

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

TAINARA DOS SANTOS MARECO

DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL  
PARA MEDIÇÃO DE RESSONÂNCIAS DE ALTO FATOR DE  
QUALIDADE NO REGIME DE MICRO-ONDAS

São Carlos  
2025



TAINARA DOS SANTOS MARECO

DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL  
PARA MEDIÇÃO DE RESSONÂNCIAS DE ALTO FATOR DE  
QUALIDADE NO REGIME DE MICRO-ONDAS

Monografia apresentada ao Curso  
de Engenharia Elétrica, com  
ênfase em Eletrônica, da Escola  
de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, como  
parte dos requisitos para obtenção  
do Título de Engenheira Eletricista

Orientador: Prof. Dr. Emiliano  
Rezende Martins

São Carlos  
2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M323d      Mareco, Tainara dos Santos  
Desenvolvimento de um aparato experimental para  
medição de ressonâncias de alto fator de qualidade no  
regime de micro-ondas / Tainara dos Santos Mareco;  
orientador Emiliano Rezende Martins. São Carlos, 2025.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.

1. Fotônica. 2. Micro-Ondas. 3. Estado Confinado  
no Contínuo (BIC). 4. Metassuperfícies. 5.  
Caracterização Experimental. I. Título.



# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome:** Tainara dos Santos Mareco

**Título:** “Desenvolvimento de um aparato experimental para medição de ressonâncias de alto fator de qualidade no regime de micro-ondas”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado**  
em 08/12/2025,

com NOTA 9,5 (nove, cinco), pela Comissão  
Julgadora:

**Prof. Dr. Vinicius Marrara Pepino - SEL/EESC/USP**

**Dr. Mateus Isaac de Oliveira Souza - EESC/USP**

**Prof. Adjunto Luís Alberto Mijam Barêa - UFSCar**

**Orientador: Prof. Dr. Emiliano Rezende Martins**  
**Docente Associado SEL/EESC/USP**

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:**  
**Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior**



*Dedico este trabalho a todos que acreditam no poder transformador da ciência e da engenharia, e que, com esforço e curiosidade, contribuem diariamente para a construção de um mundo melhor.*



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por sempre me sustentar e me conceder a coragem necessária para enfrentar cada desafio.

Agradeço aos meus pais, Cleber e Neli, pelo apoio ao longo de toda a minha vida, e ao meu irmão, Thales, por alegrar todos os meus dias.

Sou imensamente grata às minhas avós, Ayako e Queico (*in memoriam*), mulheres fortes e guerreiras, verdadeiras inspirações para mim.

Estendo os agradecimentos aos meus demais familiares, incluindo tios, tias, primos e primas, que sempre torceram pelo meu sucesso.

Agradeço também aos meus amigos que, durante a graduação, se tornaram a minha família em São Carlos (SP), fazendo com que os momentos difíceis fossem mais leves.

Meu reconhecimento também se estende aos professores, não apenas aos que encontrei na Universidade, mas a todos que fizeram parte da minha vida.

Também, agradeço a todos os outros que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação como engenheira.

Agradeço, de maneira especial, ao meu orientador, Professor Emiliano Rezende Martins, pela orientação e pela confiança depositada em mim ao longo deste projeto.

Por fim, agradeço a Guilherme Simoneti de Arruda por me ensinar a utilizar o VNA, por disponibilizar suas estruturas e por toda a ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.



*“A maior riqueza do homem é a sua incompletude.”*

*Manoel de Barros*





## RESUMO

MARECO, T. S. DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE RESSONÂNCIAS DE ALTO FATOR DE QUALIDADE NO REGIME DE MICRO-ONDAS. 2025. 95 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Ressonâncias de alto fator de qualidade ( $Q$ ) desempenham um papel central em diversas aplicações fotônicas, incluindo sensores. Dentre as estruturas capazes de atingir altos valores de  $Q$ , destacam-se os *Bound States in the Continuum* (BICs), modos que, teoricamente, podem apresentar valores de  $Q$  infinitos. Na prática, esses modos são acessados por meio de suas versões quasi-BIC, cuja observação experimental é desafiadora. No GMETA, grupo de pesquisa da EESC/USP, um estudo sobre o efeito da finitude em modos BIC era limitado pelo aparato anteriormente utilizado, que não permitia a detecção desse tipo de ressonância. Diante disso, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um aparato experimental de baixo custo, projetado para a caracterização de ressonâncias de alto fator de qualidade no regime de micro-ondas. A validação do aparato foi realizada a partir de medições de ressonâncias em estruturas periódicas com geometrias *single ridge* e *double ridge*. Os resultados obtidos foram superiores aos alcançados anteriormente pelo grupo, permitindo a observação de ressonâncias de alto fator de qualidade e viabilizando a conclusão do estudo experimental do efeito da finitude conduzido no grupo. O aparato desenvolvido se mostra, portanto, uma solução acessível para medições de ressonâncias com alto fator de qualidade no regime de micro-ondas.

Palavras-chave: Fotônica; Micro-Ondas; Estado Confinado no Contínuo (BIC); Metassuperfícies; Caracterização Experimental.



## ABSTRACT

MARECO, T. S. DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL APPARATUS FOR MEASURING HIGH-QUALITY-FACTOR RESONANCES IN THE MICROWAVE REGIME. 2025. 95 p. Final Project (Trabalho de Conclusão de Curso) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2025.

High quality factor ( $Q$ ) resonances play a central role in several photonic applications, including sensing. Among the structures capable of achieving high  $Q$  values, *Bound States in the Continuum* (BICs) stand out as modes that can, in theory, exhibit infinite  $Q$  values. In practice, these modes are accessed through their quasi-BIC counterparts, whose experimental observation is challenging. At GMETA, a research group at EESC/USP, a study on the effects of finiteness in BIC modes was limited by the previously used experimental apparatus, which did not allow the detection of this type of resonance. In this context, the objective of this work was to develop a low-cost experimental apparatus designed for the characterization of high quality factor resonances in the microwave regime. The validation of the apparatus was carried out through resonance measurements in periodic structures with *single ridge* and *double ridge* geometries. The results obtained were superior to those previously achieved by the group, enabling the observation of high quality factor resonances and making it possible to conclude the experimental study of finiteness effects conducted within the group. The developed apparatus therefore represents an accessible solution for measuring high quality factor resonances in the microwave regime.

Keywords: Photonics; Microwaves; Bound State in the Continuum (BIC); Metasurfaces; Experimental Characterization.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aparato experimental anteriormente utilizado pelo grupo. . . . .	24
Figura 2 – Exemplos de cristais fotônicos de uma, duas e três dimensões, onde as cores indicam materiais com distintas constantes dielétricas. . . . .	27
Figura 3 – Cavidade de Fabry-Pérot. . . . .	28
Figura 4 – Desenho ilustrativo sobre BIC. . . . .	30
Figura 5 – Laboratório revestido com espuma anecoica para medições em radiofrequência. . . . .	34
Figura 6 – Configurações típicas de antenas corneta. . . . .	37
Figura 7 – Geometrias das estruturas estudadas. . . . .	41
Figura 8 – Placas com extensões encaixáveis para variação do comprimento total das estruturas. . . . .	42
Figura 9 – Módulos conectados para a variação do comprimento total da estrutura. . . . .	42
Figura 10 – Ideia geral do aparato experimental. . . . .	43
Figura 11 – Projeto da base com todas as peças encaixadas. Legenda: (1) peças das extremidades; (2) peças intermediárias com postes; (3) peças intermediárias sem postes; (4) peça central. . . . .	44
Figura 12 – Exemplo de cavidades e de elementos de encaixe. . . . .	44
Figura 13 – Projeto para a peça da extremidade. . . . .	45
Figura 14 – Projeto para a peça intermediária com poste. . . . .	46
Figura 15 – Projeto para a peça intermediária sem poste. . . . .	46
Figura 16 – Projeto para a peça central. . . . .	47
Figura 17 – Configuração final da base. . . . .	48
Figura 18 – Desenho esquemático da região recortada na placa central de isopor. . . . .	49
Figura 19 – Desenho esquemático da região recortada nas placas externas de isopor. . . . .	49
Figura 20 – Organização das placas para a primeira configuração do suporte para as estruturas. . . . .	50
Figura 21 – Primeira configuração do suporte para as estruturas (uma placa). . . . .	50
Figura 22 – Inclinação das estruturas devido à espessura de 2 cm das placas. . . . .	51
Figura 23 – Desenho esquemático da região recortada na placa intermediária de isopor sem o recorte para a exposição da estrutura. . . . .	52
Figura 24 – Organização das placas para a segunda configuração do suporte para as estruturas. . . . .	52
Figura 25 – Segunda configuração do suporte para as estruturas (duas placas). . . . .	53
Figura 26 – Desenho esquemático da região recortada na placa intermediária de isopor com o recorte para a exposição da estrutura periódica. . . . .	54
Figura 27 – Organização das placas para a configuração final do suporte para as estruturas. . . . .	54

