduz uma frequência de ressonância adicional, superior à segunda frequência de ressonância, e o efeito do slot no *patch* facilita a medição da tensão. A frequência de trabalho do slot é mais que o dobro da do *patch* simples, e a sensibilidade do sensor depende da direção da tensão.

Além disso, o estudo discute a importância do número de sensores para a confiabilidade do sistema SHM, reconhecendo que este número é limitado pela complexidade da rede, tamanho e peso dos sensores, e, no caso de sensores sem fio convencionais, pela curta vida útil das baterias. Nesse contexto, a introdução de sensores passivos de deformação sem fio se apresenta como uma solução promissora.

O trabalho demonstra que, ao monitorar a mudança na frequência de ressonância, é possível determinar a tensão na estrutura hospedeira, permitindo o monitoramento sem fio da integridade estrutural em aplicações aeroespaciais e na engenharia civil. A técnica proposta determina o S_{11} da estrutura, utilizando o sinal sem fio de uma antena de microfita. Além disso, a pesquisa revela que a deformação pode ser monitorada em qualquer direção desejada e que a

distância entre a antena transmissora e a estrutura influencia a leitura da frequência de ressonância devido à atenuação do sinal em relação ao ruído [15].

2.1.3 Sensores ressonadores de microondas

Os sensores ressonadores de micro-ondas são dispositivos que utilizam princípios de ressonância eletromagnética para detectar mudanças em propriedades materiais, como umidade, temperatura e concentração de substâncias químicas. Devido à sua alta sensibilidade e capacidade de operação em tempo real, esses sensores têm sido amplamente utilizados em diversas áreas [16].

Os sensores ressonadores operam com base na detecção de alterações na frequência de ressonância causada por mudanças nas propriedades dielétricas do meio ao redor do sensor. A configuração mais comum é o ressonador em forma de anel ou *patch*, onde a variação na frequência de ressonância é proporcional à variação das propriedades do material a ser detectado [17].

Por definição, um ressonador de micro-ondas é uma estrutura que consiste em circuitos RLC (resistor, indutor e capacitor) dispostos em paralelo. Esses circuitos equivalentes, que podem ser considerados como elementos concentrados ou quase agrupados, são projetados para confinar a energia eletromagnética em uma determinada região. Os ressonadores de micro-ondas são de grande interesse devido à ampla gama de aplicações que oferecem, incluindo filtros, osciladores, frequencímetros e amplificadores sintonizados [16] e [17].

Sensores de micro-ondas baseados em ressonadores de micro-ondas têm sido amplamente relatados por pesquisadores para a detecção e caracterização de diversos materiais sólidos que operam em diferentes frequências. Os autores [18] e [19] projetaram um sensor para a detecção de tipos de solo e umidade. O erro encontrado na detecção desses tipos de materiais foi de 5%.

Outras pesquisas para aplicação na detecção de materiais sólidos foi produzido por [20], que utilizaram um ressonador de anel dividido para detectar tipos de farinha a uma frequência de operação de 3,57 GHz. Antes de testar as amostras de farinha, os autores calibraram o sensor com diferentes materiais sob teste, que incluíam plástico, Perspex, vidro epóxi e vidro. Amostras sólidas de Teflon, Viz, PVC, borracha e madeira foram testadas e relatadas na literatura utilizando diferentes técnicas. No entanto, o erro máximo relatado foi de menos de 8%.

Desenvolvimentos recentes na área de sensores de ressonadores de micro-ondas levaram a um renovado interesse na caracterização de materiais, especialmente para a detecção de líquidos e suas misturas. Exemplos iniciais de sensores de ressonadores de micro-ondas para a detecção de líquidos incluem a determinação da permissividade de óleos [21].

Uma técnica não destrutiva baseada em um sensor RF planar foi apresentada por [21] para detectar óleos comestíveis, como azeite, óleo de coco, óleo de soja, óleo de girassol e óleo de mostarda. Os autores também investigaram a adulteração de óleos comestíveis, misturando uma porcentagem de óleos de mostarda e girassol no azeite. A capacidade do sensor em detectar os óleos adulterados foi observada, pois a permissividade diminuía à medida que aumentava a porcentagem de adulteração.

No estudo realizado por [22], têm sido realizados para o monitoramento de glicose. Isso se deve à capacidade dos sensores de micro-ondas de medir não destrutivamente os parâmetros dentro do volume, uma vez que as técnicas de monitoramento diário da glicose são invasivas, exigindo uma amostra de sangue para medir os parâmetro. Neste estudo, houve uma alteração na resposta de frequência do sensor projetado, onde as variações da concentração de glicose no plasma sanguíneo foram utilizadas (85 mg/dL, 130 mg/dL, 150 mg/dL). Isso indica que os sensores de ressonador de micro-ondas têm a capacidade de detectar o nível de concentração de glicose de forma não invasiva.

No estudo apresentado em [23], foi desenvolvido um sensor planar inspirado na estrutura biológica da folha Shiso, incorporando um elemento ressonador com capacitores interdigitais (IDC) para aumentar a sensibilidade na medição da permissividade elétrica de materiais planares dielétricos. Esse sensor foi projetado especificamente para a caracterização de materiais com base na variação de frequência ressonante da antena. Os autores realizaram medições experimentais em campo com métodos de ensaios não destrutivos para obter dados de permissividade elétrica de três diferentes amostras de materiais dielétricos. Os resultados mostraram uma alta precisão, com os valores medidos de permissividade elétrica das amostras sendo próximos dos valores reais relatados na literatura, demonstrando a eficácia do sensor para aplicações de caracterização dielétrica.

2.2 Superfície Seletiva de Frequência – *frequency selective surface* - FSS

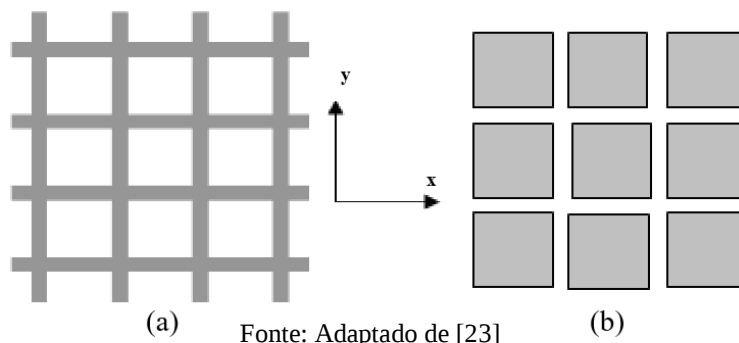
Os primeiros estudos sobre superfícies seletivas de frequência (*frequency selective surface* - FSS) remontam ao século XVIII, com um dos principais pesquisadores sendo David

Rittenhouse. Em seu experimento, Rittenhouse utilizou um pano de seda e observou que algumas cores do espectro de luz eram suprimidas ao serem vistas através do material, [24], [25].

Em um de seus estudos, David Rittenhouse posicionou um arranjo de fios igualmente espaçados em direção à luz e observou que a luz branca era filtrada dentro de uma faixa específica de comprimentos de onda. Ele concluiu que a resposta em frequência dependia das dimensões físicas do anteparo com aberturas periodicamente espaçadas, demonstrando a relação entre a estrutura física e o comportamento seletivo em frequência [24] e [25].

As FSS podem ser definidas como arranjos periódicos infinitos em 2D ou 3D, apresentando características capacitivas e/ou indutivas, dependendo da forma dos seus elementos. Esses elementos podem ser do tipo abertura ou *patch*. Além disso, a forma dos elementos não se limita apenas a esses dois tipos, podendo haver combinações entre eles. A Figura 2 ilustra, respectivamente, exemplos de elementos do tipo abertura e *patch*. [26] e [27].

Figura 2: Elementos da FSS (a) Tipo abertura (b) Tipo *Patch*



Fonte: Adaptado de [23]

Os elementos do tipo abertura em uma FSS atuam como um filtro passa-faixa. À medida que esses elementos atingem sua frequência de ressonância, a estrutura se torna praticamente transparente à onda incidente, permitindo a transmissão total da radiação nessa frequência específica. Isso significa que, em sua frequência de ressonância, a FSS não apresenta impedimentos significativos à passagem das ondas, facilitando a propagação do sinal [28].

Os elementos do tipo *patch* comportam-se como filtro rejeita-faixa em torno da frequência de ressonância. Quando esses elementos alcançam a ressonância, eles não apenas absorvem parte da potência incidente, mas também a irradiam de volta na direção de reflexão. Como resultado, ocorre uma quase total reflexão da onda incidente na frequência de

ressonância, impedindo sua passagem através da estrutura. Essa característica torna os elementos do tipo patch especialmente úteis em aplicações onde é desejável bloquear ou redirecionar sinais em frequências específicas [29].

Essas propriedades distintas dos elementos de abertura e patch em FSS são fundamentais para a sua aplicação em diversas áreas, incluindo comunicações sem fio, *design* de antenas e monitoramento da saúde estrutural, onde a manipulação precisa das ondas eletromagnéticas é necessária para otimizar a eficiência e a eficácia dos sistemas.

Os principais parâmetros que influenciam as variações em uma FSS incluem:

- **Tipo do elemento:** a forma e o design do elemento, como abertura ou *patch*, afetam a resposta em frequência da FSS.
- **Dimensões da estrutura:** as dimensões físicas dos elementos e da estrutura como um todo impactam as propriedades ressonantes.
- **Dielétrico utilizado:** o material dielétrico entre os elementos influencia a resposta em frequência da FSS.
- **Periodicidade:** a distância entre as células unitárias (elementos repetidos) altera a periodicidade e, conseqüentemente, o comportamento eletromagnético da FSS.

2.2.1 Formas dos elementos

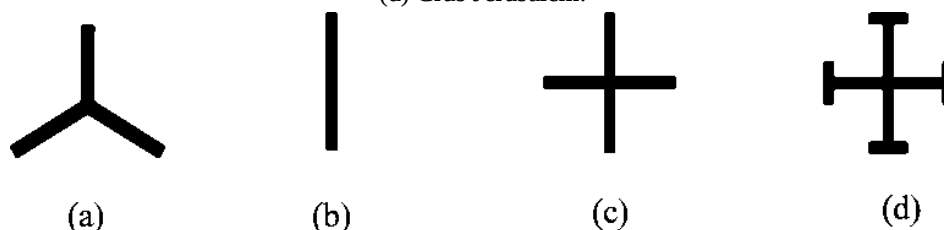
Na literatura, diversos estudos investigam o impacto de diferentes geometrias na célula unitária de uma FSS, uma vez que a geometria afeta diretamente a frequência de operação. Essas geometrias são tipicamente classificadas em quatro categorias principais, que podem ser combinadas para criar modelos de FSS com propriedades exclusivas. Esses grupos são [25], [27], [30] e [31].

Grupo 1: Dentro deste grupo de geometrias para células unitárias da FSS, observa-se uma relação entre os n-polos conectados pelo centro, que são configurações comuns devido às suas propriedades eletromagnéticas específicas, os modelos mais utilizados são ilustrados na Figura 3:

- **Tripolo:** envolve três elementos conectados ao centro, formando uma estrutura triangular. Essa geometria pode melhorar a seletividade e a largura de banda, proporcionando características adicionais de filtragem.
- **Dipolo Fino:** consiste em dois elementos lineares paralelos e próximos, que atuam como um dipolo. Essa geometria é simples e permite o controle preciso da frequência de ressonância com base na largura e no comprimento dos elementos.

- **Dipolo Cruzado:** inclui dois dipolos que se cruzam, criando uma configuração com maior complexidade e a possibilidade de sintonizar múltiplas frequências. A interseção dos dipolos influencia a resposta de frequência e a polarização.
- **Cruz Jerusalém:** caracteriza-se por uma estrutura cruzada com elementos dispostos de forma que formam uma cruz central. Essa configuração é eficaz para a obtenção de bandas de rejeição específicas e pode ser ajustada para diferentes frequências.

Figura 3: Geometria das células (a) Tripolo (b) Dipolo fino (c) Dipolo cruzado e (d) Cruz Jerusalém.



Fonte: Adaptado de [23]

Essas geometrias são escolhidas e ajustadas com base na frequência de operação desejada nas propriedades de transmissão ou reflexão exigidas para aplicações específicas.

Grupo 2: Este grupo abrange os elementos do tipo espira nas superfícies seletivas em frequência (FSS), os quais apresentam uma variedade de configurações que utilizam formas espirais para influenciar a resposta de frequência da estrutura. Os elementos em espiral são particularmente interessantes devido à sua capacidade de sintonização e ressonância em uma ampla gama de frequências, permitindo um controle mais preciso sobre as características de transmissão e reflexão das ondas eletromagnéticas.

Dentro deste grupo, os elementos do tipo espira nas FSS incluem uma variedade de configurações projetadas para otimizar a resposta de frequência de acordo com as necessidades específicas das aplicações. As espiras são particularmente eficazes na criação de características de filtragem desejadas, como bandas de rejeição, devido às suas propriedades ressonantes. A seguir, são descritas algumas das configurações mais relevantes:

- **Espiras Quadradas:** estas espiras consistem em formas espirais organizadas em um padrão quadrado, oferecendo uma resposta de frequência ajustável que pode ser otimizada para aplicações específicas. A geometria das espiras quadradas permite a criação de bandas de rejeição eficazes, tornando-as úteis em sistemas de filtragem onde a supressão de frequências indesejadas é necessária.
- **Espiras Quadradas Duplas:** esta configuração apresenta duas espiras concêntricas. A

sobreposição melhora a seletividade e proporciona maior flexibilidade na definição da frequência de operação e na largura de banda. Essa disposição em camadas pode resultar em uma resposta mais precisa e ajustável, permitindo um controle mais eficaz sobre o comportamento da FSS.

- **Espiras Quadradas com Grades:** nessa configuração, grades adicionais são incorporadas ao redor das espiras quadradas. Essas grades modificam a interação eletromagnética e a resposta de frequência das espiras, permitindo a criação de filtros mais complexos. A adição de grades possibilita um ajuste mais refinado da performance da FSS, aumentando a eficácia na supressão de frequências indesejadas.
- **Anéis Circulares:** compostas por múltiplos anéis circulares dispostos de forma concêntrica, essa geometria é conhecida por suas propriedades de ressonância. Os anéis circulares podem ser utilizados para projetar filtros com características específicas de frequência e polarização, oferecendo versatilidade no design de dispositivos que requerem manipulação precisa de ondas eletromagnéticas.

Essas diferentes configurações de espiras em FSS são fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias que exigem controle sobre a transmissão e reflexão de sinais eletromagnéticos, sendo amplamente utilizadas em aplicações de comunicação, sensores e dispositivos de filtragem. A flexibilidade dessas configurações permite a personalização dos dispositivos para atender a requisitos específicos, demonstrando a relevância dos elementos do tipo espira no campo das FSS.

A Figura 4 ilustra essas diferentes configurações de espiras, destacando como a variação na geometria pode influenciar a resposta de frequência das FSS. A escolha da configuração adequada é essencial para atender aos requisitos de desempenho específicos em aplicações como comunicações sem fio, dispositivos de filtragem e monitoramento de condições ambientais. A versatilidade dos elementos em espiral os torna um tópico relevante de estudo para o avanço das tecnologias em FSS.

Figura 4: Configurações das espiras (a) Espiras quadradas (b) Espira quadrada dupla (c) Espira quadrada dupla com grade e (d) anéis circulares



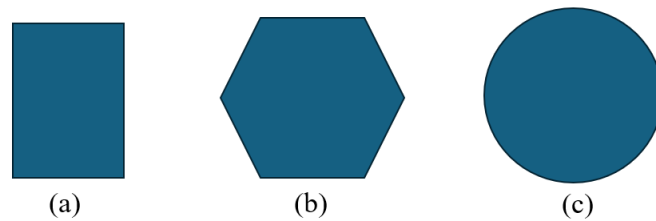
Fonte: Adaptado de [23]

Essas configurações são amplamente estudadas por suas capacidades de ajuste fino na resposta de frequência e pela versatilidade na implementação de filtros com características desejadas para diversas aplicações eletromagnéticas.