Figura 28 – Configuração final do suporte para as estruturas (duas placas). . . . .	55
Figura 29 – Antena PE9851/2F-20 da empresa Pasternack. . . . .	56
Figura 30 – Suporte utilizado para fixar as antenas na mesa óptica. . . . .	56
Figura 31 – VNA utilizado nas medições. . . . .	57
Figura 32 – Unidade de calibração utilizada. . . . .	58
Figura 33 – Disposição das antenas no experimento. . . . .	58
Figura 34 – Fixação do suporte utilizado na base. . . . .	59
Figura 35 – Configuração experimental antes da inserção da estrutura periódica. . .	60
Figura 36 – Inserção da estrutura periódica no suporte. . . . .	60
Figura 37 – Configuração experimental com a estrutura periódica. . . . .	61
Figura 38 – Simulações realizadas para as geometrias <i>single ridge</i> e <i>double ridge</i> . . .	63
Figura 39 – Resultados obtidos pelo GMETA para a primeira ressonância da geometria <i>single ridge</i> . . . . .	64
Figura 40 – Resultados obtidos pelo GMETA para a segunda ressonância da geometria <i>single ridge</i> . . . . .	65
Figura 41 – Resultados obtidos pelo GMETA para a geometria <i>double ridge</i> . . . . .	65
Figura 42 – Resultados obtidos para a primeira ressonância da estrutura com geometria <i>single ridge</i> com a primeira configuração experimental. . . . .	67
Figura 43 – Resultados obtidos para a segunda ressonância da estrutura com geometria <i>single ridge</i> com a primeira configuração experimental. . . . .	69
Figura 44 – Resultados obtidos para a estrutura com geometria <i>double ridge</i> com a primeira configuração experimental. . . . .	71
Figura 45 – Resultados medidos para a estrutura com geometria <i>double ridge</i> na segunda configuração experimental (medição disponível apenas para duas placas). . . . .	74
Figura 46 – Resultados obtidos para a primeira ressonância da estrutura com geometria <i>single ridge</i> na configuração experimental final. . . . .	76
Figura 47 – Resultados obtidos para a segunda ressonância da estrutura com geometria <i>single ridge</i> na configuração experimental final. . . . .	78
Figura 48 – Resultados obtidos para a estrutura com geometria <i>double ridge</i> na configuração experimental final. . . . .	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos anteriormente pelo GMETA. . . . .	66
Tabela 2 – Erro relativo percentual entre as medições realizadas anteriormente pelo GMETA (estruturas finitas) e as simulações (estruturas infinitas). . . .	66
Tabela 3 – Primeira configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos e os dados obtidos anteriormente pelo GMETA para a ressonância 1 da estrutura com geometria <i>single ridge</i> . . . . .	68
Tabela 4 – Primeira configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos com a nova configuração experimental e os resultados obtidos anteriormente pelo GMETA para a ressonância 2 da estrutura com geometria <i>single ridge</i> . . . . .	70
Tabela 5 – Primeira configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos e os dados obtidos anteriormente pelo GMETA para a estrutura com geometria <i>double ridge</i> . . . . .	72
Tabela 6 – Erro relativo percentual entre as medições com a primeira configuração experimental (estruturas finitas) e as simulações (estruturas infinitas). . . . .	72
Tabela 7 – Comparativo de erros relativos obtidos pelo GMETA e em medições com a utilização da primeira configuração experimental. . . . .	73
Tabela 8 – Segunda configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos com a segunda configuração experimental e os resultados obtidos anteriormente pelo GMETA para a estrutura com geometria <i>double ridge</i> (duas placas). . . . .	74
Tabela 9 – Erro relativo percentual entre as medições com a segunda configuração experimental (estruturas finitas) e a simulação (estruturas infinitas). . . . .	74
Tabela 10 – Comparativo de erros relativos obtidos pelo GMETA e em medições com a utilização da segunda configuração experimental. . . . .	75
Tabela 11 – Configuração experimental final: comparação entre os resultados obtidos e os dados anteriores do GMETA para a ressonância 1 da estrutura com geometria <i>single ridge</i> . . . . .	77
Tabela 12 – Configuração experimental final: comparação entre os resultados obtidos e os dados anteriores do GMETA para a ressonância 2 da estrutura com geometria <i>single ridge</i> . . . . .	79
Tabela 13 – Configuração experimental final: comparação entre os resultados obtidos e os dados anteriores do GMETA para a estrutura com geometria <i>double ridge</i> . . . . .	81
Tabela 14 – Erro relativo percentual entre as medições com a configuração experimental final (estruturas finitas) e as simulações (estruturas infinitas). . . . .	81

Tabela 15 – Comparativo de erros relativos obtidos pelo GMETA e em medições  
com a utilização da configuração experimental final. . . . . 82



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGMR	<i>Air Guided Mode Resonance</i> (Modos Guiados no Ar)
BIC	<i>Bound State in the Continuum</i> (Estado Confinado no Contínuo)
EBL	<i>Electron Beam Lithography</i> (Litografia por Feixe de Elétrons)
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i> (Poliestireno Expandido/Isopor)
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i> (Largura à Meia Altura)
GHz	Gigahertz
GMETA	Grupo de Metamateriais, Micro-ondas e Óptica
GMR	<i>Guided Mode Resonance</i> (Ressonância de Modo Guiado)
ICP-RIE	<i>Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching</i> (Corrosão Assistida por Plasma)
MHz	Megahertz
PBG	<i>Photonic Band Gap</i> (Banda Proibida Fotônica)
PhC	<i>Photonic Crystal</i> (Cristal Fotônico)
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Polilático)
Fator Q	Fator de Qualidade
RF	Radiofrequência
SNA	<i>Scalar Network Analyzer</i> (Analisador de Rede Escalar)
THz	Terahertz
USP	Universidade de São Paulo
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> (Analisador de Rede Vetorial)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>25</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>Cavidades Fotônicas</b>	<b>27</b>
2.1.1	Conceito e princípios de confinamento óptico	27
2.1.1.1	Cavidade de Fabry-Pérot	28
2.1.2	Fator de Qualidade (Q)	29
<b>2.2</b>	<b>Ressonâncias com alto Fator de Qualidade</b>	<b>29</b>
2.2.1	Estados Confinados no Contínuo (BICs)	29
2.2.1.1	Origem e definição	29
2.2.1.2	Classificação e mecanismos de formação	31
2.2.1.3	Aplicações e relevância dos BICs em fotônica	31
2.2.1.4	Desafios experimentais	32
<b>2.3</b>	<b>Experimentos em Micro-Ondas</b>	<b>32</b>
2.3.1	Relação entre experimentos fotônicos e experimentos em micro-ondas	32
2.3.2	Procedimentos experimentais em micro-ondas	33
2.3.3	Parâmetros de espalhamento (Parâmetros S)	34
<b>2.4</b>	<b>Instrumentação e Materiais Utilizados</b>	<b>35</b>
2.4.1	Instrumentação experimental	35
2.4.1.1	<i>Vector Network Analyzer</i> (VNA)	35
2.4.1.2	Antenas	36
2.4.2	Propriedades eletromagnéticas dos materiais de construção do aparato experimental	37
2.4.2.1	Isopor	37
2.4.2.2	Papel alumínio	38
2.4.3	Estruturas estudadas	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Estruturas estudadas</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Aparato Experimental</b>	<b>42</b>
3.2.1	Base	43
3.2.1.1	Peças das extremidades	45
3.2.1.2	Peças intermediárias com postes	45
3.2.1.3	Peças intermediárias sem postes	46
3.2.1.4	Peça central	46

3.2.1.5	Configuração final da base . . . . .	47
3.2.2	Suporte para as estruturas periódicas . . . . .	48
3.2.2.1	Primeira Configuração . . . . .	48
3.2.2.2	Segunda Configuração . . . . .	51
3.2.2.3	Configuração Final . . . . .	53
<b>3.3</b>	<b>Experimento . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise dos dados experimentais . . . . .</b>	<b>61</b>
3.4.1	Amplitude da ressonância . . . . .	61
3.4.2	Fator de qualidade (Fator Q) . . . . .	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Simulações . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Amplitudes e Fatores de Qualidade obtidos anteriormente pelo GMETA</b>	<b>64</b>
<b>4.3</b>	<b>Primeira Configuração . . . . .</b>	<b>66</b>
4.3.1	Geometria <i>single ridge</i> . . . . .	67
4.3.1.1	Ressonância 1 . . . . .	67
4.3.1.2	Ressonância 2 . . . . .	68
4.3.2	Geometria <i>double ridge</i> . . . . .	70
4.3.3	Análise dos resultados . . . . .	72
<b>4.4</b>	<b>Segunda Configuração . . . . .</b>	<b>73</b>
4.4.1	Geometria <i>double ridge</i> . . . . .	73
4.4.2	Análise dos resultados . . . . .	74
<b>4.5</b>	<b>Configuração Final . . . . .</b>	<b>75</b>
4.5.1	Geometria <i>single ridge</i> . . . . .	75
4.5.1.1	Ressonância 1 . . . . .	75
4.5.1.2	Ressonância 2 . . . . .	77
4.5.2	Geometria <i>double ridge</i> . . . . .	79
4.5.3	Análise dos resultados . . . . .	81
<b>4.6</b>	<b>Dificuldades experimentais encontradas . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO A – DATASHEET DA ANTENA PE9851/2F-20 . . . . .</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da engenharia tem caminhado lado a lado com o progresso da humanidade, sendo parte essencial das transformações sociais, culturais e tecnológicas que moldaram o mundo ao longo dos séculos [1]. Ao longo desse desenvolvimento, os engenheiros utilizam os conhecimentos científicos para criar soluções práticas que transformam o mundo e atendem às demandas da sociedade [1].

Nesse cenário, uma das áreas mais relevantes da ciência atual é a fotônica [2]. Conhecida como a ciência da luz, a fotônica abrange os estudos e as tecnologias voltadas à geração, controle e detecção de ondas luminosas e de fótons [3].

O termo *fotônica* foi introduzido pelo físico francês Pierre Aigrain, em 1967, e tem sido amplamente utilizado desde meados da década de 1970, em analogia à palavra *eletrônica*, estabelecendo uma correspondência entre a manipulação de elétrons, na eletrônica, e a de fótons, na fotônica [4]. Além do termo, é possível observar paralelos entre a fotônica e a eletrônica ao comparar, por exemplo, cabos elétricos com fibras ópticas, circuitos elétricos com circuitos ópticos, transistores elétricos com transistores ópticos, entre outros componentes [5].

A fotônica é aplicada nos mais diversos setores, contribuindo significativamente para avanços nas áreas de manufatura, biomedicina, energia alternativa, aeroespacial, telecomunicações, entre outras [6].

Os sensores fotônicos, em particular, desempenham um papel fundamental na ciência e na tecnologia [7]. Em comparação com os sensores eletrônicos, eles oferecem vantagens como maior sensibilidade, imunidade à interferência eletromagnética, capacidade de operar com maior largura de banda, resposta extremamente rápida e melhor desempenho em ambientes com alto ruído elétrico [8].

Sensores fotônicos normalmente se baseiam em fenômenos de ressonância óptica, os quais podem ser alcançados ao confinar a luz em cavidades fotônicas [9, 10]. Essas cavidades possuem propriedades que se relacionam com o comprimento de onda da luz [9]. Dessa forma, é possível detectar variações no ambiente externo por meio das mudanças nas características espectrais da luz confinada, como deslocamentos na posição dos picos de transmissão ou de reflexão.

Um parâmetro fundamental para avaliar o desempenho de cavidades fotônicas é o Fator de Qualidade ( $Q$ ), que representa a relação entre a energia média retida na cavidade e a energia que se perde a cada ciclo de propagação [11].

Nesse contexto, os chamados Estados Confinados no Contínuo (*Bound States in the Continuum* – BICs) têm ganhado destaque em estruturas fotônicas ressonantes por

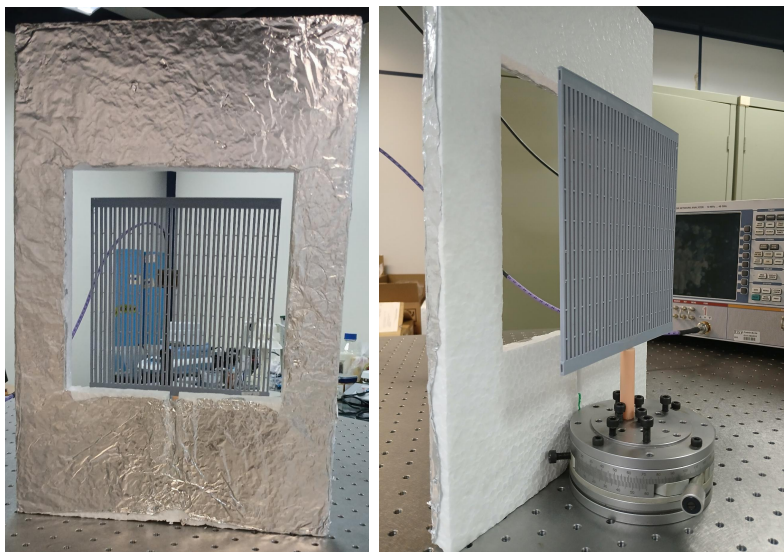
permitirem Fatores  $Q$  muito altos. Esses estados consistem em modos que permanecem localizados espacialmente mesmo quando coexistem com modos radiantes, apresentando tempo de vida e Fator  $Q$  teoricamente infinitos [12,13].

Apesar dos avanços teóricos relacionados aos modos de estado confinados no contínuo, ainda há uma compreensão limitada sobre como a finitude das cavidades fotônicas afeta esse fenômeno experimentalmente. Isso ocorre porque os BICs estão intimamente ligados à finitude das estruturas e sua observação exige considerar efeitos que não aparecem em sistemas infinitamente periódicos, tornando sua experimentação particularmente desafiadora [14].

O GMETA (Grupo de Metamateriais, Micro-ondas e Óptica), vinculado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), tem atuado ativamente no design, modelagem e integração de metamateriais e micro/nanoestruturas ópticas e fotônicas [15]. Parte do escopo do grupo inclui a investigação de cavidades fotônicas para aplicações em sensores de alto desempenho, como biossensores.

Visando ressonâncias de alto Fator  $Q$ , estudos sobre o efeito da finitude em modos BIC em cavidades fotônicas baseadas em metassuperfícies estavam sendo desenvolvidos pelo grupo GMETA. Entretanto, o aparato experimental que estava sendo utilizado anteriormente não permitiu resultados condizentes com o esperado, pois não oferecia a estabilidade mecânica necessária para tais medições. Além disso, a configuração experimental anterior (Figura 1) não oferecia facilidade de montagem, o que comprometia a praticidade e resultava em um maior tempo necessário para a realização das medições.

Figura 1 – Aparato experimental anteriormente utilizado pelo grupo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Com o intuito de contribuir para esse entendimento, o presente trabalho teve como objetivo projetar e construir um aparato experimental de baixo custo e alta estabilidade mecânica, capaz de medir ressonâncias de alto Fator  $Q$ . Embora o aparato tenha sido concebido para medições de ressonâncias no regime de micro-ondas em geral, ele foi testado e validado através da caracterização de dois tipos de estruturas periódicas: *single ridge* e *double ridge*.

Os resultados alcançados neste trabalho foram consideravelmente melhores do que os obtidos anteriormente, tornando possível a conclusão do estudo do efeito da finitude desenvolvido pelo grupo.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi projetar e construir um aparato experimental de baixo custo e alta estabilidade mecânica, capaz de medir ressonâncias de alto Fator  $Q$  no regime de micro-ondas. Embora o sistema tenha sido concebido para caracterizar ressonâncias de alto Fator  $Q$  de forma geral, sua validação foi realizada mediante a análise comparativa entre estruturas com geometrias *single ridge* e *double ridge*, estruturas capazes de suportar modos BICs, servindo como caso de uso para demonstrar o desempenho e a estabilidade do aparato.

Além desse objetivo central, buscou-se também:

- validar o aparato experimental por meio de medições das estruturas *single ridge* e *double ridge*, comparando seu desempenho com os resultados obtidos anteriormente pelo GMETA e com simulações;
- analisar a influência da estabilidade mecânica e das condições de montagem na obtenção de ressonâncias de alto Fator  $Q$ ;
- identificar limitações e dificuldades encontradas durante as medições experimentais;
- propor soluções de projeto e montagem que tornem o aparato experimental mais estável mecanicamente e eficiente para futuras investigações experimentais de ressonâncias de alto Fator  $Q$ .

## 1.2 Organização do trabalho

Este trabalho foi organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 — Introdução:** Apresenta o contexto geral do trabalho, introduz a fotônica como área de estudo, discute a relevância das ressonâncias de alto Fator

$Q$  e a motivação para o desenvolvimento de um aparato experimental estável e de baixo custo para a medição de ressonâncias com alto Fator  $Q$ . Também expõe os objetivos do trabalho e a sua organização.

- **Capítulo 2 — Fundamentação Teórica:** Reúne os conceitos necessários para compreender o funcionamento das cavidades fotônicas e seus mecanismos de confinamento óptico, incluindo a cavidade de Fabry-Pérot como exemplo de cavidade fotônica e a definição de Fator  $Q$ . Apresenta os BICs, sua origem, classificação, aplicações e desafios experimentais. Discute a equivalência entre sistemas fotônicos e experimentos em micro-ondas, bem como os procedimentos experimentais típicos nesse regime, incluindo o uso de parâmetros de espalhamento (Parâmetros  $S$ ) e do Analisador de Rede Vetorial (*Vector Network Analyzer* - VNA). Por fim, descreve a instrumentação e os materiais empregados na construção do aparato, destacando suas propriedades eletromagnéticas.
- **Capítulo 3 — Materiais e Métodos:** Detalha as estruturas *single ridge* e *double ridge* utilizadas para a validação, o projeto e a construção do aparato experimental, incluindo a base, o suporte das estruturas e suas diferentes configurações até a versão final. Descreve o experimento, os procedimentos de coleta de dados e as metodologias de análise, incluindo a extração da amplitude da ressonância e do Fator  $Q$ .
- **Capítulo 4 — Resultados:** Apresenta e analisa os dados experimentais obtidos, comparando as medições das estruturas *single ridge* e *double ridge* com resultados previamente obtidos pelo GMETA e com simulações. Analisa também o impacto das diferentes configurações do aparato experimental na estabilidade e na qualidade das ressonâncias medidas.
- **Capítulo 5 — Conclusão:** Resume as principais contribuições do trabalho, destacando as melhorias alcançadas com o aparato construído, suas limitações e sugestões para aprimoramentos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

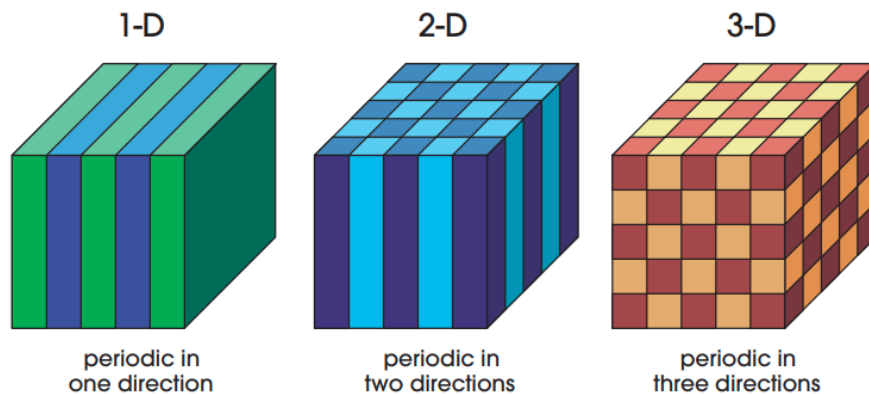
### 2.1 Cavidades Fotônicas

#### 2.1.1 Conceito e princípios de confinamento óptico

As cavidades fotônicas são estruturas que possibilitam uma forte interação entre luz e matéria, sendo úteis em diversas aplicações como lasers semicondutores ultra-pequenos e energeticamente eficientes, fontes de fótons únicos e dispositivos de sensoriamento [16].