Grupo 3: este grupo abrange elementos sólidos, cujas configurações são fundamentais para a otimização das características de ressonância das FSS. Os tipos mais comuns de elementos sólidos utilizados em células unitárias são ilustrados na Figura 5 e incluem:

- **Patches Retangulares:** esses elementos sólidos têm a forma de retângulos e são amplamente utilizados em FSS devido à sua simplicidade e eficiência na criação de bandas de ressonância específicas. A geometria retangular permite um fácil ajuste das dimensões, o que possibilita a otimização da resposta de frequência e da largura de banda. Essa flexibilidade torna os patches retangulares uma escolha popular em aplicações que requerem controle preciso sobre a interação de ondas eletromagnéticas.
- **Patches Hexagonais:** com formato hexagonal, esses patches são selecionados por suas propriedades geométricas que favorecem uma distribuição mais uniforme dos campos eletromagnéticos. Essa configuração não apenas melhora a eficiência na propagação de sinais, mas também proporciona uma resposta de frequência aprimorada com um padrão de dispersão mais eficaz. A simetria do patch hexagonal contribui para um desempenho superior em muitas aplicações, especialmente em dispositivos que necessitam de um controle robusto sobre a polarização.
- **Patches Circulares:** os elementos sólidos com formato circular são frequentemente utilizados para criar filtros que apresentam características de ressonância específicas, além de garantir uniformidade no padrão de dispersão. Esses patches são particularmente úteis em aplicações que requerem uma resposta isotrópica ou uma configuração radial. A geometria circular permite um alinhamento eficiente das ondas eletromagnéticas, facilitando a manipulação de sinais em diferentes direções.

Figura 5: Tipos de *patches* (a) *Patch* Retangular (b) *Patch* hexagonal e (c) *patch* circular



Fonte: Adaptado de [23]

Essas diferentes configurações de patches sólidos em FSS são essenciais para o desenvolvimento de dispositivos que exigem um controle preciso sobre as propriedades de ressonância e filtragem. A escolha do tipo de patch a ser utilizado deve considerar não apenas as características desejadas da resposta de frequência, mas também as especificidades da aplicação em questão. A versatilidade e a eficácia desses elementos sólidos fazem deles uma parte fundamental na pesquisa e no design de FSS modernas

Grupo 4: se caracteriza pela combinação de elementos dos grupos apresentados anteriormente, onde é possível a criação de uma ampla gama de estruturas híbridas para células unitárias da FSS. Nesse grupo, elementos tradicionais são combinados para explorar novas propriedades eletromagnéticas e criar designs com características específicas. Na Figura 6 mostram exemplos dessas combinações.

Figura 6: Grupo 4 com combinação de elementos



Fonte: Adaptado de [12]

Essas combinações permitem uma flexibilidade significativa no design de FSS, possibilitando a criação de elementos com propriedades específicas para aplicações variadas, desde comunicações até aplicações de radar e sensores.

2.2.2 Relação da espessura com a resposta em frequência da FSS

As FSS podem ser classificadas em duas categorias principais: anteparo fino e anteparo espesso. Essa classificação é fundamental para a definição das propriedades eletromagnéticas das FSS, pois influencia diretamente o comportamento de transmissão e reflexão em diferentes

faixas de frequência.

- **Anteparo Fino:** as FSS de anteparo fino são caracterizadas por uma espessura da camada de metalização inferior a $0,001 \lambda_0$, onde λ_0 representa o comprimento de onda correspondente à frequência de ressonância da estrutura. Esta categoria apresenta diversas vantagens em relação às FSS de anteparo espesso, destacando-se:
- **Menor Volume e Peso:** devido à sua espessura reduzida, as FSS de anteparo fino ocupam menos espaço e são mais leves, tornando-as ideais para aplicações onde a compactação e o peso são fatores críticos.
- **Custo Reduzido:** a fabricação dessas FSS pode ser realizada utilizando tecnologias convencionais de circuitos impressos, o que facilita sua produção em larga escala e contribui para a viabilidade econômica dessas estruturas em diversas aplicações.

Essas características tornam as FSS de anteparo fino especialmente atraentes para projetos em setores como telecomunicações, onde eficiência e custo são fatores determinantes [25], [27] e [32]

Anteparo Espesso: por outro lado, as FSS de anteparo espesso apresentam uma camada de metalização mais robusta ou utilizam uma configuração de dupla camada de metalização. Esta técnica, conhecida como cascadeamento, consiste em dispor duas FSS separadas por um material dielétrico, sendo o ar o dielétrico mais comum empregado devido à sua baixa perda. As principais características e vantagens das FSS de anteparo espesso incluem:

- **Aumento da Largura de Banda:** a configuração de dupla camada contribui para uma maior largura de banda, permitindo uma operação mais eficiente em uma faixa mais ampla de frequências.
- **Melhoria da Estabilidade Angular:** FSS de anteparo espesso tendem a apresentar maior estabilidade em diferentes ângulos de incidência, o que é crítico em aplicações onde a orientação da estrutura pode variar.
- **Características Multibanda:** esta categoria de FSS pode ser projetada para operar eficientemente em múltiplas frequências, tornando-as adequadas para aplicações que em ambientes complexos [33] e [34]

A escolha entre FSS de anteparo fino e espesso deve considerar as exigências específicas da aplicação, incluindo fatores como espaço disponível, custo, desempenho em múltiplas frequências e robustez em relação a variações angulares. A compreensão das propriedades e vantagens de cada tipo de anteparo é essencial para o desenvolvimento de soluções eficazes em tecnologia de FSS.

2.2.3 Técnicas de análise da FSS

As técnicas de análise visam determinar as características de transmissão e reflexão das FSS compostas por *patches* condutores ou aberturas. O modelo do circuito equivalente é utilizado para otimizar o tempo computacional, oferecendo simulações eficientes e resultados que, em muitas situações, são considerados satisfatórios. Contudo, é importante reconhecer que tais abordagens podem apresentar limitações significativas em aplicações específicas, levando a resultados que carecem de precisão em determinados cenários. Essa imprecisão pode ser atribuída a simplificações ou suposições presentes nos modelos, que não capturam integralmente a complexidade de certas configurações eletromagnéticas [35] e [36].

Para determinar as propriedades eletromagnéticas de uma FSS, a técnica de análise por circuito equivalente, que se baseia na modelagem da FSS como um circuito composto por elementos discretos, é considerada satisfatória. Essa abordagem permite uma compreensão clara das propriedades físicas de estruturas periódicas, além de proporcionar uma análise rápida e simplificada. A técnica também oferece uma visão intuitiva dos mecanismos físicos subjacentes à operação da FSS, facilitando a interpretação dos fenômenos de transmissão e reflexão, bem como a otimização do desempenho da estrutura em diferentes condições operacionais.

A técnica de circuito equivalente permite modelar elementos de FSS, como *patches* condutores, e ela permite simplificar a análise segmentando a estrutura em componentes básicos. Ao segmentar a fita que compõe o elemento patch de uma FSS, cada segmento pode ser modelado como um componente indutivo ou capacitivo, dependendo das características elétricas e da geometria do segmento em relação ao comprimento de onda.. A partir dessa modelagem, é possível resolver o circuito e, assim, determinar as características de transmissão e reflexão da FSS. Essa técnica emprega uma aproximação quase estática para calcular os componentes do circuito, o que possibilita uma análise computacional extremamente rápida. Além disso, essa abordagem simplificada é eficiente para captar as propriedades eletromagnéticas fundamentais da FSS, mantendo a precisão em diversos cenários de aplicação [25], [37] e [38].

A técnica de análise de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) é amplamente reconhecida na literatura devido à sua capacidade de analisar determinado tipo de elemento, incluindo a modelagem de perdas dielétricas em estruturas não homogêneas. Apesar de sua versatilidade e precisão na simulação de comportamentos eletromagnéticos complexos, o método FDTD exige um esforço computacional significativo. Esse alto custo computacional

se deve à necessidade de tratar os dados discretos tanto no espaço quanto no tempo, o que resulta em grandes volumes de dados e requer considerável poder de processamento e memória para simulações detalhadas [25] e [39]. Contudo, com os avanços computacionais ao longo dos anos, a limitação de tempo de resposta deixou de ser um fator decisivo.

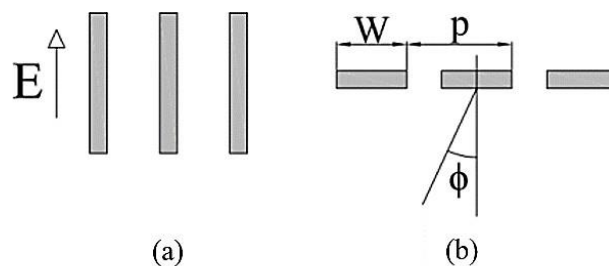
Em [40] e [41] técnicas de inteligência artificial, por meio de algoritmos genéticos, são empregadas na síntese da FSS. Esses algoritmos otimizam o processo de projeto, explorando vastos espaços de solução de maneira eficiente para determinar as configurações que atendam a critérios específicos de desempenho, como largura de banda, estabilidade angular e comportamento multibanda. Ao utilizar métodos evolutivos, é possível automatizar a busca por estruturas ideais, reduzindo significativamente o tempo e o esforço de desenvolvimento, especialmente em casos em que a complexidade do problema torna inviável a otimização por técnicas convencionais.

2.2.4 Método do circuito equivalente

Neste trabalho será utilizado o método numérico do circuito equivalente, pois é frequentemente abordado na análise da FSS devido à sua capacidade de simplificar o processo. Esse método reduz significativamente os recursos computacionais necessários, ao modelar a FSS como um circuito composto por elementos discretos, como indutâncias e capacitâncias. Além disso, o método exige menor complexidade na programação em comparação com técnicas mais detalhadas, o que o torna uma escolha atrativa para situações em que se busca um equilíbrio entre precisão e eficiência computacional [42].

Para qualquer geometria utilizada neste estudo, o ponto inicial para que seja possível determinar a reatância e admitância do elemento será sempre o dipolo simples, como mostra a Figura 7.

Figura 7: Método do circuito equivalente (a) Fitas condutoras paralelas, ao campo elétrico, (b) Ângulo de incidência da onda, largura e periodicidade.



Fonte: Adaptado de [25]

Por meio das equações aproximadas, é possível determinar a reatância indutiva e a admitância normalizada para o modo de incidência transversal elétrico (TE). Neste contexto, considera-se que as fitas possuem uma espessura desprezível, largura w , e periodicidade p . O ângulo de incidência da onda é denotado por ϕ , e λ representa o comprimento de onda. A expressão numérica $G(p, w, \lambda, \phi)$ é uma função que depende do parâmetro $C_{\pm}$ o qual relaciona a periodicidade e o comprimento de onda, e β , que correlaciona a espessura e a periodicidade. Os termos G , C e β são elementos numéricos específicos do método de circuito equivalente, utilizados para simplificar e quantificar a análise das propriedades eletromagnéticas da FSS [43].

Para a geometria apresentada, pode-se considerar que existe uma capacitância entre os condutores adjacentes. No caso de um dipolo periódico, é observado que surge uma indutância no condutor devido à densidade superficial de corrente induzida pelo campo incidente. Essa indutância, representada por X_L , pode ser modelada pela Equação (1), que descreve a reatância indutiva de um dipolo para o modo de incidência TE [12].

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \phi) = \frac{p \cos \phi}{\lambda} \left\{ \ln \left[\csc \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \phi) \right\} \quad (1)$$

De acordo com o estudo apresentado em [20], foram desenvolvidas equações numéricas específicas para o cálculo dos termos que compõem a Equação (1). Assim, esses termos podem ser computados utilizando-se as Equações (2), (3) e (4), as quais fornecem uma base matemática para a obtenção dos resultados desejados, garantindo a precisão necessária para a análise subsequente.

$$G(p, w, \lambda, \phi) = \frac{0,5(1 - \beta^2)^2 \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right)(C_+ + C_-) + 4\beta^2 C_+ C_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) + \left[\beta^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8}\right)(C_+ + C_-) \right] + 2\beta^6 C_+ C_-} \quad (2)$$

$$\beta = \sin \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \quad (3)$$

$$C_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \sin(\phi)}{\lambda} - \left(\frac{p \cos(\phi)}{\lambda} \right)^2}} \quad (4)$$

No modo de propagação transversal magnético (TM), o campo elétrico incide de forma perpendicular à superfície da fita, enquanto o campo magnético é paralelo a ela, com uma orientação angular definida por ϕ . A Equação (5) é utilizada para determinar a reatância

capacitiva equivalente, levando em consideração as características geométricas e eletromagnéticas do sistema, conforme discutido em [25].

$$\frac{B_c}{Z_0} = 4F(p, w, \lambda, \phi) \quad (5)$$

2.2.4.1 Geometria espiras quadradas

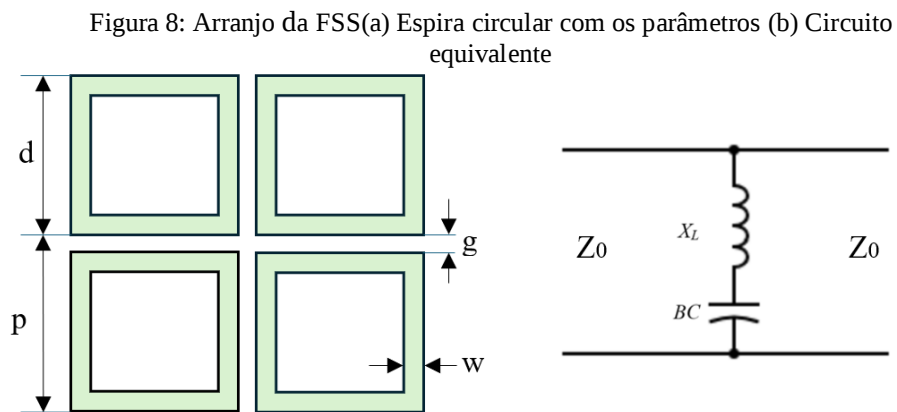
Espiras quadradas são elementos condutores utilizados na FSS para manipular ondas eletromagnéticas, funcionando como ressonadores que influenciam a transmissão e reflexão das ondas em função de sua frequência. A influência do tamanho, largura e espaçamento de suas espiras influenciam no comportamento eletromagnético da estrutura [42] e [44].

As espiras quadradas atuam como ressonadores LC, influenciando a transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas. Sua frequência de ressonância é determinada pela indutância, relacionada ao comprimento do condutor, e pela capacitância, dependente do espaçamento entre espiras.

Em frequências de ressonância, as espiras refletem ou bloqueiam ondas incidentes, enquanto fora dessa faixa, permitem a passagem das ondas. Essas estruturas são utilizadas em filtros de ondas, antenas e refletores dicróicos, com maior eficiência para incidência normal e limitações em ângulos maiores e polarização cruzada [43].

A Figura 8 (a) ilustra o arranjo físico da FSS com espiras quadradas e seus parâmetros para dimensionamento e 7 (b) corresponde o circuito equivalente dessa estrutura.

- w é a espessura da espira;
- d é o comprimento da espira;
- g é o espaçamento entre a espira referência e a subsequente
- p é a periodicidade da espira.



Fonte: Adaptado de [20]

Aplicando o método do circuito equivalente é possível determinar as reatâncias indutivas e capacitivas associadas a esta geometria, as Equações (6) a (8) são utilizadas para determinar essas variáveis.

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d}{p} F(p, 2w, \lambda, \phi) \quad (6)$$

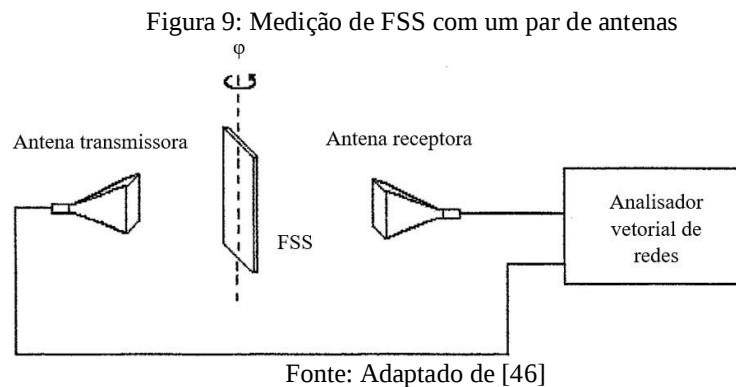
$$\frac{B_C}{Z_0} = 4 \frac{d}{p} F(p, g, \lambda, \phi) \quad (7)$$

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4\epsilon_r \frac{d}{p} F(p, g, \lambda, \phi) \quad (8)$$

Neste trabalho será utilizado essa geometria, devido as suas características já apresentadas anteriormente.

2.2.5 Técnicas de medição da FSS

Na literatura, diversos métodos experimentais são descritos para determinar as características de transmissão e reflexão da FSS. A Figura 9 ilustra um procedimento simplificado para medir a transmissão de uma estrutura de teste. Nesse procedimento, a FSS é posicionada entre duas antenas diretivas, uma antena transmissora e uma antena receptora, ambas com ganhos padrão. Esse arranjo permite a avaliação direta da capacidade de transmissão da FSS, proporcionando dados que podem ser utilizados para analisar suas propriedades eletromagnéticas. [25], [46], [48] e [49].