O confinamento da luz é realizado por meio de mecanismos de reflexão e da manipulação da banda proibida fotônica (PBG) [16]. Um Cristal Fotônico (PhC) é o análogo óptico de um cristal de estado sólido, consistindo em um padrão dielétrico periódico na escala do comprimento de onda do fóton [16]. A periodicidade dielétrica ao longo de um ou mais eixos caracteriza essas estruturas como cristais fotônicos unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais, conforme o número de direções nas quais essa periodicidade se repete, como é mostrado na Figura 2 [17].

Figura 2 – Exemplos de cristais fotônicos de uma, duas e três dimensões, onde as cores indicam materiais com distintas constantes dielétricas.



Fonte: Joannopoulos, 2008 [17].

Essa periodicidade cria uma estrutura de banda fotônica que, dentro de certas faixas de frequência chamadas bandas proibidas fotônicas, a propagação de fótons é efetivamente bloqueada [16]. Essa inibição ocorre porque a luz é refletida pela periodicidade do índice de refração do material [16].

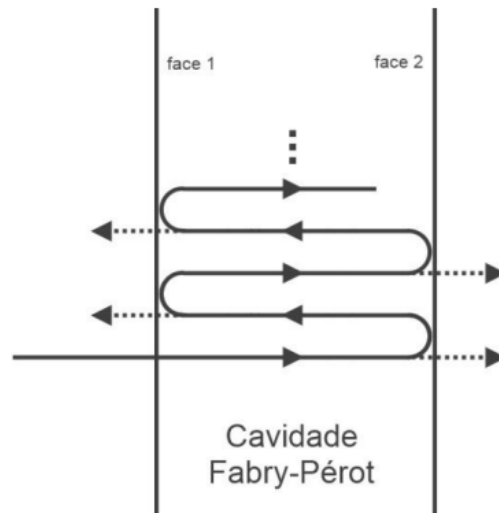
Esta característica de inibição torna o PhC uma plataforma ideal para cavidades ópticas [16]. As cavidades são criadas com a introdução de um defeito na estrutura periódica do PhC [16]. Estes defeitos levam a estados adicionais (modos) dentro da banda proibida

fotônica, onde a luz fica eficientemente aprisionada [16].

#### 2.1.1.1 Cavityde de Fabry-Pérot

Para entender melhor o conceito de cavidade fotônica, é interessante olhar para a cavidade de Fabry-Pérot, que é um dos tipos mais simples e fundamentais de ressonadores ópticos [18, 19]. Definida por uma região de confinamento delimitada por dois espelhos planos paralelos de alta refletividade, essa estrutura ilustra de maneira direta os princípios de confinamento e ressonância da luz também presentes em sistemas fotônicos mais complexas, como é ilustrado na Figura 3 [18].

Figura 3 – Cavityde de Fabry-Pérot.



Fonte: Fávero, 2012 [20].

Dessa forma, ocorre interferência entre vários raios de luz dentro da cavidade e apenas os comprimentos de onda que produzem interferência construtiva permanecem [20]. A Equação 2.1 apresenta esses comprimentos de onda, em que  $n$  é o índice de refração do meio no interior da cavidade,  $d$  corresponde à separação entre os dois espelhos planos e  $m$  é um número inteiro positivo que caracteriza a ordem do modo ressonante [20].

$$\lambda_m = \frac{2nd}{m} \quad (2.1)$$

Dessa forma, a luz é confinada entre os espelhos da cavidade, formando modos ressonantes apenas para determinados comprimentos de onda.

### 2.1.2 Fator de Qualidade (Q)

O Fator de Qualidade ( $Q$ ) é um parâmetro que caracteriza o desempenho dos modos de cavidade [16]. Ele descreve o decaimento da energia na cavidade e quantifica a relação entre a energia armazenada ( $E_{arm}$ ) e a energia dissipada ( $E_{dis}$ ) por ciclo de oscilação, sendo definido pela Equação 2.2 [18].

$$Q = 2\pi \frac{E_{arm}}{E_{dis}} \quad (2.2)$$

O Fator  $Q$  também pode ser expresso como a razão entre a frequência de ressonância ( $\nu_R$ ) e a largura de linha do modo ( $\Delta\nu$ ), como mostra a Equação 2.3 [18]:

$$Q = \frac{\nu_R}{\Delta\nu} \quad (2.3)$$

Além disso, o Fator  $Q$  está intrinsecamente ligado ao tempo de vida do fóton ( $\tau_{cav}$ ) na cavidade pela relação expressa na Equação 2.4 [18].

$$\tau_{cav} = \frac{Q}{2\pi\nu_R} \quad (2.4)$$

Sendo assim, para muitas aplicações, é desejável que a cavidade apresente um Fator de Qualidade ( $Q$ ) elevado, pois isso indica menores perdas de energia e permite que a luz permaneça confinada por mais tempo, intensificando a interação entre a luz e a matéria [21].

## 2.2 Ressonâncias com alto Fator de Qualidade

Ressonâncias com alto Fator de Qualidade ( $Q$ ) permitem o armazenamento prolongado de energia em estruturas fotônicas, resultando em respostas espectrais estreitas e alta sensibilidade a perturbações [22]. Entretanto, alcançar e medir esses altos valores de  $Q$  experimentalmente é desafiador, especialmente no caso dos Estados Confinados no Contínuo (BICs), que teoricamente podem apresentar valores infinitos de  $Q$  [12]. Para serem observados, esses modos exigem medições com grande estabilidade e baixas perdas [23].

### 2.2.1 Estados Confinados no Contínuo (BICs)

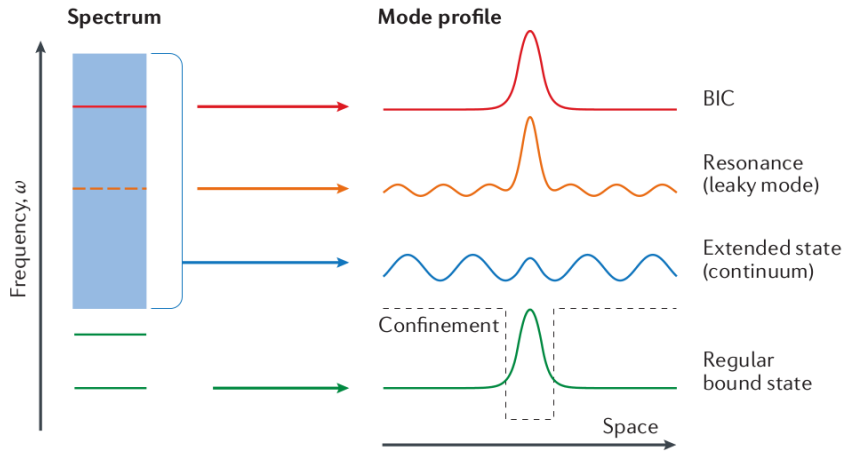
#### 2.2.1.1 Origem e definição

Os Estados Confinados no Contínuo (BICs) são modos ondulatórios que, mesmo coexistindo em frequência com o espectro contínuo de radiação, permanecem confinados

e sem vazamento de energia para o meio externo [12]. Esse comportamento contraria a expectativa usual de que todo modo inserido no contínuo deve se acoplar a ondas radiativas e dissipar energia [12, 24].

A Figura 4 ilustra esquematicamente essa situação, mostrando a coexistência entre estados estendidos do contínuo e estados ligados, destacando o BIC como um modo localizado que, apesar de estar imerso no contínuo espectral, não se acopla aos modos radiativos [12].

Figura 4 – Desenho ilustrativo sobre BIC.



Fonte: Hsu et. al, 2016 [12].

O conceito foi introduzido em 1929 por von Neumann e Wigner, que demonstraram teoricamente que era possível construir um potencial tridimensional oscilatório capaz de suportar um estado localizado dentro do contínuo [24]. Embora seu exemplo original fosse considerado artificial e sem demonstração experimental à época, o fenômeno mostrou-se universal a diversos sistemas ondulatórios, incluindo ondas eletromagnéticas, acústicas e hidrodinâmicas, além de estruturas ópticas como cristais fotônicos e guias de onda [12]. A característica essencial de um BIC é o desaparecimento completo do acoplamento entre a ressonância e os canais de radiação, resultando em largura espectral nula e fator de qualidade teoricamente infinito [13]. No entanto, perdas materiais, imperfeições e tamanho finito das estruturas tornam sua realização prática limitada a quasi-BICs, que apresentam  $Q$  muito elevado, porém finito [14, 25].

Embora a fundamentação teórica dos BICs tenha sido estabelecida por von Neumann e Wigner ainda em 1929 [24], a sua validação experimental demorou para acontecer. A primeira observação direta desses estados em sistemas fotônicos ocorreu apenas em 2011 [26], um marco alcançado graças ao avanço das técnicas de nanofabricação e à precisão no controle de parâmetros geométricos. Desde essa demonstração pioneira, o interesse pela

área cresceu, permitindo a exploração de BICs em diversas aplicações [12, 25].

#### 2.2.1.2 Classificação e mecanismos de formação

Os BICs podem surgir por diferentes mecanismos físicos que impedem o acoplamento entre o modo ressonante e o contínuo de radiação [12]. Em slabs de cristais fotônicos, uma das principais categorias é a dos BICs protegidos por simetria, que ocorrem quando a simetria espacial do modo confinado é incompatível com a simetria das ondas radiantes do meio externo [17]. Nesse caso, o modo não encontra um canal permitido para irradiar, permanecendo ligado mesmo em frequências dentro do contínuo [13].

Outra classificação importante é a dos BICs acidentais ou paramétricos [12]. Estes não dependem exclusivamente de simetria, mas surgem tipicamente pelo mecanismo de Friedrich-Wintgen, onde ocorre um cancelamento interferencial do acoplamento radiativo entre dois modos distintos [12]. Nesses casos, o ajuste fino de parâmetros estruturais ou materiais, como o índice de refração e a espessura, pode levar à anulação completa do vazamento [13].

Muitas vezes, entretanto, busca-se a aplicação prática através de quasi-BICs de alto  $Q$ , obtidos pela quebra intencional de simetria geométrica [25]. Nesse regime, o BIC ideal transforma-se em um estado com vazamento controlado [14].

Uma estratégia eficaz para a obtenção dos estados quasi-BICs é a utilização de metassuperfícies, que consistem em arranjos bidimensionais de nanoestruturas (meta-átomos) projetados para manipular as propriedades da luz em escalas menores que o comprimento de onda [25]. Nessas estruturas, o controle preciso da geometria da célula unitária permite introduzir pequenas assimetrias que acoplam o modo confinado ao contínuo radiativo, viabilizando a excitação externa da ressonância sem degradar severamente seu fator de qualidade [12].

#### 2.2.1.3 Aplicações e relevância dos BICs em fotônica

O interesse crescente em BICs e quasi-BICs em fotônica decorre de sua capacidade de gerar ressonâncias extremamente estreitas sem necessidade de cavidades volumosas ou arquiteturas complexas, permitindo a miniaturização de dispositivos ópticos de alta performance [12, 25].

Em sensoriamento óptico, o estreitamento da largura espectral proporcionado pelos quasi-BICs permite maior resolução na detecção de pequenas variações do índice de refração do meio externo [7, 10]. Em aplicações biomédicas, dispositivos baseados em quasi-BICs têm sido empregados para monitorar processos celulares e detectar analitos com sensibilidade superior à de sensores convencionais [9, 27].

#### 2.2.1.4 Desafios experimentais

Apesar das vantagens teóricas e do potencial tecnológico, a observação experimental de BICs e quasi-BICs apresenta obstáculos significativos. A principal dificuldade reside na extrema sensibilidade desses modos a perturbações estruturais e perdas materiais. Como os BICs dependem de interferências destrutivas precisas ou simetrias espaciais rigorosas, quaisquer imperfeições de fabricação, como rugosidade superficial, assimetrias não intencionais e desordem, quebram a condição de confinamento ideal, degradando drasticamente o fator de qualidade projetado [12, 14].

Além disso, a maioria dos estudos na literatura concentra-se no espectro visível e infravermelho próximo [6, 7]. Para operar nessas frequências, as estruturas fotônicas devem possuir dimensões características na ordem de centenas de nanômetros [17]. A produção de amostras com essa resolução exige ambientes controlados de sala limpa (*cleanroom*) e o uso de técnicas avançadas de nanofabricação, como a litografia por feixe de elétrons (EBL) e a corrosão assistida por plasma (ICP-RIE) [21, 28, 29].

Esses requisitos impõem uma barreira financeira proibitiva para muitos grupos de pesquisa [29]. Equipamentos de litografia de ponta (como sistemas EBL dedicados) exigem investimentos que frequentemente variam entre US\$ 2 milhões e US\$ 5 milhões, além de demandarem contratos de manutenção anual estimados em 10% a 15% desse valor inicial [28]. Mesmo em regime de instalações multiusuário, o custo operacional para acesso a esses equipamentos pode oscilar entre US\$ 50 e US\$ 300 por hora, tornando a iteração de protótipos e a validação experimental de múltiplas amostras financeiramente insustentável para projetos com orçamento limitado [8, 29].

## 2.3 Experimentos em Micro-Ondas

### 2.3.1 Relação entre experimentos fotônicos e experimentos em micro-ondas

As Equações de Maxwell permanecem válidas em diferentes regimes de escala [30]. Assim, efeitos que ocorrem na faixa óptica também podem ser observados em micro-ondas, desde que a estrutura seja dimensionada proporcionalmente ao comprimento de onda de cada faixa [31].

Nesse contexto, metamateriais são estruturas artificiais compostas por unidades fundamentais, ou células unitárias, que possuem dimensões na chamada escala do subcomprimento de onda [31]. Em experimentos na faixa de micro-ondas, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é da ordem de centímetros [32]. Isso permite que as células unitárias sejam projetadas em dimensões milimétricas, mantendo-as pequenas em relação a  $\lambda$  (frequentemente  $\lambda/10$  ou menos) [33]. Sob essa condição, do ponto de vista eletromagnético, o meio altamente

não homogêneo é visto como homogêneo [31]. A resposta macroscópica é, então, descrita por parâmetros efetivos, como a permissividade efetiva ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ) e a permeabilidade efetiva ( $\mu_{\text{eff}}$ ) [31].

Analogamente, esse raciocínio se estende para a fotônica [30]. Para operar em frequências ópticas (visível ou infravermelho), as células unitárias, por vezes chamadas de "meta-átomos", precisam ser fabricadas em escala nanométrica, exigindo o uso de técnicas avançadas de nanofabricação [31]. Estruturas como nanofios de silício ou metais podem compor esses meta-átomos [31]. Desde que as dimensões e espaçamentos permaneçam muito menores que o comprimento de onda óptico incidente, o meio é tratado como homogêneo, e as Equações Macroscópicas de Maxwell continuam válidas, agora com propriedades efetivas controladas pelo design nanométrico [31].

A equivalência entre os regimes de micro-ondas e óptico é um reflexo direto da invariância de escala das equações de Maxwell [30]. Essa característica garante que as mesmas leis físicas descrevam o comportamento eletromagnético em diferentes faixas de frequência, variando apenas as dimensões das estruturas envolvidas [30,31]. Historicamente, embora as primeiras investigações tenham se concentrado na óptica, a região de micro-ondas foi amplamente explorada em experimentos por oferecer maior facilidade de fabricação e de controle das condições de medição [34]. Além disso, quando a dimensão da célula unitária ( $d$ ) é muito menor que o comprimento de onda (tipicamente  $d < \lambda/10$ ), o meio pode ser tratado como efetivamente contínuo, permitindo a descrição macroscópica por parâmetros médios de permissividade e permeabilidade [31,35].

Por essa razão, ao aplicar as Equações de Maxwell a materiais estruturados em escalas de subcomprimento de onda, tanto nanométricas no regime óptico quanto milimétricas no regime de micro-ondas, o conceito de meio efetivo permite descrever com precisão a propagação da energia eletromagnética [34].

### 2.3.2 Procedimentos experimentais em micro-ondas

Os experimentos realizados na faixa de micro-ondas, que abrange aproximadamente de 300 MHz a 300 GHz [32,35], costumam empregar a técnica de transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas para caracterizar materiais ou dispositivos [36]. Quando o objetivo é estudar o comportamento das ondas propagando-se no ar, adota-se a configuração em espaço livre [32]. Nesse tipo de experimento, as ondas são irradiadas e recebidas por antenas [32,37] e o ambiente deve ser cuidadosamente preparado para evitar reflexões e interferências que possam distorcer os resultados [38,39].

Por esse motivo, as câmaras anecoicas são amplamente utilizadas em medições de micro-ondas [39]. Essas câmaras são revestidas internamente com espumas absorventes [38,40] que impedem que as ondas reflitam nas paredes, simulando um ambiente de espaço

livre ideal [38,41]. Com isso, é possível medir parâmetros como o ganho, a impedância e o coeficiente de reflexão [33,41]. A Figura 5 mostra um laboratório revestido com espuma anecoica para medições em radiofrequência.

Figura 5 – Laboratório revestido com espuma anecoica para medições em radiofrequência.



Fonte: Hortus Technologies, 2023 [42].