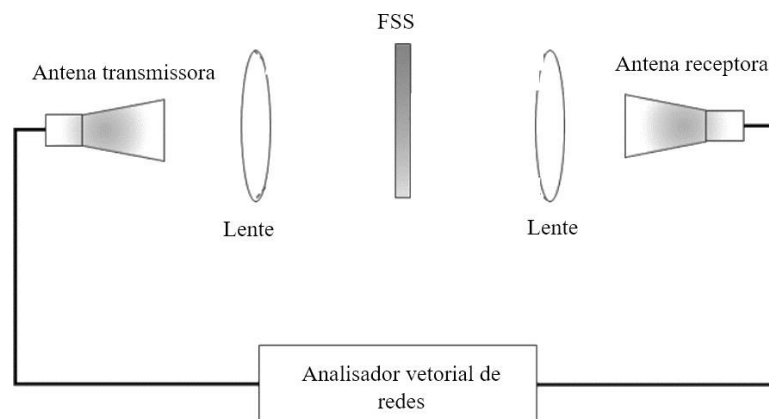
A FSS é posicionada de modo a atender às condições de campo distante. Para garantir isso, a distância entre as antenas deve ser suficientemente grande para que as ondas eletromagnéticas radiadas se aproximem da placa como ondas planas. Esse arranjo é essencial para assegurar que as medições de transmissão e reflexão realizadas estejam dentro do regime

de campo distante, onde os efeitos de difração e curvatura das ondas são minimizados, e as ondas incidentes podem ser consideradas como planas [50].

A FSS atua como um filtro, permitindo a passagem ou bloqueio de determinadas frequências da onda radiada pela antena transmissora. Para investigar a resposta da FSS sob ângulos diferentes, ou seja, para analisar a incidência oblíqua, é necessário ajustar o ângulo de inclinação da estrutura onde a FSS está fixada. Esse ajuste permite alinhar a FSS corretamente entre as antenas transmissora e receptora em cada medição. Isso garante que a FSS interaja com a onda eletromagnética de maneira controlada, mantendo a coerência dos resultados para diferentes ângulos de incidência [50]. As características de transmissão nas polarizações transversa elétrica (TE) e transversa magnética (TM) da estrutura são obtidas variando a polarização das antenas. No entanto, é importante considerar que os dados medidos podem ser comprometidos devido a difrações nas bordas da FSS [51].

Para mitigar o problema da difração nas bordas na FSS, é necessário utilizar lentes entre a FSS e as antenas, conforme ilustrado na Figura 10. Essas lentes são projetadas para converter as ondas esféricas emitidas pelas antenas em um feixe de ondas planas, garantindo que as condições de campo distante sejam mantidas e reduzindo os efeitos de difração que podem comprometer a precisão das medições.

Figura 10: Medição da FSS com antenas e lentes



Fonte: Adaptado de [46]

Outra técnica para minimizar os efeitos de difração nas bordas é a medição em câmara anecoica. Esse método é realizado em um ambiente confinado, equipado com absorvedores ao redor da estrutura para eliminar as difrações nas bordas e absorvedores nas paredes para reduzir as reflexões. A câmara anecoica proporciona um ambiente controlado, onde as ondas refletidas e difratadas são atenuadas, permitindo uma avaliação mais precisa das características da FSS.

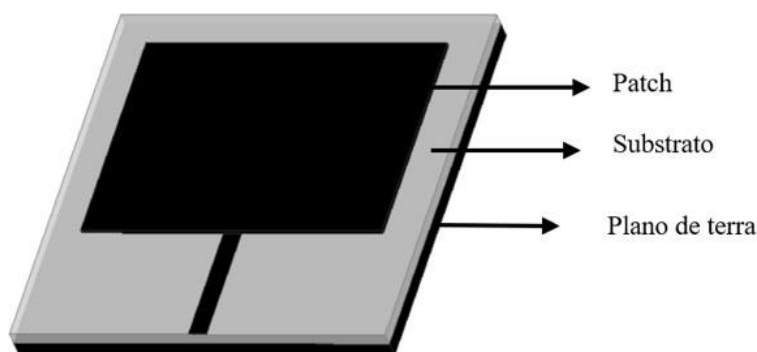
2.3 Antenas de microfita

Os sistemas de comunicação sem fio têm avançado rapidamente devido a inovações tecnológicas significativas. Nesse contexto, as antenas de microfita têm se destacado por suas vantagens, como tamanho reduzido, facilidade de adaptação a superfícies variadas e baixo custo de fabricação. Esses atributos as tornam uma escolha ideal para atender às crescentes demandas e complexidades dos sistemas de comunicação modernos [52].

A antena de microfita é constituída por um *patch*, que atua como o elemento radiante, posicionado em uma das superfícies do substrato dielétrico. Na superfície oposta do substrato, encontra-se o plano de terra, o qual serve como referência para a propagação do sinal eletromagnético.

A disposição de suas partes construtivas pode ser visualizada conforme ilustrado na Figura 11. Essa configuração resulta em um sistema de radiação eficiente e compacto, amplamente utilizado em comunicações sem fio.

Figura 11: Antena de microfita



Fonte: Autoria própria

O *patch* de uma antena de microfita é composto por uma lâmina de material condutor, cuja principal função é irradiar ondas eletromagnéticas. Este *patch* pode ser projetado em diversas geometrias, tais como retangular, circular, elíptica, entre outras, sendo que a escolha da geometria exerce influência direta na distribuição de corrente e nos campos eletromagnéticos na superfície da antena. Consequentemente, o padrão de radiação da antena é determinado pela distribuição de campo entre o *patch* e o plano de terra, como evidenciado em estudos anteriores [53].

O substrato de uma antena de microfita é composto por materiais dielétricos e desempenha a função de armazenar energia em função da frequência de operação da antena. Considerado um dos componentes essenciais das antenas de microfita, o substrato influencia diretamente as perdas de energia e a largura de banda da antena, devido às suas propriedades eletromagnéticas. Portanto, a escolha do material dielétrico é crucial para o desempenho geral da antena, afetando sua eficiência e capacidade de operação em diferentes frequências [54].

A faixa da constante dielétrica dos substratos utilizados na fabricação de antenas de microfita varia tipicamente entre $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Para otimizar o desempenho da antena, é preferível utilizar um substrato mais espesso e com constante dielétrica mais baixa, pois isso resulta em maior eficiência de radiação e aumento na largura de banda. No entanto, substratos com essas características geralmente apresentam um custo elevado, tornando-se um fator limitante na produção em larga escala.

Na faixa de micro-ondas, substratos de baixa espessura geralmente possuem altas constantes dielétricas, o que proporciona menores irradiações e reduz os acoplamentos indesejáveis. No entanto, esses substratos tendem a ser menos eficientes e apresentam largura de banda mais estreita [55]. A geometria do substrato, suas características mecânicas e suas propriedades eletromagnéticas influenciam de maneira significativa no confinamento dos campos, na radiação, no acoplamento, nas perdas e na largura de banda da antena. Essas propriedades são determinantes para o surgimento de fenômenos eletromagnéticos como a propagação em modo quase TEM (Transversal Eletromagnético), o surgimento de ondas de superfície e o comportamento anisotrópico do sistema.

O plano de terra em uma antena de microfita é constituído por uma fita metálica e está localizado na superfície inferior do substrato. Sua principal função é atuar como um refletor, impedindo o desenvolvimento de um lóbulo traseiro intenso, além de servir como ponto de aterramento do sistema. Em teoria, o plano de terra é geralmente considerado infinito, a fim de simplificar os cálculos analíticos e numéricos [56].

As transmissões de informações em antenas de microfita ocorrem por meio de ondas eletromagnéticas em diferentes frequências. Comparadas às antenas convencionais, as antenas de microfita oferecem diversas vantagens, especialmente quando operam na faixa de frequência adequada. Essas vantagens incluem:

- **Baixo perfil:** as antenas de microfita são finas e leves, o que as torna ideais para aplicações onde o espaço é limitado ou o peso precisa ser reduzido. A frequência de ressonância pode ser obtida de maneira mais fácil;
- **Facilidade de fabricação:** podem ser fabricadas utilizando técnicas de fotolitografia,

o que permite produção em larga escala e a integração com circuitos impressos.

- **Compatibilidade com superfícies curvas:** devido à sua flexibilidade, podem ser montadas em superfícies não planas, aumentando suas possibilidades de aplicação.
- **Custo relativamente baixo:** embora alguns materiais possam ser caros, a simplicidade do design e do processo de fabricação pode resultar em economia de custos, especialmente em grandes quantidades.
- **Versatilidade em design:** a geometria do *patch* pode ser adaptada para diferentes necessidades de radiação, o que permite a personalização do desempenho da antena para aplicações específicas.
- **Aplicabilidade em diversas faixas de frequência:** podem ser projetadas para operar eficientemente em uma ampla gama de frequências, tornando-as adequadas para diferentes tipos de sistemas de comunicação.

Essas características tornam as antenas de microfita especialmente vantajosas para aplicações em comunicações sem fio, dispositivos móveis, satélites e sistemas de radar. As antenas de microfita, embora possuam diversas vantagens, também apresentam algumas limitações em comparação com as antenas convencionais, tais como:

- **Largura de banda limitada:** uma das principais desvantagens das antenas de microfita é sua largura de banda geralmente estreita, o que pode limitar a eficiência em aplicações que exigem ampla faixa de frequência.
- **Baixa eficiência:** devido às perdas no substrato dielétrico e no condutor, as antenas de microfita tendem a ter menor eficiência em comparação com antenas de outras tecnologias, como as de dipolo ou de refletor parabólico.
- **Potência de saída limitada:** devido ao seu pequeno tamanho e à capacidade limitada de dissipar calor, as antenas de microfita não são adequadas para aplicações que exigem transmissão de alta potência.
- **Sensibilidade ao ambiente:** as características de radiação das antenas de microfita podem ser afetadas por fatores externos, como a presença de materiais próximos, que podem alterar o padrão de radiação e a impedância de entrada.
- **Baixa diretividade:** em sua configuração básica, as antenas de microfita possuem baixa diretividade, o que pode ser uma desvantagem em aplicações que requerem feixes de radiação altamente direcionados.
- **Fabricação sensível:** embora a fabricação em larga escala seja viável, o desempenho das antenas de microfita pode ser altamente sensível a imperfeições na fabricação,

como variações na espessura do substrato ou no acabamento do *patch* condutor.

Essas limitações devem ser consideradas durante o processo de projeto e seleção de antenas de microfita para aplicações específicas, especialmente em comparação com alternativas convencionais.

2.3.1 Método de alimentação por linha de microfita

A alimentação por meio de linha de microfita em antenas de microfita é realizada através de uma fita condutora feita do mesmo material que o *patch*, porém com uma largura significativamente menor. Essa linha condutora é posicionada sobre o substrato da antena e conecta a fonte de alimentação diretamente ao *patch*, permitindo a transferência de energia para a radiação do sinal [53].

Uma das principais vantagens desse método de alimentação é a facilidade de fabricação e a simplicidade na integração com o design da antena, tornando-o uma escolha prática para diversas aplicações. No entanto, essa configuração apresenta uma desvantagem relacionada ao aumento da espessura do substrato, o que pode resultar no surgimento de ondas de superfície e radiações indesejadas, comprometendo o desempenho da antena [49].

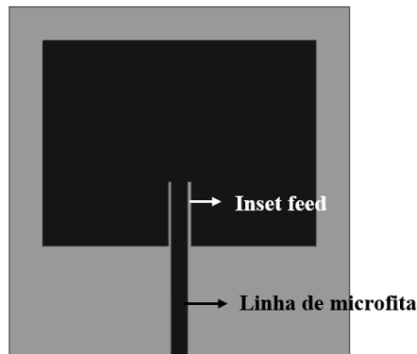
Na linha de microfita, os campos eletromagnéticos estão distribuídos em duas regiões distintas: uma parte dos campos está concentrada na região entre o condutor e o plano de terra, dentro do substrato dielétrico, enquanto a outra parte dos campos se encontra na região de ar acima do substrato. Essa distribuição em duas regiões distintas resulta em uma não-homogeneidade na linha de microfita, o que impede a propagação de uma onda TEM (Transversal Eletromagnética) pura. Isso ocorre porque a velocidade de fase dos campos na região do ar difere da velocidade de fase dos campos na região do dielétrico do substrato.

Como uma parte significativa dos campos está concentrada abaixo da fita condutora, no interior do substrato, a constante dielétrica relativa do material do substrato tem um impacto direto nessa concentração. Quanto maior for a constante dielétrica relativa do substrato, maior será a concentração de energia dentro do dielétrico, o que pode afetar o desempenho da linha de microfita e da antena como um todo [58].

Neste tipo de alimentação por linha de microfita, o casamento de impedância pode ser obtido ajustando a largura da fita condutora sobre o substrato dielétrico com espessura definida. Além disso, técnicas como *inset-feed* ou truncamentos no plano de terra, localizados sob a junção da fita condutora e o *patch* da antena, também são utilizadas para otimizar o casamento de impedância. Essas técnicas ajudam a minimizar as perdas e a melhorar a

eficiência da transferência de energia para a antena como ilustra a Figura 12.

Figura 12: Alimentação por linha de microfita



Fonte: Autoria própria

2.3.2 Método de análise por linha de transmissão

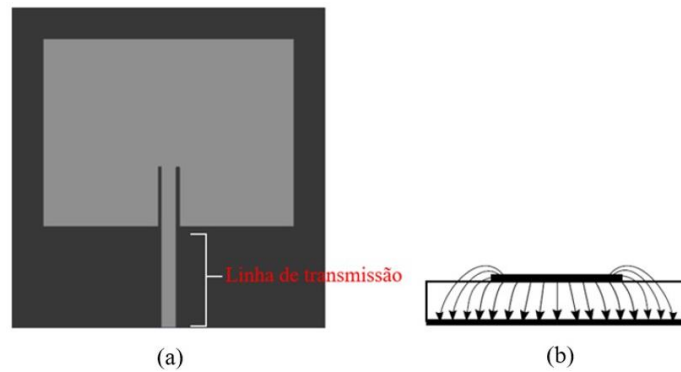
Em 1974, Munson desenvolveu um modelo de linha de transmissão para a análise de antenas de microfita retangulares [59]. Este método considera a largura W e o comprimento L do *patch* da antena, bem como a altura do substrato h e a constante dielétrica do substrato, para a modelagem.

O modelo de linha de transmissão é uma abordagem fundamental para a análise e o projeto de antenas de microfita, pois permite avaliar como as dimensões do *patch* e do substrato influenciam o desempenho da antena, incluindo sua impedância e padrões de radiação.

Devido às dimensões finitas do *patch*, os efeitos de bordas causados pelos campos resultam em um efeito de franjamento nas bordas do *patch*, afetando o comprimento e a largura efetivos da antena.

A Figura 13 (a) ilustra a linha de transmissão em uma antena de microfita, destacando a configuração do *patch* e a disposição da alimentação. Já a Figura 13 (b) mostra o campo elétrico irradiado pela antena, evidenciando como o campo é influenciado tanto pelo substrato quanto pela região de ar acima dele. Esses efeitos devem ser considerados para otimizar o desempenho da antena e garantir a eficiência na radiação e no acoplamento do sinal.

Figura 13: Antena de microfita (a) Linha de transmissão e (b) Linhas de campos



Fonte: Autoria própria

Devido ter as linhas de campo que atravessam o ar e o substrato, é necessário determinar a permissividade efetiva ϵ_{ref} , que é a constante dielétrica de um material uniforme que proporcionaria características elétricas equivalentes às de uma antena ideal com efeito de franjamento.

Para calcular a permissividade efetiva ϵ_{ref} , é necessário conhecer a permissividade relativa do material dielétrico utilizado ϵ_r , a altura do substrato h e a largura do *patch* W . A Equação (9), apresentada em [53], é utilizada para essa determinação, e é formulada da seguinte maneira:

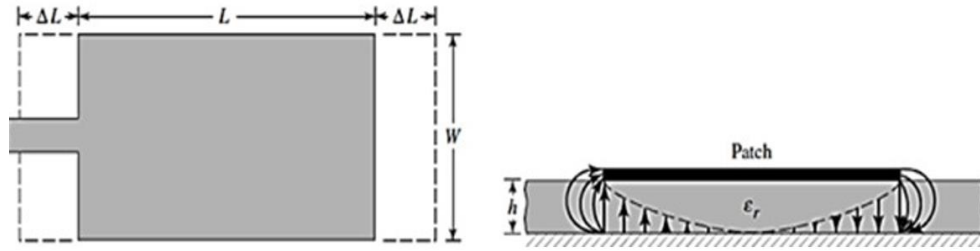
$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Em que:

- ϵ_{ref} - Permissividade efetiva;
- ϵ_r - Permissividade relativa do material;
- h - Espessura do substrato;
- W - Largura do *patch*.