Entretanto, as câmaras anecoicas possuem custo elevado, tanto pela complexidade de instalação quanto pelo material de absorção utilizado [38]. Uma câmara típica para a faixa de 14 kHz a 40 GHz pode custar em torno de US\$ 10 mil, e as espumas absorventes piramidais (material tradicional para câmaras anecoicas), cerca de US\$ 50 mil por metro quadrado [40].

Como o custo total depende do tamanho do objeto a ser testado, experimentos com estruturas maiores podem se tornar economicamente inviáveis [38].

Por outro lado, experimentos realizados sem o uso de câmaras ou espumas anecoicas são significativamente mais difíceis [36]. A ausência de um ambiente controlado faz com que as ondas eletromagnéticas reflitam em superfícies próximas, como paredes, mesas e equipamentos, gerando interferências que podem comprometer a precisão das medições [38,41] [36].

### 2.3.3 Parâmetros de espalhamento (Parâmetros S)

Os Parâmetros de Espalhamento, ou Parâmetros S, frequentemente representados pela matriz  $[S]$ , constituem um conjunto de coeficientes utilizados para descrever a resposta de materiais ou sistemas eletromagnéticos, especialmente em frequências de



micro-ondas [36].

A matriz dos S-parâmetros relaciona as ondas incidentes e refletidas em um sistema de duas portas (Equação 2.5).

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Na matriz apresentada (Equação 2.5),  $S_{11}$  e  $S_{22}$  representam os coeficientes de reflexão nas portas 1 e 2, respectivamente, enquanto  $S_{21}$  e  $S_{12}$  correspondem aos coeficientes de transmissão no sentido direto e inverso [36].

Os Parâmetros S básicos consistem, portanto, nos coeficientes de reflexão e de transmissão da estrutura analisada [36]. Os dois parâmetros mais comuns são o  $S_{11}$  e o  $S_{21}$  [36]. O parâmetro  $S_{11}$ , denominado coeficiente de reflexão, está relacionado à fração da onda incidente que é refletida pela estrutura [36]. Esse parâmetro é frequentemente analisado para otimizar o desempenho de antenas e reduzir perdas por reflexão [33]. Já o parâmetro  $S_{21}$ , conhecido como coeficiente de transmissão, está associado à porção da onda que é transmitida através da estrutura [36]. O parâmetro  $S_{12}$ , em alguns casos, também é listado como coeficiente de transmissão, representando a propagação no sentido inverso [33].

A medição dos Parâmetros S é realizada com o auxílio de um Analisador de Rede vetorial (VNA, *Vector Network Analyzer*) [36]. Durante o processo experimental, o VNA gera o sinal incidente sobre o material testado, e os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  são detectados e exibidos no monitor do equipamento, permitindo a visualização tanto do módulo quanto da fase dos sinais medidos [33, 36].

A extração dos Parâmetros S constitui a base para a determinação dos parâmetros constitutivos efetivos do material, como a permissividade e a permeabilidade efetivas [33].

## 2.4 Instrumentação e Materiais Utilizados

### 2.4.1 Instrumentação experimental

#### 2.4.1.1 *Vector Network Analyzer* (VNA)

O *Vector Network Analyzer* (VNA), ou Analisador de Rede Vetorial, é um instrumento essencial na caracterização de dispositivos e materiais em regimes de radiofrequência (RF) e micro-ondas, abrangendo faixas que vão de alguns kHz até a região de terahertz (THz) [37, 43]. Trata-se de um equipamento fundamental para a análise de propriedades

elétricas e eletromagnéticas de componentes, especialmente na determinação da permissividade elétrica  $\epsilon$  e da permeabilidade magnética  $\mu$  de materiais [37].

O VNA realiza medições de transmissão, reflexão e impedância, sendo o instrumento padrão para a obtenção dos Parâmetros S, tais como  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  e  $S_{22}$  [43].

O princípio de operação baseia-se na geração de um sinal de estímulo calibrado e na medição vetorial da resposta resultante [43]. Diferentemente de Analisadores Escalares (SNA), que medem apenas a magnitude, o VNA é capaz de medir também a fase do sinal refletido e transmitido, permitindo uma caracterização completa do sistema em função da frequência [43].

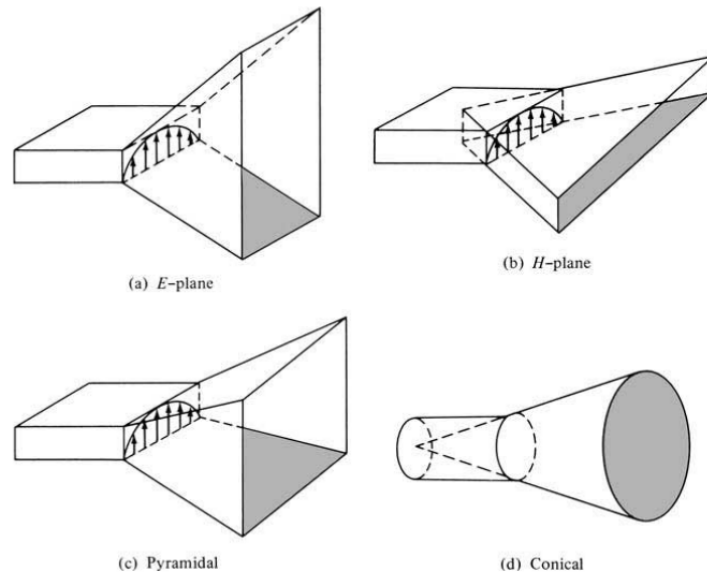
A partir dos Parâmetros S complexos, é possível determinar diversas grandezas de interesse, como impedância, perdas por retorno, perdas por inserção e coeficiente de reflexão [43].

#### 2.4.1.2 Antenas

Uma antena é um dispositivo metálico que irradia ou recebe ondas eletromagnéticas e atua como elemento de transição entre uma linha de transmissão e o espaço livre [44]. Dependendo do sentido de propagação da energia, pode operar como transmissora ou receptora e tem papel fundamental no desenvolvimento das comunicações modernas [44].

Existem diferentes tipos de antenas que podem ser utilizadas em diversas aplicações. A antena corneta é uma antena de abertura amplamente utilizada em micro-ondas e pode ser encontrada em diversas configurações geométricas, incluindo a corneta setorial de *E-plane*, a corneta setorial de *H-plane*, e as cornetas piramidal e cônica [44]. Esses tipos de antenas corneta são mostrados na Figura 6

Figura 6 – Configurações típicas de antenas corneta.



Fonte: Balanis, 2005 [44].

Neste trabalho, a antena corneta foi utilizada para a realização das medições experimentais.

## 2.4.2 Propriedades eletromagnéticas dos materiais de construção do aparato experimental

### 2.4.2.1 Isopor

O isopor (Espuma de Poliestireno Expandido - EPS) é um material utilizado em aplicações que exigem transparência às micro-ondas devido às suas propriedades dielétricas de baixa perda [45].

Do ponto de vista eletromagnético, essa transparência decorre de duas propriedades principais: a baixa tangente de perda ( $\tan \delta$ ) e a baixa constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ). A primeira está relacionada à quantidade de energia eletromagnética dissipada na forma de calor durante a propagação da onda [46]. Materiais de baixa perda são aqueles que minimizam a absorção de energia quando submetidos a campos elétricos alternados [45]. O poliestireno, base do EPS, apresenta uma baixa extinção, ou seja, converte uma fração muito pequena da energia das micro-ondas em calor [47].

A segunda propriedade relevante é a baixa constante dielétrica do EPS, que é muito próxima à do ar, evitando reflexões significativas e reduzindo o descasamento entre a onda incidente e o material. O EPS é um material dielétrico não condutor, ou seja, ele interage com campos elétricos sem permitir o fluxo de corrente elétrica [46,48]. A constante dielétrica mede a capacidade de um material concentrar linhas de campo elétrico [45]. Para

espumas de poliestireno sopradas a ar, com densidade em torno de  $26 \text{ kg/m}^3$ , os valores típicos de  $\varepsilon_r$  situam-se entre 1.03 e 1.04 (praticamente o mesmo valor de  $\varepsilon_r$  do ar) [46]. Consequentemente, o índice de refração também é muito baixo, variando de 1.017 a 1.022 na faixa de terahertz [47]. Essa proximidade com o ar implica que a velocidade de fase da onda eletromagnética no EPS (Equação 2.6) seja quase igual à velocidade da luz no vácuo, o que garante uma distorção de fase mínima. Ademais, a pequena diferença de impedância intrínseca ( $\eta$ ) entre o ar e o EPS minimiza as reflexões nas interfaces entre os dois meios, favorecendo uma transmissão de onda altamente eficiente [46].

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.6)$$

Logo, o isopor é um material que pode ser considerado transparente para as ondas emitidas na faixa de micro-ondas.

#### 2.4.2.2 Papel alumínio

O papel alumínio apresenta comportamento oposto ao do isopor quanto à interação com micro-ondas, atuando como um bloqueador quase total da radiação eletromagnética nessa faixa de frequência, pois funciona como uma Gaiola de Faraday [49].

O alumínio é um material altamente condutor e essa propriedade permite a formação de uma blindagem eletromagnética extremamente eficaz contra campos de alta frequência, como as micro-ondas [49, 50]. O princípio de funcionamento da Gaiola de Faraday baseia-se na redistribuição de cargas elétricas: quando um campo elétrico externo incide sobre o condutor, as cargas livres (elétrons) movem-se e se redistribuem ao longo da superfície do material [49]. Essa redistribuição induz a formação de um campo elétrico oposto, que cancela o campo aplicado dentro do material, impedindo a penetração da radiação [49].

Como o alumínio possui uma condutividade elétrica elevada  $3,767 \times 10^7 \text{ S/m}$ , essa redistribuição de cargas ocorre de forma quase instantânea, garantindo que o campo resultante dentro da folha metálica seja praticamente nulo [50].

As micro-ondas, por sua vez, são radiações eletromagnéticas de alta frequência, o que torna a blindagem condutora ainda mais eficiente. Em condutores submetidos a campos variáveis, quanto maior a frequência, menor a penetração do campo eletromagnético, devido ao fenômeno conhecido como *skin effect* [50]. Nesse regime, a corrente induzida se concentra na superfície do material e decai exponencialmente com a profundidade, fenômeno descrito pela *skin depth* [50]. Por esse motivo, o alumínio é usado em aplicações de blindagem eletromagnética [50].

Portanto, o papel alumínio bloqueia a passagem de micro-ondas porque sua alta condutividade permite o rápido movimento de elétrons na superfície, gerando um campo

elétrico oposto que reflete e anula o campo incidente.

### 2.4.3 Estruturas estudadas

Para a validação do aparato experimental construído, foram realizadas medidas espectrais com dois tipos de geometrias de estruturas: *single ridge* e *double ridge*.

A geometria *single ridge* serve como referência por suportar ressonâncias de modo guiado convencionais (GMR), além de permitir a excitação de modos quasi-BIC. Nessas estruturas, o confinamento do campo eletromagnético ocorre majoritariamente no interior do material dielétrico, tornando o fator de qualidade ( $Q$ ) intrinsecamente limitado pelas perdas por absorção do material [25].

A geometria *double ridge* viabiliza a excitação de modos guiados no ar (AGMR), nos quais a energia do campo elétrico se concentra predominantemente na lacuna entre as cristas [25]. Essa característica permite o controle dos componentes de Fourier da permissividade efetiva por meio do ajuste da largura do espaçamento, possibilitando que o fator de qualidade ( $Q$ ) seja teoricamente controlado até valores arbitrariamente elevados, de forma desacoplada das perdas materiais [25]. Como consequência, essa geometria apresenta fatores de qualidade significativamente mais altos do que aqueles obtidos na geometria *single ridge*, mesmo quando esta última excita modos quasi-BIC, evidenciando o potencial da configuração *double ridge* para a obtenção de ressonâncias de altíssimo  $Q$ .

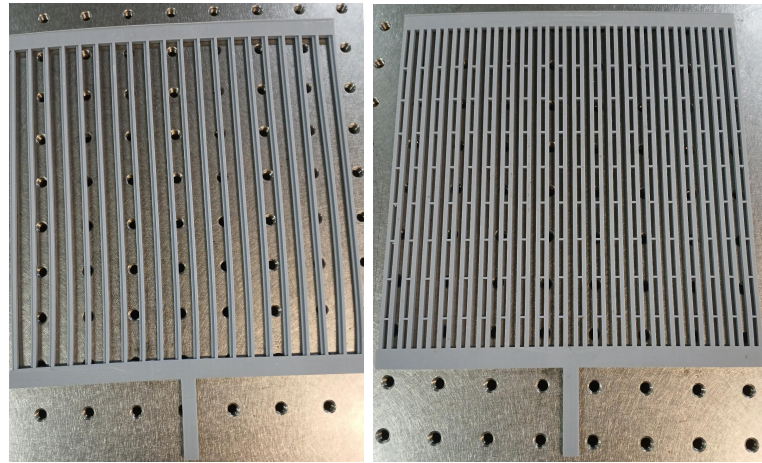


### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Estruturas estudadas

Foram estudados dois tipos de estruturas periódicas fabricadas em resina fotocurável por impressão 3D, produzidas por Guilherme Simoneti de Arruda durante seu doutorado no grupo GMETA. A resina utilizada apresenta permissividade elétrica complexa  $\varepsilon_r = 2.66 - i0.08$  [25]. As estruturas foram construídas considerando duas geometrias distintas (Figura 7): *single ridge* e *double ridge*, sendo esta última selecionada por apresentar ressonâncias com fatores de qualidade significativamente mais elevados, mesmo na ausência da excitação de modos quasi-BIC, quando comparada à geometria *single ridge*.

Figura 7 – Geometrias das estruturas estudadas.

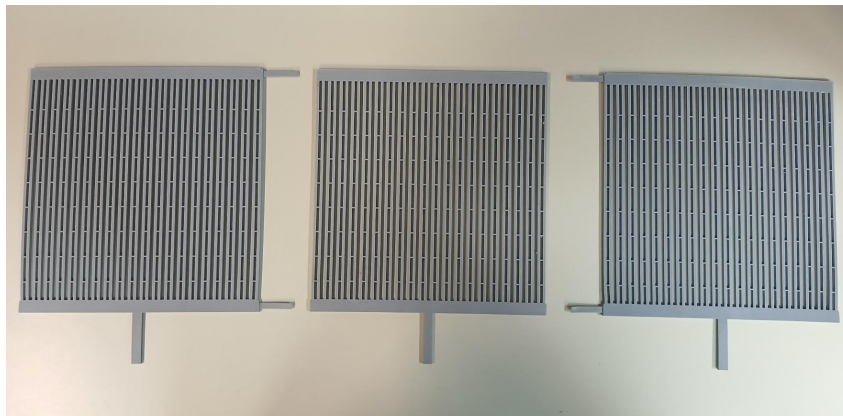


(a) Geometria *single ridge*. (b) Geometria *double ridge*.

Fonte: Autoria própria, 2025.

As estruturas foram projetadas de forma modular, possibilitando o encaixe de extensões para aumentar o número de períodos e, conseqüentemente, o comprimento total das estruturas (Figura 8).

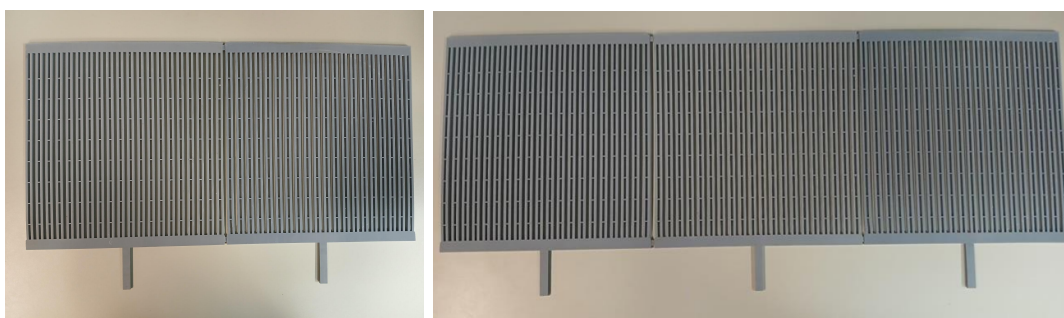
Figura 8 – Placas com extensões encaixáveis para variação do comprimento total das estruturas.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Cada módulo contém 20 períodos e, por isso, as configurações com uma, duas ou três placas correspondem a 20, 40 e 60 períodos, respectivamente (Figura 9).

Figura 9 – Módulos conectados para a variação do comprimento total da estrutura.



(a) Duas placas conectadas.

(b) Três placas conectadas.

Fonte: Autoria própria, 2025.

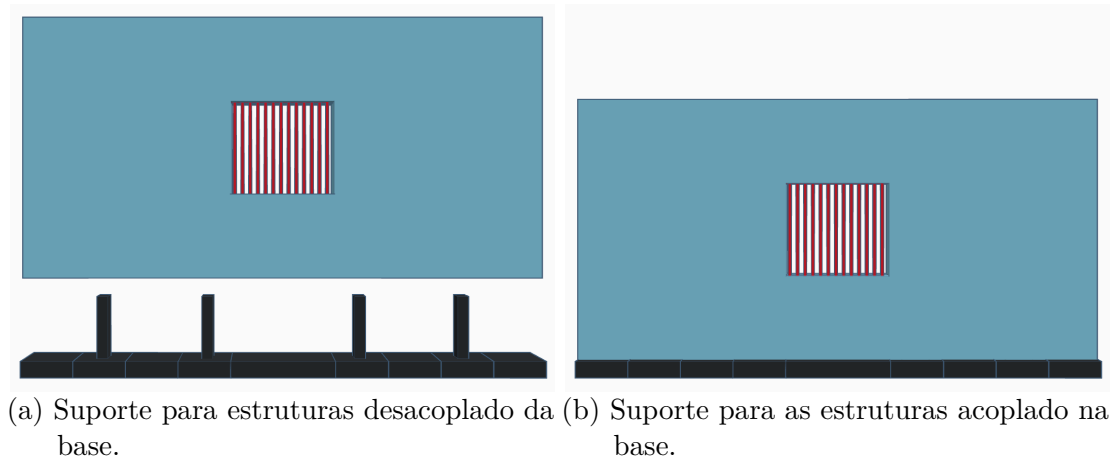
Essa modularidade permitiu comparar as respostas espectrais desses dois tipos de estrutura com diferentes extensões, mantendo inalterados os parâmetros geométricos da célula unitária.