Devido ao efeito de borda, como ilustra a Figura 14, o comprimento elétrico do *patch* é maior do que suas dimensões físicas. Esse acréscimo no comprimento, ΔL , é causado pelo franjamento dos campos nas bordas do *patch* e deve ser considerado para uma modelagem precisa da antena.

Figura 14: Efeito de borda no *patch* (a) Vista superior do *patch* e (b) Efeito do franjamento no comprimento da antena



Fonte: [40]

O acréscimo de comprimento ΔL é definido pela Equação (10), que é dada por:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (10)$$

No dimensionamento do *patch* de uma antena de microfita, é fundamental conhecer a altura do substrato h , a frequência de ressonância f_r , a permissividade relativa do material ϵ_r . Com essas informações, é possível calcular as dimensões do *patch* utilizando a Equação (11) e (12).

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2 \Delta L \quad (11)$$

$$W = \frac{c}{f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (12)$$

O método de linha de transmissão apresenta uma desvantagem notável em relação à impedância de entrada do sistema, visto que essa impedância pode alcançar valores menores a 50Ω . Para mitigar esse problema, diversas técnicas de casamento de impedância podem ser empregadas para reduzir a impedância de entrada associada à linha de transmissão. No presente estudo, a técnica de *inset feed* é utilizada para ajustar adequadamente o casamento de impedância entre a linha de transmissão e o *patch* da antena. Essa abordagem visa otimizar a correspondência de impedância, melhorando a eficiência e o desempenho do sistema de antena.

Para determinar o comprimento da linha de microfita L_m , deve-se considerar que ele não deve exceder 25% do comprimento de onda correspondente à maior frequência de ressonância da antena [59]. A Equação (13) fornece uma estimativa prática para garantir que a linha de microfita seja adequada ao desempenho da antena, considerando o efeito da maior frequência de operação.

$$L_m = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (13)$$

Para determinar a largura da linha de microfita W_m , considera a impedância de entrada $Z_0 = 50 \, \Omega$. Na qual é possível analisar pela Equação (14) dada por:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_r} \left[\frac{W_m}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left(\frac{W_m}{h} + 1,44 \right) \right]}, \frac{W_m}{h} > 1 \\ \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{W_m} + \frac{W_m}{4h} \right), \frac{W_m}{h} \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

Capítulo 3: Materiais e Métodos

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa para a medição da umidade em blocos de concreto utilizando um sistema baseado em micro-ondas. A proposta é explorar a utilização de técnicas de micro-ondas para desenvolver um sistema de medição eficiente e preciso, capaz de avaliar o nível de umidade dos blocos de concreto de maneira não destrutiva. Através da aplicação de ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas, pretende-se oferecer uma solução que possa superar limitações de métodos tradicionais e proporcionar uma avaliação mais direta e confiável da umidade presente nos materiais de construção.

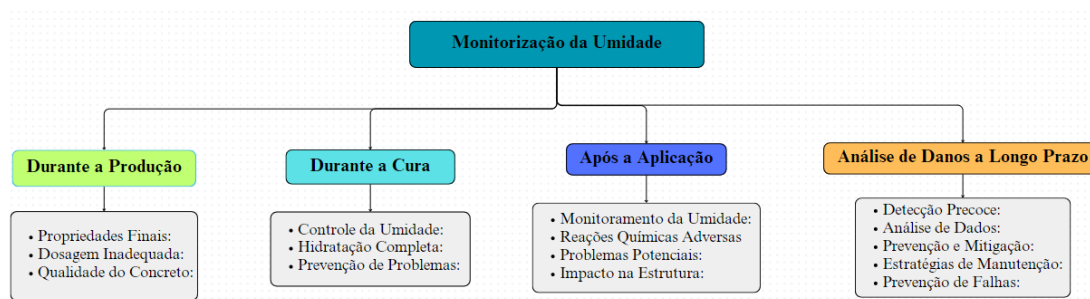
Na construção civil, os blocos de concreto são amplamente utilizados devido às suas propriedades estruturais favoráveis. Contudo, a umidade exerce uma influência significativa sobre as propriedades mecânicas desses blocos, e a compreensão desta interação é fundamental para garantir a integridade estrutural das construções. Vários aspectos podem ser abordados [60]:

- **Variação na resistência dos blocos de concreto:** a presença de umidade pode alterar a resistência dos blocos de concreto. A absorção de água por parte do concreto pode levar à modificação das suas características mecânicas, reduzindo a capacidade de carga e a resistência ao impacto. A umidade excessiva pode promover reações químicas indesejadas, como a hidratação incompleta dos componentes do cimento, resultando em uma diminuição da resistência compressiva dos blocos [60].
- **Expansão e contração:** a umidade causa expansão e contração térmica dos blocos de concreto. Esses fenômenos volumétricos podem induzir tensões internas no material, promovendo a formação de fissuras e, conseqüentemente, comprometendo a estabilidade e a durabilidade das estruturas. A análise da resposta do concreto a variações de umidade é crucial para prever e mitigar esses efeitos [60].
- **Absorção de água e efeito no desempenho:** blocos com alta capacidade de absorção de água são particularmente vulneráveis a alterações nas propriedades mecânicas quando expostos a ambientes úmidos. A absorção de água pode resultar em degradação dos agregados e da matriz cimentícia, e em climas frios, o congelamento da água absorvida pode levar a ciclos de expansão e contração que aceleram a deterioração do material [60].

A implementação de Sistemas de Monitoramento da Saúde Estrutural SHM é essencial para a avaliação contínua das condições dos blocos de concreto. Técnicas de monitoramento, como sensores de umidade, sensores de deformação e técnicas de imagem, permitem a detecção precoce de variações nas propriedades do material. O SHM possibilita a identificação de degradações e o monitoramento das respostas estruturais em tempo real, facilitando intervenções preventivas e a manutenção adequada.

A compreensão e o monitoramento dos efeitos da umidade sobre os blocos de concreto são indispensáveis para assegurar a eficiência estrutural e a durabilidade das construções. A adoção de tecnologias de monitoramento estruturais contribui significativamente para a manutenção da integridade dos sistemas construtivos, permitindo a gestão proativa dos riscos associados às variações na umidade.

De acordo com [60], a quantidade de água presente em estruturas construídas com blocos de concreto deve ser monitorada de maneira contínua, desde a fase de produção do concreto até após sua aplicação final. Este acompanhamento é essencial para fornecer uma visão abrangente dos possíveis danos que a umidade pode causar à estrutura ao longo do tempo, a Figura 15 mostra todas as fases de monitoramento da umidade nos blocos.



Fonte: Autoria Própria

A proposta do sistema de medição apresentada neste trabalho adota uma metodologia não destrutiva, implicando que a análise dos blocos de concreto pode ser realizada sem causar qualquer dano parcial ou total ao material. A literatura oferece diversas técnicas e modelos de medição para a determinação da umidade em estruturas de concreto, incluindo:

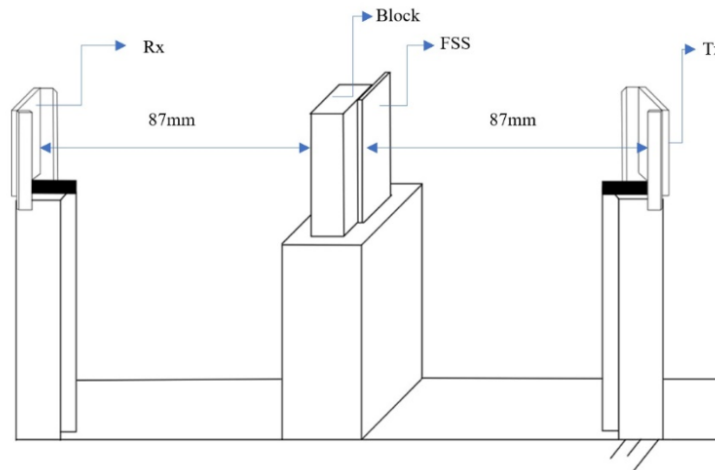
- **Utilização de fibra óptica:** apresenta complexidade no sistema de medição e viabilidade financeira limitada para casos simples [61];
- **Resistividade elétrica:** restrita a medições em superfícies externas dos objetos, tornando-a inadequada para análise do interior [62]
- **Emissão de ondas mecânicas:** alta sensibilidade a elementos externos pode

levar a imprecisões nas medições [63];

- **Radiofrequência:** oferece vantagens para o monitoramento estrutural, com baixo custo, capacidade de obter parâmetros importantes e permitir a intercomunicação com outras tecnologias [64] e [65].

A Figura 16 ilustra o processo de medição adotado neste trabalho, no qual se utilizam ondas eletromagnéticas, caracterizando um sistema de análise não destrutiva do objeto em estudo. O sistema opera da seguinte maneira: uma antena transmissora emite sinais de frequências variáveis que interagem com a superfície seletiva de frequência (FSS) e o bloco de concreto posicionados à sua frente. Essa interação resulta em diferentes frações dos sinais, que podem ser refletidos, absorvidos ou transmitidos. Os sinais transmitidos, após atravessarem a FSS e o bloco de concreto, são captados por uma antena receptora. Por fim, o analisador de redes vetoriais registra os sinais recebidos.

Figura 16: Processo de medição utilizado



Fonte: Autoria própria

Para garantir que o experimento ocorra na região de campo distante, a distância entre o bloco de concreto e as antenas (transmissora e receptora) deve seguir o critério fornecido pela Equação (15). Nesta equação, D_1 representa a distância entre o elemento a ser medido e a antena, D é a maior dimensão física da antena, e λ corresponde ao comprimento de onda do sinal emitido. A relação entre esses parâmetros assegura que as medições sejam realizadas na zona de campo distante, onde as características do feixe de radiação são mais estáveis e previsíveis.

$$D_1 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (15)$$

Para determinar os níveis de umidade do bloco em estudo, a FSS empregada estabelece uma correlação entre seus os parâmetros físicos e do substrato (bloco de concreto), com base na resposta de frequência em função do coeficiente de reflexão. A análise dessa correlação permite identificar alterações nas características do material, como variações na umidade, através do comportamento do coeficiente de reflexão em diferentes frequências, conforme descrito em estudos anteriores [66] e [67].

3.1 Caracterização do bloco de concreto

O bloco de concreto apresenta rugosidade em sua superfície, resultante da granularidade dos agregados e do cascalho que compõem sua estrutura. Devido a essa granularidade, existem espaços vazios distribuídos em toda a sua estrutura, tanto interna quanto externamente, o que possibilita a penetração de moléculas de água. A presença dessas moléculas na estrutura do bloco de concreto modifica suas características por meio de ações químicas e físicas, influenciando propriedades como a resistência mecânica, a permeabilidade e a durabilidade do material. Existem diversas maneiras pelas quais a penetração de água pode ocorrer no bloco de concreto. Essas formas incluem os seguintes mecanismos:

- **Absorção Capilar:** a água é absorvida através dos poros do concreto devido à ação capilar, onde a água se move para o interior do bloco por meio de pequenos canais [68];
- **Permeabilidade:** a água penetra no concreto quando existe uma diferença de pressão entre a superfície externa e interna, permitindo a passagem do fluido através da matriz porosa [69];
- **Difusão de Vapor:** em condições de alta umidade, o vapor de água pode se difundir pelo concreto, condensando-se posteriormente em sua estrutura interna [68].
- **Ação de Capilaridade Inversa:** em casos em que o bloco de concreto está em contato com água por baixo (como em fundações), a água pode ser puxada para cima pela capilaridade, resultando em penetração no material [69].
- **Microfissuras:** fissuras presentes na estrutura do concreto, resultantes de tensões térmicas, retração ou cargas mecânicas, podem permitir a entrada de água no interior do bloco.

Esses mecanismos de penetração de água influenciam diretamente as propriedades físicas do concreto, como a resistência e a durabilidade. Para caracterizar o concreto com base em sua permissividade elétrica, é importante destacar que o conceito de permissividade elétrica ϵ é definido em termos da constante dielétrica do vácuo ϵ_0 e da permissividade relativa do meio ϵ_r

. Essas relações são descritas pelas Equações 16 e 17.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (16)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (17)$$

Essas equações são fundamentais para analisar as propriedades dielétricas do concreto, pois a permissividade elétrica afeta diretamente a propagação de ondas eletromagnéticas através do material. A presença de água, por exemplo, pode alterar significativamente o valor de ε_r impactando a resposta de frequência do sistema utilizado no estudo.

Para caracterizar a umidade presente no bloco de concreto no modelo estudado, é fundamental destacar que a constante dielétrica do meio (bloco de concreto + umidade) aumenta à medida que o bloco absorve água [70]. Esse comportamento ocorre porque a água possui uma constante dielétrica significativamente maior que a do concreto seco. Na literatura, a permissividade relativa da água é considerada aproximadamente 80,4 o que implica que, ao penetrar no bloco de concreto, a água eleva a permissividade elétrica total do material. Essa variação na constante dielétrica afeta a resposta eletromagnética do bloco, sendo um parâmetro crítico para a caracterização da umidade através de medições baseadas em ondas eletromagnéticas [70].

O processo de obtenção da umidade nos blocos será realizado de forma indireta, utilizando a variação da permissividade elétrica em função do teor de umidade. Dessa forma, a análise da umidade torna-se viável por meio de um processo de medição não destrutivo. Ao monitorar as mudanças na permissividade elétrica do material, que aumentam conforme o bloco absorve água, é possível inferir o nível de umidade presente no concreto sem a necessidade de danificar o objeto analisado. Este método aproveita a sensibilidade das propriedades eletromagnéticas do concreto em relação à presença de água, permitindo uma avaliação precisa e eficiente [70]

Para garantir a aplicabilidade e conformidade do material de estudo, será utilizada a norma ASTM C90, que especifica os valores máximos de absorção de água que um bloco de concreto pode ter. Esse valor de absorção é um parâmetro crucial para a análise e deve ser observado para assegurar que o bloco de concreto esteja dentro dos padrões exigidos. A norma estabelece que o valor de absorção de água é considerado com base na densidade da água de 272 kg/m³. Ao seguir essa norma, o estudo garante que o material avaliado está em conformidade com as especificações vigentes e as exigências de qualidade [70], [71] e [72].

Conforme descrito em [71], a densidade de absorção de água pode ser determinada usando a Equação (18) em que, W é a densidade de absorção de água do bloco em kg/m^3 , W_s é o peso saturado do bloco, W_d é o peso seco do bloco em estufa e B_d é a densidade do bloco.

$$W = \frac{W_s - W_d}{B_d} \quad (18)$$

Nesta fase do estudo, serão analisados cinco blocos de concreto, medindo o peso de cada um e adicionando água, sem ultrapassar o limite máximo previsto pela norma ASTM C90. Os valores obtidos serão organizados em uma tabela que informará a densidade de absorção de cada bloco.

Além disso, será necessário determinar um parâmetro de permissividade do bloco para identificar uma frequência na qual a permissividade apresenta um comportamento uniforme. Essa informação é crucial para definir a largura de banda para o projeto da antena (transmissora e receptora) e da superfície seletiva de frequência (FSS).

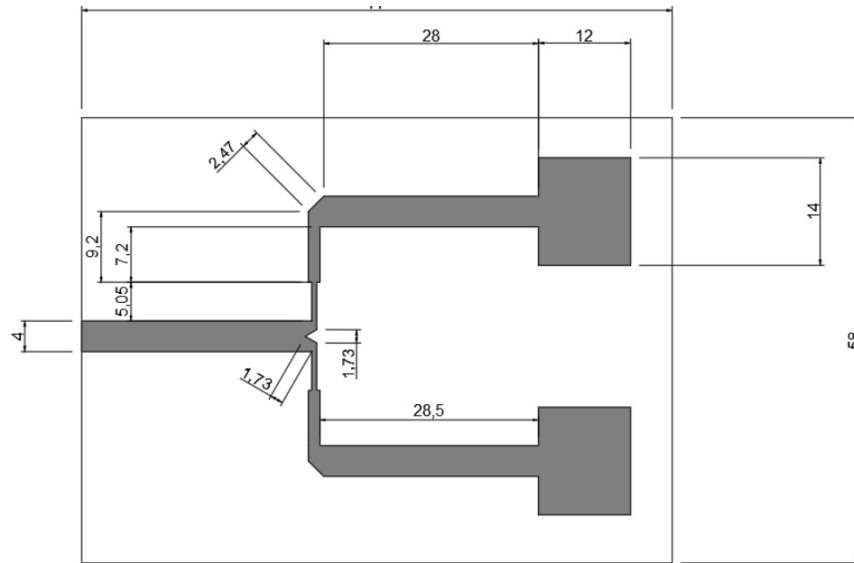
Para obter essa frequência, será utilizado um método alternativo ao cabo coaxial para medir a permissividade complexa dos blocos. A faixa de frequência escolhida será aquela que apresentar valores constantes de permissividade e que esteja em conformidade com uma banda não licenciada. Isso garantirá a eficiência do sistema de medição e a conformidade com as regulamentações de espectro.

3.2 Caracterização da antena de microfita

Será projetada uma antena de microfita com um arranjo 1x2, conforme ilustrado na Figura 17. O substrato utilizado para a antena é o FR4, com uma permissividade relativa ϵ_r de 4,4 e uma altura h de 1,6 mm. Este substrato é escolhido devido às suas propriedades dielétricas e características mecânicas adequadas para o design da antena.

A frequência de projeto da antena será de 5,5 GHz, visando uma frequência que apresente valores constantes de permissividade e esteja dentro de uma banda não licenciada. Além disso, o projeto incluirá uma alimentação que emprega transformadores de $1/4$ do comprimento de onda. Esses transformadores são fundamentais para garantir a correspondência de impedância e a adequada divisão do sinal de potência, assegurando um desempenho eficiente da antena.

Figura 17: Configuração da antena de microfita utilizada, dimensões em mm



Fonte: Autoria própria

A otimização das dimensões das antenas de microfita é fundamental para alcançar o casamento de impedância desejado e maximizar a eficiência de radiação na faixa de frequência de operação. Pequenas variações nas dimensões, como o comprimento e a largura do *patch*, impactam diretamente as características de ressonância e a impedância de entrada da antena.

Um dos principais motivos para ajustar numericamente essas dimensões é minimizar a diferença entre a impedância da antena e a impedância da linha de transmissão, geralmente em torno de 50 ohms. Esse casamento de impedância é essencial para garantir que a maior parte da energia seja transferida da fonte para a antena, evitando perdas por reflexão.

Além disso, foram realizadas técnicas de ajuste numérico, que permitem refinar as dimensões até atingir uma configuração que maximize a sensibilidade e a seletividade da frequência de ressonância. Esse ajuste é particularmente importante para antenas de microfita que, devido ao seu perfil fino e alta sensibilidade a variações geométricas, necessitam de uma precisão elevada para garantir que operem eficientemente no ambiente específico de aplicação.

Após a análise preliminar do protótipo da antena de microfita utilizando o software Ansys HFSS, serão adotadas técnicas para melhorar o casamento de impedância. Além disso, serão analisados os seguintes parâmetros de radiação da antena:

- Coeficiente de reflexão;
- Padrão de radiação;
- Ganho;
- Ângulo de meia potência;

Os diagramas de radiação 2D e 3D serão analisados para que se utilize no processo de

medição antenas com diretividade adequada.

3.3 Caracterização da FSS

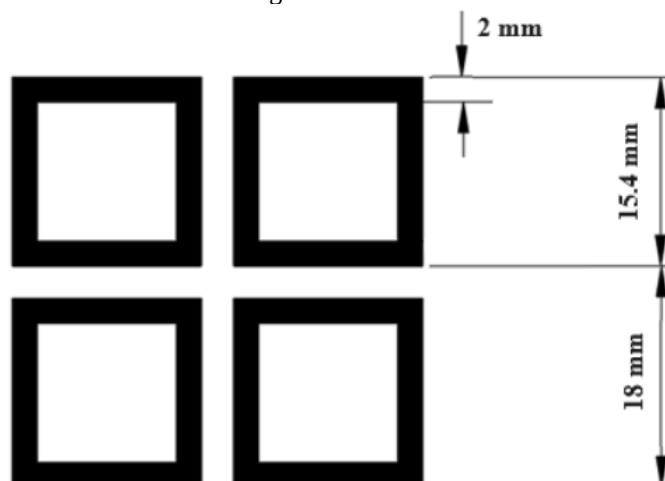
A Superfície Seletiva de Frequência será empregada para aproveitar sua sensibilidade às mudanças na permissividade, permitindo a quantificação indireta da umidade relativa. Conforme descrito em [72], as superfícies seletivas de frequência são estruturas projetadas para interagir com ondas eletromagnéticas espaciais. Elas fornecem respostas de frequência do coeficiente de reflexão, que é dependente da permissividade do bloco de concreto sobre o qual a FSS está posicionada.

Ao monitorar as variações no coeficiente de reflexão em função das mudanças na permissividade do bloco de concreto, a FSS permite a avaliação da umidade relativa no material. Essa abordagem aproveita as alterações na permissividade causadas pela presença de água para fornecer uma medida indireta da umidade, facilitando uma análise não destrutiva e precisa do bloco de concreto.

A FSS proposta é constituída por uma matriz de 11×11 células, totalizando uma área de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Cada célula unitária é composta por um circuito condutor quadrado. As células foram impressas em um substrato dielétrico FR-4, com permissividade relativa $\epsilon_r = 4,4$ e altura $h = 1,6 \text{ mm}$. A escolha da geometria foi guiada pela necessidade de alta estabilidade angular e independência de polarização [73] e [74].

A geometria foi projetada para oferecer uma resposta de frequência de banda única. A Figura 18 ilustra o design da FSS selecionada. Os elementos de laço quadrado possuem dimensões de 15,4 mm de comprimento e uma espessura de fita condutora de 2 mm. A periodicidade adotada para o arranjo das células é de 18 mm. Essa configuração é adequada para garantir a performance desejada em termos de estabilidade e resposta de frequência.

Figura 18: Estrutura FSS



Fonte: Autoria própria

A frequência de ressonância da FSS é sensível à variação da permissividade do material ao qual está exposta; especificamente, a frequência de ressonância diminui conforme a permissividade aumenta [66]. Portanto, a estrutura da FSS será posicionada em frente ao bloco de concreto. Com o aumento da umidade no bloco, a permissividade do bloco também aumenta, resultando em uma redução na frequência de ressonância da FSS [73] e [75].

Os resultados relacionados à permissividade relativa serão obtidos e analisados neste trabalho, permitindo a quantificação indireta da umidade no bloco de concreto com base nas mudanças observadas na frequência de ressonância da FSS.

3.4 Método de medição utilizado

As medições serão realizadas em 10 faixas possíveis de valores de umidade, que serão aplicadas nas amostras de blocos de concreto analisados. Para iniciar o processo de medição, os blocos de concreto serão submersos em água limpa para atingir o ponto de saturação de umidade, conforme as orientações do teste fornecido pela norma ASTM C140 [75] e [78]. O tempo necessário para a saturação completa é de 24 horas. Durante esse período, será necessário pesar o bloco a cada 2 horas para garantir que ele mantenha o peso constante, confirmando que o ponto de saturação foi alcançado e que o bloco está adequadamente saturado para as medições subsequentes.

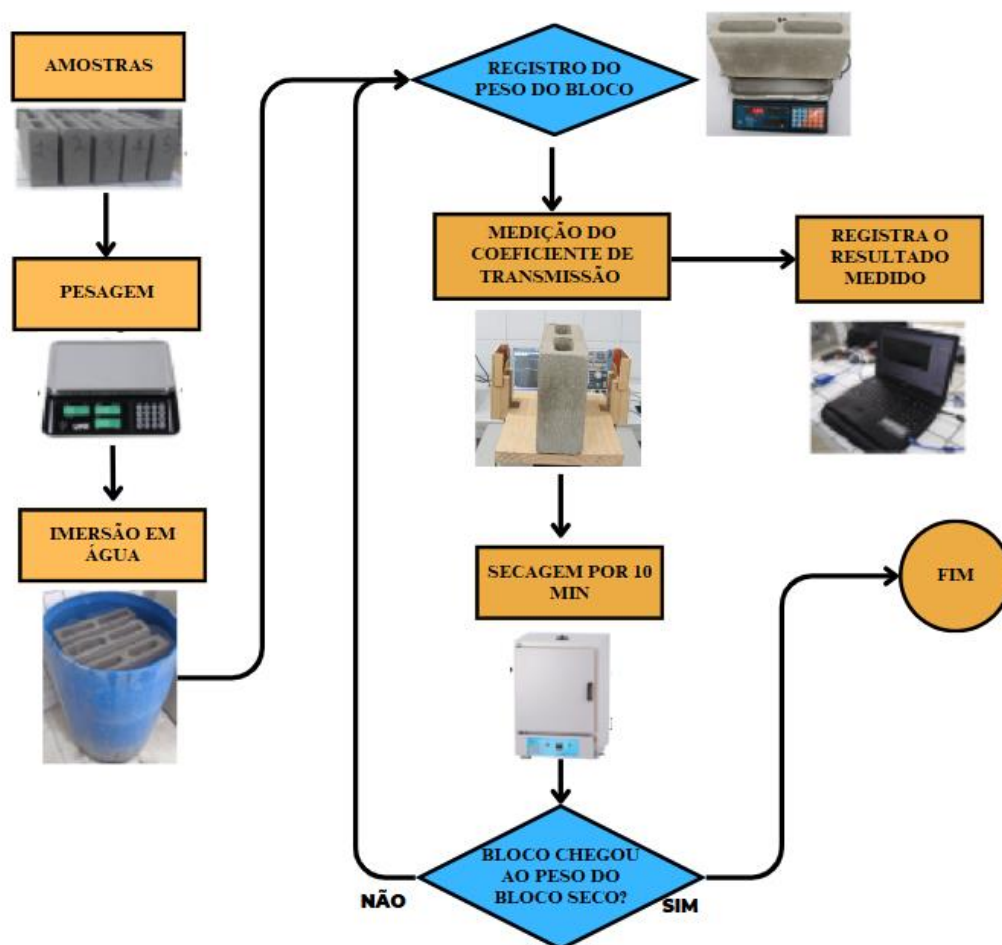
Após confirmar que o bloco alcançou a saturação conforme especificado pela norma, serão realizadas as medições. Caso os valores de saturação de umidade do bloco ultrapassem os limites permitidos pela norma, o bloco será seco em uma estufa e, em seguida, reinserido no processo de imersão no reservatório para garantir que atinja os valores aceitáveis.

Uma vez que o bloco atinja os valores de umidade aceitáveis, as medições de x (UR) serão analisadas utilizando a Equação (19). Essa equação permitirá quantificar a umidade relativa do bloco com base nas medições obtidas e nas características do material.

$$UR = \frac{W_r - W_d}{W_s - W_d} \times 100\% \quad (19)$$

Para garantir o alinhamento adequado das estruturas durante o processo de medição, será construído um aparato que atenda às dimensões mínimas necessárias para posicionar cada elemento corretamente. A estrutura de FSS será fixada ao bloco de concreto utilizando uma corda de polipropileno. Para assegurar a precisão dos resultados, o processo de medição será repetido várias vezes até identificar um padrão consistente, garantindo uma análise verídica da situação. Na Figura 19 ilustra o fluxograma do processo de medição utilizado.

Figura 19: Fluxograma do processo de medição



Fonte: Autoria própria

3.5 Análise da eficácia do sensor

Neste trabalho, serão empregadas técnicas de análise não invasivas e não destrutivas para o material em estudo. Dispositivos que utilizam ondas eletromagnéticas e analisam a frequência de ressonância são projetados para armazenar energia dos campos elétricos e magnéticos em sua estrutura. É essencial que esses dispositivos apresentem uniformidade entre si [67].

A permissividade e a frequência de ressonância variável do elemento podem ser relacionadas através da Equação (20), que permite determinar as propriedades dos materiais externos ao interagir com o campo eletromagnético [32]. Essa abordagem possibilita a análise das propriedades do material de forma indireta, utilizando as mudanças na frequência de ressonância como indicativo das características do material estudado.

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\int (\Delta \epsilon E_1 E_0 + \Delta \mu H_1 H_0) dv}{\int (\epsilon_0 |E_0|^2 + \mu_0 |H_0|^2) dv} \quad (20)$$

Onde:

- Δf_r - Variação observada na frequência de ressonância;
- f_r - Frequência de ressonância;
- $\Delta \epsilon$ - Variação da permissividade relativa;
- $\Delta \mu$ - Variação na permeabilidade magnética;
- ϵ_0 - Permissividade do espaço livre;
- μ_0 - Permeabilidade do espaço livre;
- E_0 - Distribuição de campo elétrico sem perturbação externa;
- H_0 - Distribuição de campo magnético sem perturbação externa;
- E_1 - Distribuição de campo elétrico com perturbação externa;
- H_1 - Distribuição de campo magnético com perturbação externa;
- v - Volume do elemento a ser perturbado na análise.

A FSS proposta atuará como o elemento sensor para caracterizar os blocos de concreto de acordo com os níveis de umidade estabelecidos pela norma. Para avaliar a sensibilidade do sensor, serão analisados os seguintes parâmetros:

- **Variação da Frequência de Ressonância (Δf_r):** reflete a mudança na frequência de ressonância do sensor devido à variação na umidade do bloco;
- **Alteração Percentual na Frequência de Ressonância (PRFS):** calcula a variação percentual na frequência de ressonância, fornecendo uma medida relativa da mudança

em função da umidade;

- **Aprimoramento da Alteração Percentual na Frequência de Ressonância (PRFSE):** avalia a melhoria na capacidade do sensor em detectar alterações percentuais na frequência de ressonância;
- **Sensibilidade (S):** mede a capacidade do sensor em responder a mudanças na umidade, quantificando a alteração da frequência de ressonância em resposta à variação de umidade;
- **Aumento de Sensibilidade (SE):** reflete o incremento na sensibilidade do sensor, indicando a eficácia do sensor em detectar pequenas variações na umidade.

Esses parâmetros serão calculados utilizando as Equações (21) a (25), que fornecem as fórmulas específicas para determinar cada um desses aspectos e avaliar a eficácia do sensor FSS na caracterização da umidade dos blocos de concreto.

$$\Delta f_r = f_{ru} - f_{r1} \quad (21)$$

$$PRFS = \frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{f_{ru} - f_{r1}}{f_{ru}} \times 100\% \quad (22)$$

$$PRFSE = \frac{PRFS_{proposto}}{PRFS_{referência}} \quad (23)$$

$$S = \frac{\Delta f_r}{\Delta \varepsilon_r} = \frac{f_{ru} - f_{r1}}{\varepsilon_{ru} - \varepsilon_{r1}} \quad (24)$$

$$SE = \frac{S_{proposto}}{S_{referência}} \quad (25)$$

Onde:

- f_{ru} - Frequência de ressonância da FSS sem o bloco;
- f_{r1} - Frequência de ressonância da FSS com o bloco;
- ε_{ru} - Permissividade relativa do meio sem o bloco;
- ε_{r1} - Permissividade relativa do meio com o bloco;

Como a proposta de sensor deve apresentar diferentes níveis de sensibilidade em relação à permissividade dos blocos de concreto analisados, será necessário realizar uma análise detalhada e separada das curvas obtidas. Esta análise permitirá determinar a correlação dos dados por meio de funções estatísticas.

Capítulo 4: Resultados e Discussões

Para facilitar a compreensão e organização dos resultados, eles serão divididos em quatro seções principais:

Elementos do sistema: Detalhamento dos componentes do sistema de medição, incluindo a FSS, antenas, substrato dielétrico e dispositivos utilizados para a análise.

Resultados experimentais do sensor: Dados obtidos das medições realizadas com o sensor, incluindo a variação da frequência de ressonância e a resposta do sensor a diferentes níveis de umidade.

Análise estatística dos dados: Aplicação de métodos estatísticos para analisar e interpretar os dados obtidos, incluindo a correlação entre permissividade e frequência de ressonância, e a validação dos resultados.

Análise de sensibilidade do sensor: Avaliação da capacidade do sensor em detectar variações na permissividade dos blocos de concreto, incluindo a determinação da sensibilidade e o aumento de sensibilidade.

Essa estrutura facilitará a análise e a apresentação dos resultados, garantindo uma visão clara e organizada do desempenho e da eficácia do sensor proposto.

4.1 Elementos do sistema

Nesta seção, será realizada uma comparação entre os resultados simulados e medidos para três elementos do sistema desenvolvido neste trabalho: a superfície seletiva de frequência (FSS) e os arranjos de antenas construídos.

O *setup* de medição para uma antena de microfita envolve a configuração de diversos elementos para garantir uma medição precisa de seus parâmetros de desempenho, especialmente a resposta de impedância e o padrão de radiação. A seguir estão as principais etapas realizadas para a obtenção das medições:

Instrumentação de medição: Um analisador de rede vetorial (VNA) é conectado ao ponto de alimentação da antena para medir os parâmetros de espalhamento, especialmente o S_{11} que indica o nível de refletância e o casamento de impedância. Isso permite identificar a frequência de ressonância e a largura de banda operacional.

Calibração do sistema: O VNA é calibrado usando padrões conhecidos (*open, short, load*)

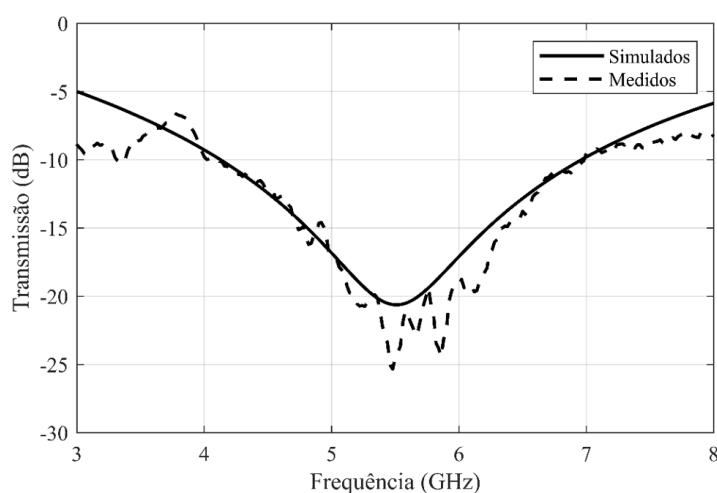
para assegurar que as medições de impedância e retorno estejam corretas. Essa calibração reduz incertezas no sistema e aumenta a precisão dos dados coletados.

Procedimento de medição: O VNA varre a faixa de frequência definida, captando os parâmetros de espalhamento e, em particular, a resposta de impedância.

Processamento e análise dos dados: Os dados de S_{11} são analisados para determinar a frequência de ressonância, a largura de banda e o casamento de impedância.

A Figura 20 apresenta a comparação entre os resultados simulados e medidos da FSS proposta no espaço livre. Os resultados simulados no HFSS indicaram uma frequência de ressonância de 5,51 GHz e uma largura de banda de 2,83 GHz (variando de 4,13 a 6,98 GHz). Em contraste, os resultados medidos mostraram uma frequência de ressonância de 5,68 GHz e uma largura de banda de 2,92 GHz (variando de 4,06 a 6,98 GHz).

Figura 20: Comparação entre resultados simulados no HFSS e medidos para a antena de microfita



Fonte: Autoria própria

Os resultados simulados e medidos demonstram uma boa concordância, validando o projeto e a análise realizados para a FSS. A largura de banda obtida é adequada para o funcionamento do sistema, uma vez que as variações esperadas na frequência de ressonância devem situar-se entre 4,5 e 6,0 GHz. Isso assegura que a FSS funcionará eficientemente dentro do intervalo de frequências desejado para a aplicação proposta.

O *setup* de medição de uma FSS avaliar a resposta de frequência e o comportamento de transmissão e reflexão da estrutura. O objetivo é verificar a eficiência da FSS na seleção de frequências e sua sensibilidade a variáveis ambientais. A seguir está uma descrição detalhada do *setup*:

Instrumentação para medição: um analisador de rede vetorial (VNA) é utilizado para medir os parâmetros de espalhamento S_{21} e S_{11} , que correspondem à transmissão e reflexão da FSS. Esses parâmetros ajudam a identificar a frequência de ressonância e a eficiência de bloqueio ou transmissão da FSS para determinadas bandas. O VNA é conectado nas antenas projetadas (transmissora e receptora) posicionadas a distância mínima, que obedece a região de campo distante, em ambos os lados da FSS para medir a transmissão através da estrutura.

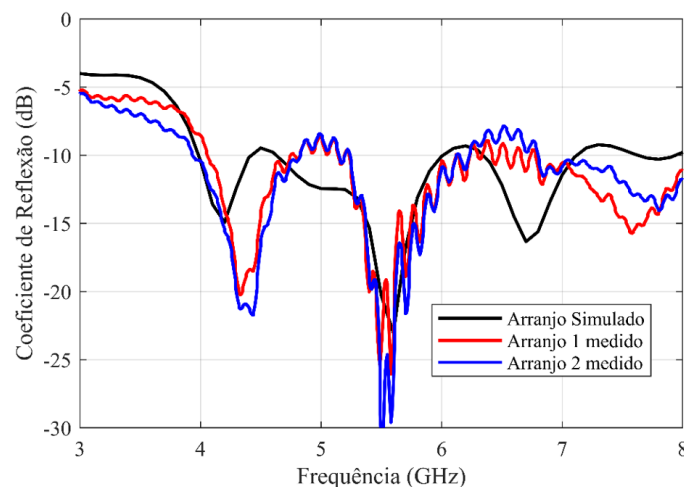
Posicionamento das antenas: as antenas transmissora e receptora são alinhadas de maneira precisa e posicionadas a uma distância fixa de cada lado da FSS. Este espaçamento uniforme é crucial para evitar variações nos resultados devido a mudanças na distância de transmissão. A orientação das antenas em relação à FSS é ajustada para garantir que estejam no eixo da estrutura, permitindo a máxima captura do sinal transmitido ou refletido.

Controle do ambiente de medição: o ambiente escolhido foi uma sala vazia para minimizar reflexões indesejadas do ambiente, garantindo que as medições sejam representativas apenas da interação entre a FSS e o campo eletromagnético das antenas.

Procedimento de medição: a medição é realizada em uma faixa de frequência de interesse, com o VNA varrendo essa faixa e registrando os valores de S_{21} e S_{11} para cada frequência.

A Figura 21 ilustra o comportamento dos coeficientes de reflexão para os arranjos de antenas, tanto simulados quanto medidos, no espaço livre. Observa-se que ambos os arranjos apresentam coeficientes de reflexão semelhantes nos valores medidos, indicando que os arranjos são adequados para operar na faixa de frequência desejada (4,0 – 6,35 GHz). A banda de frequência foi determinada considerando um nível de -10 dB.

Figura 21: Comparação entre resultados simulados no HFSS e medidos para a FSS projetada



Fonte: Autoria própria

As diferenças entre resultados medidos e simulados das antenas de microfitas e FSS são comuns e podem ocorrer devido a uma série de fatores que afetam a precisão das simulações e a realidade das medições. Esses fatores são:

Tolerâncias de fabricação: durante a fabricação de uma antena ou FSS, pode haver pequenas variações nas dimensões das estruturas e espessuras dos materiais, devido às limitações de precisão nos processos de fabricação. Variações de tamanho, espaçamento e posição das estruturas alteram as características ressonantes e a resposta de frequência, o que não é totalmente replicado na simulação ideal.

Condições ambientais na medição: as medições em ambiente real estão sujeitas a variáveis como temperatura, umidade, e presença de interferências eletromagnéticas externas, que podem influenciar a resposta da antena ou FSS. Em simulações, geralmente se assume um ambiente ideal e controlado, muitas vezes sem considerar possíveis interferências ou variáveis ambientais.

Essas diferenças entre simulação e medição são, em geral, inevitáveis, mas podem ser reduzidas através de um maior refinamento dos modelos simulados, melhorias na precisão da fabricação e calibração cuidadosa dos equipamentos de medição.

4.2 Resultados experimentais do sensor

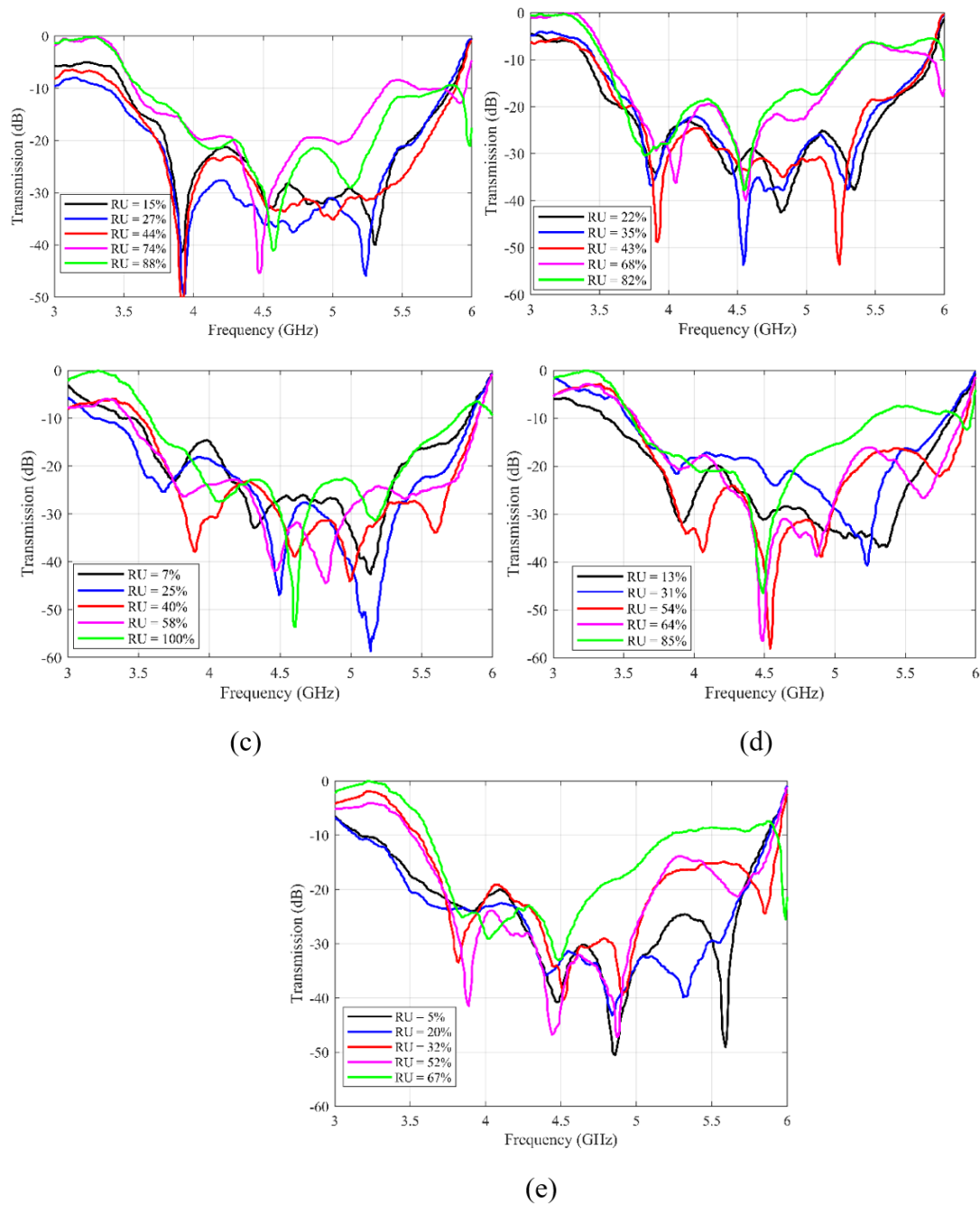
Nesta seção, discutem-se os valores obtidos nas medições em espaço livre do coeficiente de transmissão para as diversas combinações entre a FSS projetada e os cinco blocos de concreto.

Os cinco blocos de concreto, foram analisados em cinco níveis distintos de umidade relativa (UR), resultando em um total de 25 medições. Medições sucessivas foram realizadas para minimizar os efeitos de comportamentos anômalos nas curvas, que poderiam ser causados por erros de posicionamento ou fixação dos elementos do sistema. Para evitar falsos picos e garantir a precisão dos resultados, os dados medidos foram processados por uma rotina computacional que aplicou técnicas numéricas de suavização.

Durante o processo de medição, a temperatura do ar variou entre 26°C e 30°C, enquanto a umidade do ar se manteve constante em torno de 75%. Embora variações mínimas na frequência de ressonância possam ocorrer em ambientes com condições diferentes, o comportamento geral do sistema permanecerá consistente.

A Figura 22 apresenta o conjunto de resultados das 25 medições realizadas, ilustrando as curvas geradas para as diferentes combinações de umidade e blocos de concreto. Essas curvas fornecem uma visão detalhada das variações no coeficiente de transmissão em função da umidade relativa dos blocos.

Figura 22: Resposta em frequência dos coeficientes de transmissão dos blocos para todos os valores de umidades testados: (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 e (e) B5



Fonte: Autoria própria

É possível observar que, para todos os blocos, a umidade relativa afetou a frequência de ressonância conforme esperado. A similaridade entre as curvas para diferentes corpos de prova indica que o sistema é aplicável aos blocos que sigam o mesmo padrão de confecção.

Os dados que originam as curvas, que correspondem às frequências de ressonância (f_r) em função da umidade relativa (UR), estão resumidos na Tabela 1. Esta tabela apresenta as medições realizadas nos cinco blocos durante os experimentos.

Tabela 1: UR em (%) e as frequências de ressonância obtidas em (GHz) para as medições dos 5 blocos durante os experimentos.

Bloco	UR (%)	f_r (GHz)	Bloco	UR (%)	f_r (GHz)	Bloco	UR (%)	f_r (GHz)
B1	15	5,30	B2	22	5,35	B3	7	5,14
	27	5,24		35	5,29		25	5,14
	44	5,00		43	5,24		40	4,99
	74	4,57		68	4,56		58	4,82
	88	4,47		82	4,54		100	4,60
B4	13	5,32	B5	5	5,59			
	31	5,23		20	5,33			
	54	4,54		32	4,91			
	64	4,49		52	4,87			
	85	4,49		67	4,48			

Fonte: Autoria própria

As diferenças nas medições entre blocos distintos podem ser justificadas pela variação natural de propriedades físicas e estruturais entre eles. Mesmo que fabricados com o mesmo processo e materiais, os blocos podem apresentar pequenas variações que influenciam diretamente os resultados, especialmente em medições de frequência de ressonância e absorção de umidade. Dois pontos importantes são observados:

Diferenças estruturais e materiais entre blocos: cada bloco de concreto possui variações em termos de densidade, composição dos agregados, e microestrutura interna, que afetam a resposta do sensor à umidade. Essas diferenças nas propriedades físicas levam a uma distribuição ligeiramente diferente de umidade e de comportamento dielétrico, resultando em variações nas medições. Pequenas desigualdades nas dimensões, porosidade, e superfície dos blocos também podem causar mudanças nas medições de ressonância e transmissão, especialmente quando se analisa a interação de ondas eletromagnéticas com o material.

Impacto da repetibilidade e reprodutibilidade: para reduzir as incertezas nos resultados, um procedimento ideal envolveria a realização de múltiplas medições em um único bloco, garantindo repetibilidade e uma análise mais precisa da variabilidade causada apenas pela medição e não pela amostra. A reprodutibilidade, neste contexto, também poderia ser testada ao realizar as medições com diferentes operadores ou em diferentes momentos, mas mantendo

o mesmo bloco como referência. Isso possibilitaria identificar se as variações entre blocos diferentes são de fato devidas a características intrínsecas dos blocos ou se resultam de outros fatores de medição.

Para um trabalho futuro ao utilizar apenas um único bloco em várias medições, seria possível isolar variáveis e garantir uma análise focada exclusivamente na resposta do sensor às mudanças de umidade no mesmo bloco. Esse procedimento minimiza o efeito de fatores externos e aumenta a confiabilidade dos resultados, permitindo uma interpretação mais clara das variações de resposta observadas.

4.3 Análise estatística dos dados

Para permitir uma análise completa dos resultados, foram considerados os valores das frequências de ressonância obtidos em função da variação da umidade relativa. Os dados das medições foram organizados e processados para avaliar a precisão do sistema proposto. As grandezas relevantes são a frequência de ressonância e a umidade relativa, ambas verificadas e correlacionadas para determinar a acurácia do sistema.

Os dados foram classificados como quantitativos e contínuos e divididos de acordo com as medições. A Tabela 1 lista os valores obtidos, e é notável que existem valores de frequência de ressonância que se repetem para diferentes níveis de umidade relativa. Isso pode ser atribuído às variações na permissividade medida para diferentes blocos [74]. Além disso, em alguns blocos, foi observado um aumento na frequência de ressonância para valores de umidade mais baixos, o que pode ser resultado da interpolação realizada nos pontos originais, que reduz o efeito de interferência e suaviza os contornos, mas também pode introduzir erros.

Apesar desses efeitos, a análise dos dados confirma o padrão visual das curvas discutidas anteriormente, onde a frequência de ressonância diminui à medida que a umidade relativa aumenta. Essa interpretação sugere uma forte correlação linear entre a umidade relativa e a frequência de ressonância. Para quantificar essa correlação, o coeficiente de correlação linear pode ser calculado usando a Equação (26).

$$r = \frac{cov_{f_r, UR}}{\sigma_{f_r} \sigma_{UR}} \quad (26)$$

Em que f_r e UR representam a frequência de ressonância e a umidade relativa a serem correlacionadas. A covariância $cov_{f_r, UR}$ e os desvios padrão σ_{f_r} e σ_{UR} são calculados e aplicados. Portanto, o valor obtido foi $r = -0,981$, que denota uma correlação negativa e determina como as duas variáveis estão fortemente correlacionadas.

Além da correlação, é fundamental estabelecer uma regressão que traduza a correspondência entre a frequência de ressonância e a umidade relativa. Os valores listados na Tabela 1 foram selecionados, para prover uma menor dispersão e problemas de repetição de frequências com umidades muito diferentes. Usando a ferramenta Basic Fitting do Matlab foram considerados três tipos de regressão: a linear, a quadrática e a cúbica. Foram adotados os seguintes parâmetros de comparação para escolher o tipo de regressão mais apropriado: o Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE), o Erro Médio Quadrático (RMS) e o R². Esses parâmetros estão listados na Tabela 2.

Tabela 2: Tipo e função de regressão e suas métricas de erro.

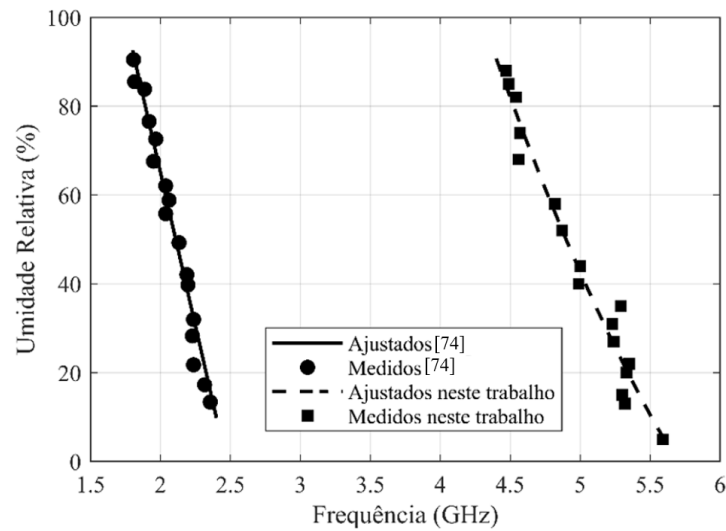
Regressão	Função	Métricas de erro		
		MAPE	MSE	R ²
Linear	$UR = 407 - 72,5f_r$	4,0 %	26,6	0.961
Quadrática	$UR = 14,4f_r^2 - 215,4f_r + 760$	3,3 %	24,4	0,964
Cúbica	$UR = -22f_r^3 + 345f_r^2 - 1872f_r + 3520$	3,7 %	24,1	0.881

Fonte: Autoria própria

O MAPE e o R² foram melhores para a regressão quadrática, enquanto o MSE foi melhor para a regressão cúbica, mas ficando muito próxima da quadrática. Assim, entende-se que é mais apropriado escolher a equação quadrática, para obter a UR em função da fr. O MAPE traduz uma boa concordância entre a equação obtida e os valores medidos. O R², ou coeficiente de determinação, indica como a umidade é acentuada e como a variável dependente (UR) é explicada pela variável independente fr. Esse valor foi de 0,964, ou seja, 96,4% da variação de umidade é explicada pela variação da frequência de ressonância do conjunto FSS mais bloco vazado de concreto.

A Figura 23 apresenta uma comparação entre a equação de ajuste da curva e os pontos medidos neste trabalho e na referência [74]. Observa-se que a curva ajustada com a função escolhida está bem centralizada em relação aos pontos experimentais, demonstrando que a equação de ajuste atende adequadamente aos objetivos do estudo. Este ajuste eficaz confirma a validade do modelo proposto e a precisão na representação da relação entre a frequência de ressonância e a umidade relativa dos blocos de concreto.

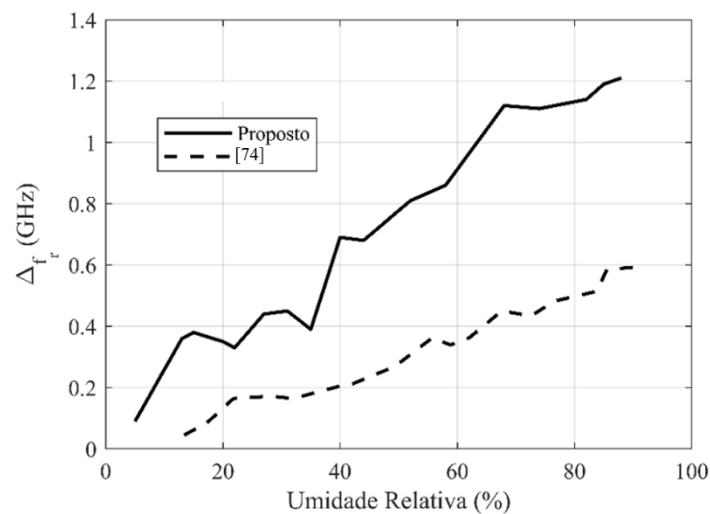
Figura 23: Gráfico de regressão.



Fonte: Autoria própria

4.4 Análise de sensibilidade do sensor

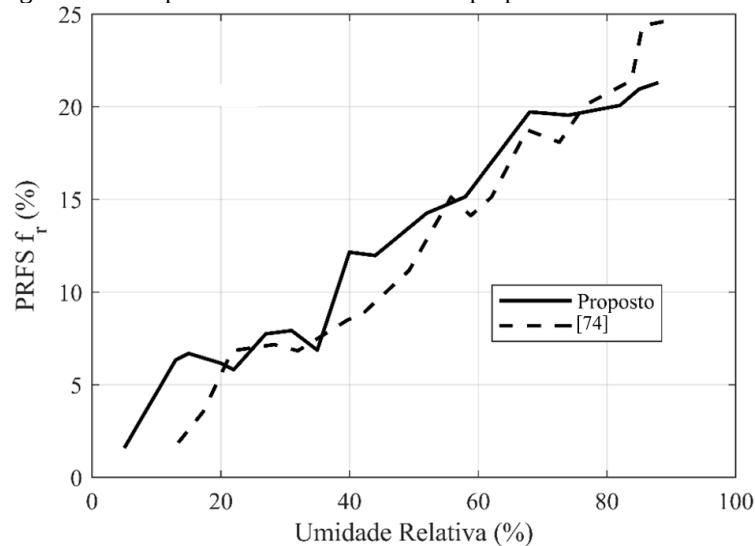
As frequências listadas na Tabela 1 deste trabalho e na Tabela 2 da referência [61] foram inseridas nas equações (21) a (25) para determinar a dependência dos parâmetros do sensor proposto em relação à umidade relativa. A Figura 24 ilustra a comparação entre o Δf_r do sensor proposto e os dados da referência [74]. Observa-se que a frequência de ressonância f_r do sensor proposto demonstra uma melhoria significativa na sensibilidade quando comparada àquela apresentada em [74]. Essa melhoria é evidenciada pelo maior contraste na variação da frequência de ressonância em resposta às mudanças na umidade relativa, indicando um desempenho aprimorado do sensor em captar variações de umidade.

Figura 24: Comparativo do Δf_r do sensor proposto com a referência [74].

Fonte: Autoria própria

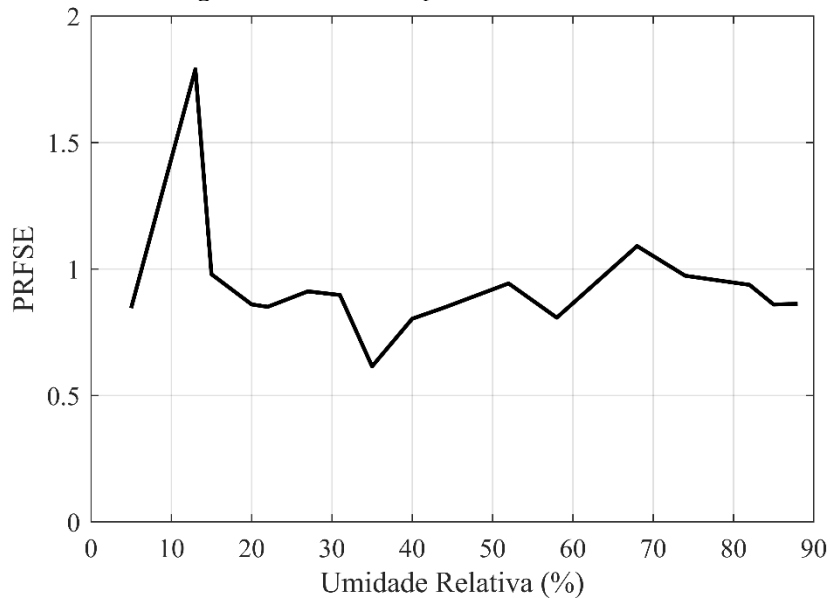
A Figura 25 disponibiliza a mesma análise para a mudança percentual na frequência de ressonância (PRFS). Percebe-se que o sensor proposto apresentou uma mudança percentual de fr praticamente igual à do sensor em [74]. Isso pode ser mais bem observado na Figura 24, que mostra a melhoria da mudança percentual na frequência de ressonância (PRFSE) em relação às referências [74], na qual ela fica em torno do valor 1.

Figura 25: Comparativo do PRFS do sensor proposto com o da referência [74].



Fonte: Autoria própria

Figura 26: PRFSE comparado com a referência [74].

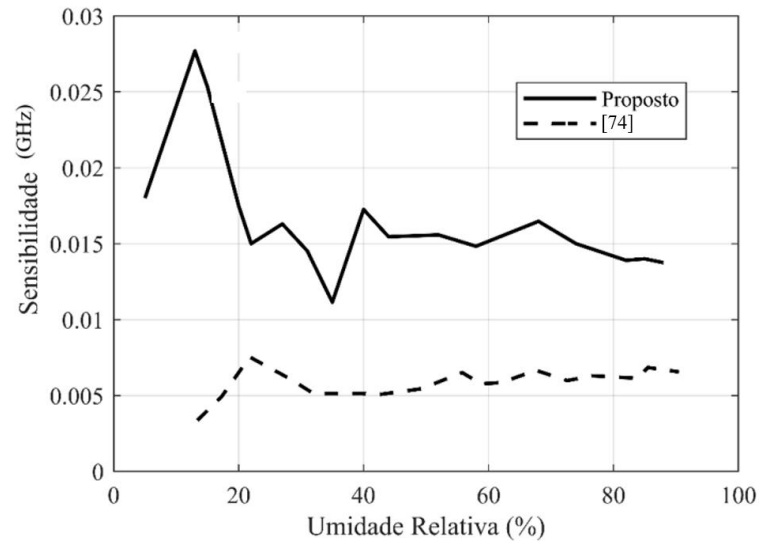


Fonte: Autoria própria

A melhoria da sensibilidade do sensor proposto neste trabalho pode ser observada nas Figuras 27 e 28, que mostram o comparativo da sensibilidade (S) e a melhoria de sensibilidade (SE) do sensor em relação a [74], respectivamente. Analisando a Figura 27 é possível perceber

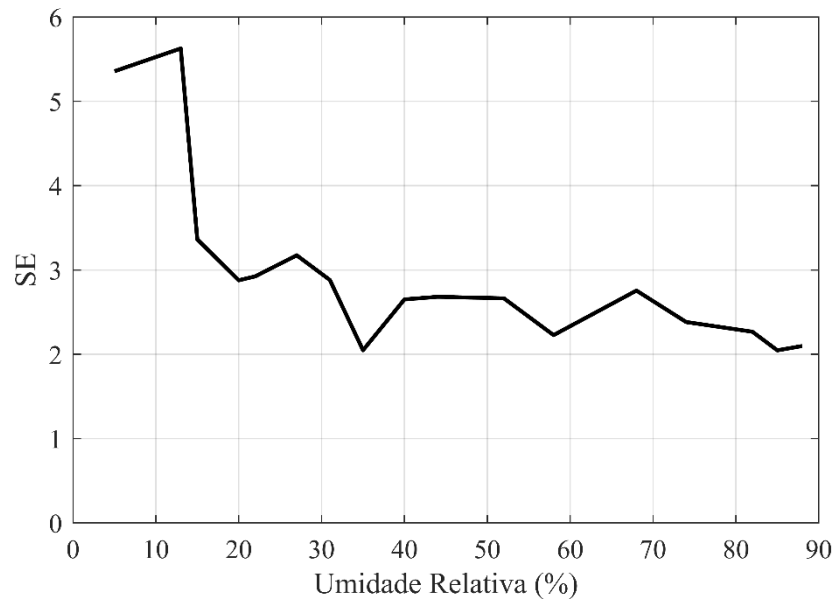
a melhoria de sensibilidade de fr do sensor proposto em relação à [74], como é possível observar na Figura 28, que evidencia a melhoria de sensibilidade (SE) em relação à referência [74].

Figura 27: Comparativo da sensibilidade do sensor proposto com [74].



Fonte: Autoria própria

Figura 28: Sensibilidade melhorada do sensor proposto.



Fonte: Autoria própria

As análises dessas figuras confirmam que o sensor desenvolvido não apenas mantém uma sensibilidade comparável, mas também supera o desempenho da referência, evidenciando um aprimoramento significativo na detecção das mudanças de umidade.

Conclusão

Esta tese apresentou o desenvolvimento, simulação e validação de um sistema de monitoramento da saúde estrutural (SHM) utilizando superfícies seletivas de frequência (*frequency selective surfaces* - FSS) e antenas de microfita para detectar umidade em blocos de concreto. Por meio de simulações e medições experimentais, os parâmetros de desempenho do sistema foram analisados e comparados, validando a eficácia do sensor proposto.

A FSS e a antena de microfita foram projetadas e simuladas para operar na faixa de frequência desejada. Os resultados simulados indicaram uma frequência de ressonância de 5,51 GHz e uma largura de banda de 2,83 GHz (variando de 4,13 a 6,98 GHz). Os resultados medidos mostraram uma frequência de ressonância de 5,68 GHz e uma largura de banda de 2,92 GHz (variando de 4,06 a 6,98 GHz). Ambos os arranjos de antenas fabricados apresentaram coeficientes de reflexão semelhantes nos valores medidos, confirmando que o sistema é adequado para operar na faixa de frequência entre 4,0 e 6,35 GHz, conforme definido pelo nível de -10 dB.

Para a medição de umidade em blocos de concreto, foi construído um aparato para garantir o posicionamento correto das antenas de microfita em relação aos blocos, mantendo condições de espaço livre. Cinco blocos de concreto foram analisados em cinco diferentes níveis de umidade relativa (UR), totalizando 25 medições. Medições sucessivas foram realizadas para minimizar erros de posicionamento e fixação, e os dados foram processados por uma rotina computacional, aplicando técnicas de suavização para garantir a precisão dos resultados.

Durante as medições, a temperatura do ar variou entre 26°C e 30°C, com umidade constante em torno de 75%. Embora variações mínimas na frequência de ressonância possam ocorrer sob diferentes condições ambientais, o comportamento geral do sistema manteve-se consistente. Os dados obtidos indicam uma correlação linear negativa significativa entre a umidade relativa e a frequência de ressonância, com um coeficiente de correlação de -0,981, demonstrando que a frequência de ressonância diminui à medida que a umidade relativa aumenta.

Os resultados obtidos nas análises de regressão destacam a importância de selecionar o modelo matemático adequado para traduzir a relação entre a frequência de ressonância (f_r) e a

umidade relativa (UR) nos blocos de concreto monitorados. Três modelos de regressão foram avaliados: linear, quadrático e cúbico, cada um com diferentes métricas de desempenho.

A regressão quadrática apresentou os melhores resultados no que diz respeito ao erro percentual absoluto médio (MAPE) e ao coeficiente de determinação (R^2). Com um MAPE de 3,3% e um R^2 de 0,964, este modelo mostrou uma excelente concordância entre os valores medidos e estimados, indicando que 96,4% da variação na umidade relativa pode ser explicada pela variação na frequência de ressonância. Esses resultados confirmam a capacidade do modelo quadrático de capturar de forma precisa a relação não linear entre UR e fr.

Embora o erro quadrático médio (MSE) tenha sido ligeiramente melhor na regressão cúbica, a diferença em relação ao modelo quadrático foi mínima. Dado que o MAPE e o R^2 são indicadores mais críticos na avaliação da precisão e adequação do modelo à realidade física do fenômeno, conclui-se que a regressão quadrática é a mais apropriada para descrever a correspondência entre a frequência de ressonância e a umidade relativa.

Portanto, a escolha do modelo quadrático se justifica não apenas pelos melhores indicadores estatísticos, mas também pela sua capacidade de fornecer uma representação robusta e eficiente da interação entre os parâmetros estudados, consolidando a validade e confiabilidade do sensor desenvolvido para aplicações em Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM).

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a eficácia e a precisão do modelo proposto na representação da relação entre a frequência de ressonância (fr) e a umidade relativa (UR) em blocos de concreto. Ao comparar a equação de ajuste da curva com os pontos experimentais e os dados da referência [74], observou-se que o ajuste realizado está bem centralizado, confirmando a adequação da função escolhida para os objetivos do estudo. Esse ajuste eficaz valida o modelo desenvolvido, destacando sua capacidade de prever com precisão as variações de umidade a partir das alterações na frequência de ressonância.

Além disso, a análise comparativa da sensibilidade do sensor proposto revelou uma melhoria significativa em relação ao sensor descrito na referência [74]. A frequência de ressonância do sensor desenvolvido demonstrou uma sensibilidade aprimorada, evidenciada pelo maior contraste na variação da fr em resposta às mudanças na umidade relativa. Isso indica um desempenho superior do sensor na detecção de variações de umidade.

A análise da mudança percentual na frequência de ressonância (PRFS) também confirmou que o sensor proposto alcança um desempenho comparável ao sensor de referência, com uma mudança percentual de fr praticamente igual. No entanto, o sensor desenvolvido neste estudo apresentou melhorias na mudança percentual na frequência de ressonância (PRFSE) em relação

à referência, ficando em torno de um valor constante que reforça sua eficácia.

Por fim, o comparativo da sensibilidade (S) e da melhoria de sensibilidade (SE) indica que o sensor proposto não apenas mantém uma sensibilidade robusta, mas também supera o desempenho do sensor de referência, evidenciando um avanço significativo na capacidade de detecção de umidade em blocos de concreto. Para dar continuidade ao desenvolvimento e aprimoramento do SHM proposto, recomenda-se a realização de pesquisas futuras que aprofundem e ampliem os resultados obtidos. Dentre os possíveis trabalhos a serem explorados, destacam-se:

Aprimoramento do sensor: investigar novos materiais e configurações geométricas para as superfícies seletivas em frequência (FSS) e antenas de microfita, com o objetivo de aumentar ainda mais a sensibilidade do sensor. A pesquisa pode incluir materiais com diferentes propriedades eletromagnéticas e mecânicas, bem como ajustes no design das antenas, visando otimizar o desempenho do sistema em condições ambientais diversas.

Testes em condições ambientais variáveis: realizar experimentos em ambientes onde as variações de temperatura e umidade sejam mais expressivas, a fim de avaliar a robustez e a precisão do sensor em cenários extremos. Esses testes permitirão entender como o sistema se comporta em situações reais, identificando possíveis melhorias para sua aplicação em diferentes climas e regiões.

Aplicações práticas em larga escala: implementar o sensor desenvolvido em estruturas de concreto reais, como edifícios, pontes e outras construções civis, visando o monitoramento contínuo ao longo do tempo. Essa etapa será crucial para validar o sistema em condições de campo, garantindo sua eficácia em projetos de grande escala e sua contribuição para a manutenção preventiva e corretiva dessas estruturas.

Integração com sistemas de IoT: desenvolver uma plataforma baseada em Internet das Coisas (IoT) que permita a coleta, análise e monitoramento remoto dos dados gerados pelo sensor. Essa integração facilitará a aplicação prática do sistema em diversas construções, oferecendo uma ferramenta poderosa para a gestão e acompanhamento das condições estruturais em tempo real, além de promover a automação e a eficiência no gerenciamento de dados.

Referências

- [1] Bently, D. E. & Hatch, C. T. Fundamentals of rotating machinery diagnostics. New York, NY: ASME Press. 2003
- [2] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. & Shevitz D. W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS. 1996.
- [3] Farrar, C. R. & Lieven, N. A. J. Damage prognosis: the future of structural health monitoring. Phil. Trans. R. Soc. A 365, 623–632. 2007.
- [4] Friswell, M. I. Damage identification using inverse methods. Phil. Trans. R. Soc. A 365, 393–410. 2007.
- [5] McCann, D. J., & Forde, M. C. (2001). Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT & E International, 34(3), 163-176.
- [6] Silva, D. M., et al. (2019). The use of infrared thermography to evaluate building energy performance. Energy and Buildings, 198, 159-169.
- [7] Raghavan, R. (2007). Acoustic emission monitoring in concrete structures: A review. Materials and Structures, 40(7), 693-702.
- [8] Rojas, L. C., & Álvarez, M. (2017). Digital radiography in civil engineering: A review. Journal of Nondestructive Evaluation, 36(1), 23-30.
- [9] Zhang, L., et al. (2015). Fiber optic sensors for monitoring concrete structures: A review. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 5(1), 1-18.
- [10] Mohanty, B., & Mallik, D. (2012). Eddy current testing: A review of its applications in aerospace structures. NDT & E International, 48, 12-20.
- [11] Lynch, J. P. An overview of wireless structural health monitoring for civil structures. Phil. Trans. R. Soc. A 365, 345–372. 2007
- [12] Rytter, A. Vibration based inspection of civil engineering structures., Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg Ph.D. University, Denmark. 1993.
- [13] Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Czarnecki, J. J., Shunk, D. D., Stinemates, D. W. Nadler, B. R. 2003 A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.
- [14] Worden, K. & Manson, G. 2007 The application of machine learning to structural monitoring. Phil. Trans. R. Soc. A 365, 515–537.

- [15] Daliri, A., Galehdar, A., John, S., Rowe, W.S.T. and Ghorbani, K., “Strain in Composite Materials using Microstrip Patch Antennas”, Proceedings of the ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems(SMASIS 2010), Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2010.
- [16] González, L. A., et al. (2018). Microwave Resonators: Theory and Applications. *Journal of Microwave Science and Technology*, 5(3), 1-15.
- [17] Kumar, A., & Sharma, S. (2020). Overview of Microwave Resonators in Sensor Applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 310, 112150.
- [18] Ramaccia, D.; Guattari, C.; Bilotti, F.; Toscano, A. Metamaterial split-ring resonators for retrieval of soil electromagnetic properties. In Proceedings of the 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials, Bordeaux, France, 16–21 September 2013.
- [19] Bahar, A.A.M.; Zakaria, Z.; Rashid, S.R.A.; Isa, A.A.M.; Alahnomi, R.A. Dielectric Analysis of Liquid Solvents Using Microwave Resonator Sensor for High Efficiency Measurement. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2017, 59, 367–371
- [20] Shafi, K.T.M.; Ansari, M.A.H.; Jha, A.K.; Akhtar, M.J. Design of SRR-Based Microwave Sensor for Characterization of Magnetodielectric Substrates. *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.* 2017, 27, 524–526.
- [21] Shafi, K.T.M.; Jha, A.K.; Akhtar, M.J. Nondestructive technique for detection of adulteration in edible oils using planar RF sensor. In Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), New Delhi, India, 5–9 December 2016
- [22] Verma, A.; Bhushan, S.; Tripathi, P.N.; Goswami, M.; Singh, B.R. A Defected Ground Split Ring Resonator for an Ultra-Fast, Selective Sensing of Glucose Content in Blood Plasma. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2017, 31, 1049–1061
- [23] DE OLIVEIRA, JG Domingos et al. Bio-inspired Sensor for the Electrical Permittivity Characterization of Dielectric Materials. In: 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2020. p. 1-5.
- [24] Daliri, A., Galehdar, A., John, S., Rowe, W.S.T. and Ghorbani, K, Wireless strain measurement using circular microstrip patch antennas: *Sensors and Actuators A* 184 (2012) 86-92. 2012.
- [25] T. K. Wu, *Frequency-Selective Surface and Grid Array*, Wiley, New York, 1995.
- [26] A. L. P. S. CAMPOS, *Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto*, Natal-RN, IFRN Editora, 2009.
- [27] Mittra, R.; Chan, C.H.; Cwik, T., “Techniques for analyzing frequency selective surfaces- a review,” *Proceedings of the IEEE*, pp. vol.76, no.12, pp.1593-1615, Dec. 1988
- [28] Munk, B. A., *Frequency-selective surfaces: theory and design*, New York: John Wiley & Sons, 2000

- [29] Silva, Patric Lacouth da, Modelagem de Superfícies Seletivas de Frequência e Antenas de Microfita 84 utilizando Redes Neurais Artificiais., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Federal do Rio: Dissertação (Mestrado), 2006.
- [30] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik, “Techniques for analyzing frequency selective surfaces— a review,” IEEE Proceedings, vol. 76, no. 12, pp. 1593–1615, 1988.
- [31] M. Raspopoulos e S. Stravou, “Frequency selective buildings through frequency selective surfaces,” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 59, pp. 2998- 3005, 2011
- [32] F. Bayatpur, Metamaterial-Inspired Frequency-Selective Surfaces. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, EUA , Dissertation, 2009.
- [33] J. C. Vardaxoglou, Frequency Selective Surfaces – Analysis and Design, Research Studies Press, England, 1997.
- [34] F. C. G.d.S. Segundo, Análise e projeto de superfícies seletivas em frequência multibanda e/ou banda larga,: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [35] B. Sanz-Izquierdo, A. Edward, J.B. R. Parker e J.C. Batchelor, “Singly and dual polarized convoluted frequency selective structures,” IEEE transactions on Antennas and Propagation, v. 58, n. 3, p. 690-696, 2010.
- [36] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, “Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 30 (5), 904 – 909 (1982).
- [37] G. Zarrillo and K. Aguiar, “Closed-Form low frequency solutions for electromagnetic waves through a frequency selective surface”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 35 (12), 1406 – 1417 (1987).
- [38] R. J. Langley and E. A. Parker, “Equivalent circuit model for arrays of square loops”, Electronics Letters, 18 (7), 294-296 (1982).
- [39] R. J. Langley and E. A. Parker, “Double-square frequency selective surfaces and their equivalent circuit”, Electronic Letters, 19 (17), 675 - 677 (1983).
- [40] P. Harms, R. Mittra, and W. Ko, “Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference timedomain algorithm for FSS structures”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 42 (9), 1317 – 1324 (1994).
- [41] G. Manara, A. Monorchio, and R. Mittra, “Frequency selective surfaces desing based on genetic algorithm”, Electronic Letters, 35 (17), 1400 – 1401 (1999).
- [42] S. Chakravarty, R. Mittra, and N. R. Williams, “On the application of the microgenetic algorithm to the design of broad band microwave absorbers comprising frequency selective surfaces embedded on multilayered dielectric media”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 49 (6), 1050 – 1059 (2001).

- [43] WU, T. K. Frequency Selective Surface and Grid Array. 2. ed. New York, United States: Wiley, 2012. 327 p. v. 1. ISBN 978-0471311898.
- [44] Marcuvitz, Neil. Waveguide Handbook. 2. ed. New York, United States: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951. 446 p.
- [45] Silva, B. S.; Campos, A. L. P. de S.; Neto, A. G. Equivalent circuit model for analysis of frequency selective surfaces with ring and double concentric ring apertures. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, v. 14, n. 7, p. 600-607, 2020.
- [46] Kanth, V. Krushna; Raghavan, S. Complementary frequency selective surface array optimization using equivalent circuit model. In: 2017 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC). IEEE, 2017. p. 1-4.
- [47] Araújo, Gilmar Linhares R.; Campos, Antonio Luiz Pereira Siqueira; De medeiros martins, Allan. Improvement of the equivalent circuit method for analysis of frequency selective surfaces using genetic algorithms and rational algebraic models. *Progress In Electromagnetics Research*, v. 55, p. 67-74, 2015.
- [48] T. Cwik, R. Mittra, K. Lang, and T. Wu, "Frequency selective screens," *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, vol. 29, no. 2, pp. 5–10, 1987.
- [49] P. W. Hannan and M. A. Balfour, "Simulation of a phased array antenna in waveguide," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, no. 3, pp. 342–353, 1965.
- [50] D. K. Ghodgaonka, V. V. Varadan, and V. J. Varadan, "A free-space method for measurement of dielectric constants loss tangents at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 3, pp. 789–793, 1989.
- [51] M. W. B. Silva, "Superfícies Seletivas em Frequências - FSS: Concepção e Pojeto de Absorvedores Planares de Micro-ondas Para Aplicação em Wlan, Wimax e Radar," Tese de doutorado, DECOM, UNICAMP, Campinas, SP, 2014.
- [52] A. L. P. S. Campos, "Superfícies seletivas de frequência sobre substratos dielétricos anisotrópicos uniaxiais", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1999.
- [53] Denidni, T.A., Lee, L., Lim, Y., and Rao, Q.: 'Wide-band highefficiency printed loop antenna design for wireless communication systems', *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2005, 54, (3), pp. 873–878.
- [54] C. A. Balanis, *Antenna Theory – Analysis and Design*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. NY,EUA. 2005.
- [55] Barros, V.E., Estudo do Efeito de Substrato Metamaterias em Parâmetros de Antenas de Microfita. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.
- [56] Andrade, H. D. de, Desenvolvimento de um Ressonador Retangular de Fenda com Múltiplas Camadas de Substrato e com Utilização de Material PBG para Sistema de Comunicação Sem Fio. 100 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do

Norte.

- [57] Medeiros, T. E. L. Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.
- [58] Morais, J. H. C. Estudo de antenas patches de microfita miniaturizadas em banda larga para aplicação em dispositivos móveis e portáteis. 2011. 75f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [59] J. S. Hong e M. J. Lancaster, “Microstrip Filters for RF/Microwave Applications”, Kai Chang, Willey, 2001
- [60] Pozar, David M. Microwave Engineering. 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.
- [61] K. Kupfer, Radiofrequency and microwave moisture sensing of building materials, *Sensors Update* 7 (1) (2000) 27–50.
- [62] M.L. Wang, J.P. Lynch, H. Sohn, *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring*, Elsevier, 2014.
- [63] B. Glisic, D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, 2008.
- [64] M. Wevers, K. Lambrighs, Applications of acoustic emission for shm: A review, *Encyclopedia Struc. Health Monit.* (2009).
- [65] J. Zhang, G.Y. Tian, A.M. Marindra, A.I. Sunny, A.B. Zhao, A review of passive rfid tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications, *Sensors* 17 (2) (2017) 265.
- [66] C.A. Tokognon, B. Gao, G.Y. Tian, Y. Yan, Structural health monitoring framework based on internet of things: A survey, *IEEE Internet Things J.* 4 (3) (2017) 619–635.
- [67] A. Lazaro, R. Villarino, F. Costa, S. Genovesi, A. Gentile, L. Buoncristiani, D. Girbau, Chipless dielectric constant sensor for structural health testing, *IEEE Sens. J.* 18 (13) (2018) 5576–5585.
- [68] A.M.J. Marindra, G.Y. Tian, Chipless rfid sensor for corrosion characterization based on frequency selective surface and feature fusion, *Smart Mater. Struc.* 29 (12) (2020) 125010.
- [69] A.V. Saetta, B.A. Schrefler, R.V. Vitaliani, The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials, *Cement Concrete Res.* 23 (4) (1993) 761–772.
- [70] X. Zhang, H. Zhao, Characterization of moisture diffusion in cured concrete slabs at early ages, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015 (2015).

- [71] C. Thajudeen, A. Hoorfar, F. Ahmad, T. Dogaru, Measured complex permittivity of walls with different hydration levels and the effect on power estimation of twri target returns, *Progr. Electromagnet. Res.* 30 (2011) 177–199.
- [72] A. C140-20a, Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units, Standard, ASTM International, 2020.
- [73] B.A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, John Wiley & Sons, 2000.
- [74] C.A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis And Design*, John Wiley & Sons, 2016.
- [75] G, F. R. Juan, C. S. P. L. Antonio, A. D. Humberto. A microwave system for measuring moisture of hollow concrete blocks. *Sensors and Actuators A* 323 (2021) 112657.
- [76] O. João G.D., P. Erica N. M. G., S. N. Valdemir P., D’Assunção A. G. CSRR-Based Microwave Sensor for Dielectric Materials Characterization Applied to Soil Water Content Determination, *mdpi, Sensors* 2020, 20, 255;
- [77] Ansari, M.A.H.; Jha, A.K.; Akhtar, M.J. Design and application of the CSRR-based planar sensor for noninvasive measurement of complex permittivity. *IEEE Sens. J.* 2015, 15, 7181– 7189.
- [78] ASTM C90-23 – Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023