### 3.2 Aparato Experimental

Para a construção do aparato experimental, foi planejada uma base única, com a possibilidade de troca dos suportes para amostras. Os suportes foram projetados especificamente para cada tamanho de amostra estudada (uma, duas e três placas). A ideia geral do aparato experimental é apresentada na Figura 10.



Figura 10 – Ideia geral do aparato experimental.



Fonte: Autoria própria, 2025.

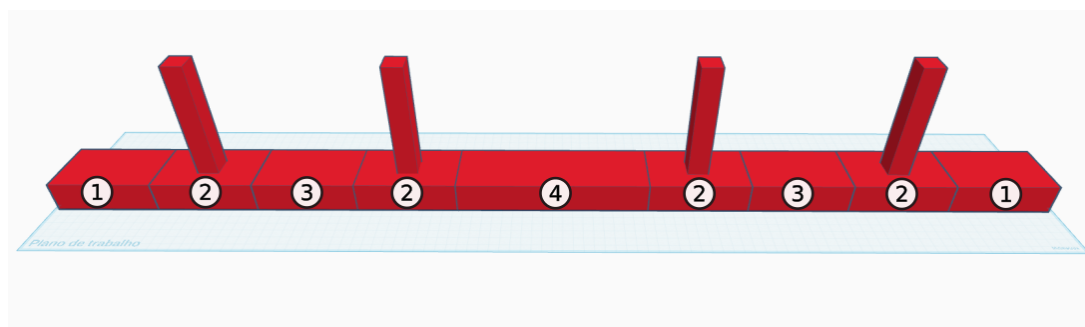
### 3.2.1 Base

A base foi desenvolvida a partir de um projeto 3D que permitiu o encaixe modular dos suportes destinados para as estruturas. O projeto da base buscou garantir estabilidade para a sustentação do suporte com as estruturas durante as medidas e flexibilidade, de modo que a mesma base pudesse ser utilizada em diferentes configurações experimentais apenas com a substituição dos suportes.

Devido à limitação espacial da impressora 3D utilizada, a base foi subdividida em nove peças que se encaixam entre si, formando uma espécie de quebra-cabeça que compõe a estrutura completa.

As nove peças foram organizadas em quatro grupos distintos (Figura 11): duas peças das extremidades, quatro peças intermediárias com postes, duas peças intermediárias sem postes e uma peça central.

Figura 11 – Projeto da base com todas as peças encaixadas. Legenda: (1) peças das extremidades; (2) peças intermediárias com postes; (3) peças intermediárias sem postes; (4) peça central.

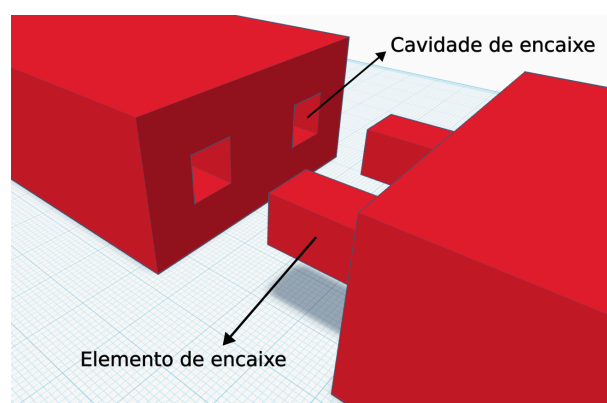


Fonte: Autoria própria, 2025.

Para viabilizar essa configuração modular, as peças foram projetadas no software *Tinkercad* e impressas em filamento de PLA (*Polylactic Acid*), material escolhido por sua boa estabilidade dimensional, rigidez e facilidade de fabricação.

Uma peça foi conectada à outra por meio de elementos de encaixe e cavidades correspondentes (Figura 12), projetados para permitir o acoplamento entre as partes. Cada elemento de encaixe possui formato paralelepípedico com dimensões de  $9,6 \times 9,6 \times 19,6$  mm, enquanto as cavidades correspondentes foram impressas com  $10 \times 10 \times 20$  mm. Essa diferença dimensional foi definida como uma tolerância de fabricação, necessária para compensar as pequenas imprecisões do processo de impressão 3D e garantir o encaixe adequado entre as peças após a fabricação.

Figura 12 – Exemplo de cavidades e de elementos de encaixe.



Fonte: Autoria própria, 2025.

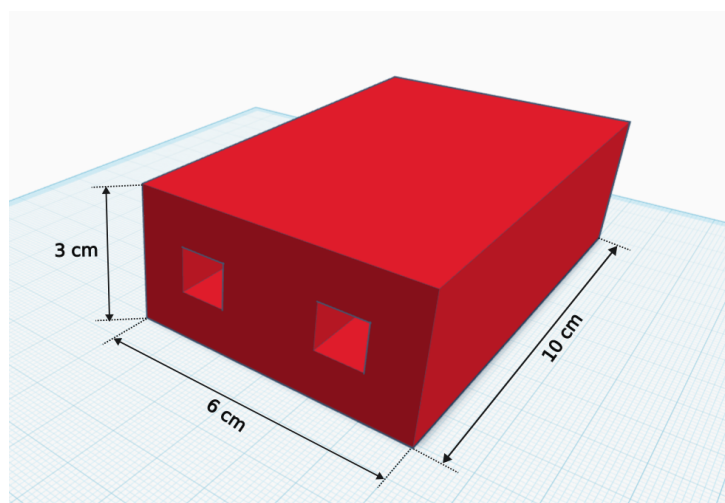
A base conta também com quatro postes distribuídos ao longo de sua extensão para o encaixe do suporte para as estruturas na base, como é possível observar na Figura 11. Os

postes possuem dimensões de  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ , onde 12 cm de altura correspondem à porção que se projeta acima da superfície da base e é encaixada diretamente no suporte de isopor. Essas dimensões foram definidas de modo a garantir que os postes sustentassem e estabilizassem o suporte com a estrutura periódica durante a realização do experimento, assegurando que suportassem o peso do conjunto sem risco de deformação ou ruptura da base.

#### 3.2.1.1 Peças das extremidades

As peças das extremidades da base foram projetadas com formato paralelepípedo e dimensões de 10 cm de comprimento, 6 cm de largura e 3 cm de altura. Cada uma delas contém duas cavidades em uma das faces, permitindo o acoplamento dos elementos de encaixe das peças intermediárias com postes, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Projeto para a peça da extremidade.

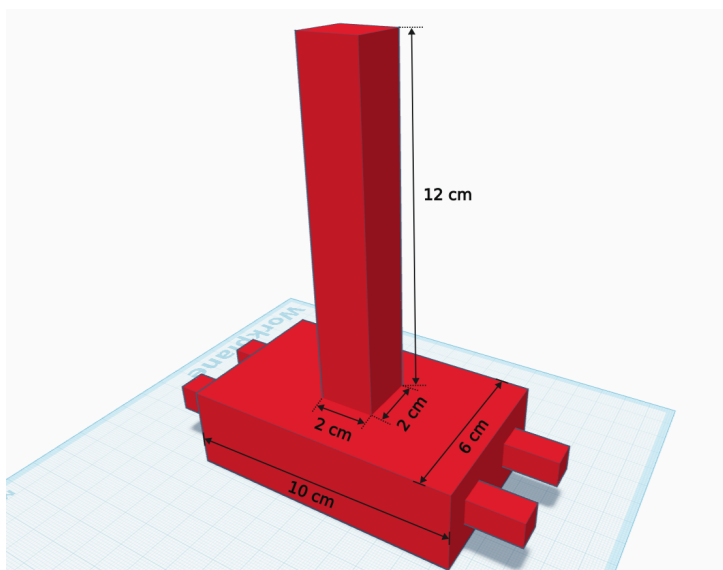


Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 3.2.1.2 Peças intermediárias com postes

As peças intermediárias com postes possuem dimensões de 10 cm de comprimento, 6 cm de largura e 3 cm de altura. Cada uma delas foi projetada com um poste de sustentação e quatro elementos de encaixe distribuídos em duas de suas faces, permitindo o acoplamento tanto com as peças das extremidades quanto com as peças intermediárias sem postes.

Figura 14 – Projeto para a peça intermediária com poste.

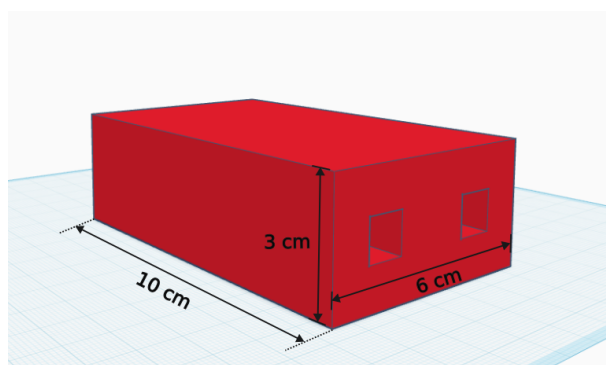


Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 3.2.1.3 Peças intermediárias sem postes

As peças intermediárias sem postes também medem 10 cm de comprimento, 6 cm de largura e 3 cm de altura. Cada uma delas contém quatro cavidades de acoplamento, permitindo a conexão com as peças intermediárias com postes em duas de suas faces (Figura 15).

Figura 15 – Projeto para a peça intermediária sem poste.

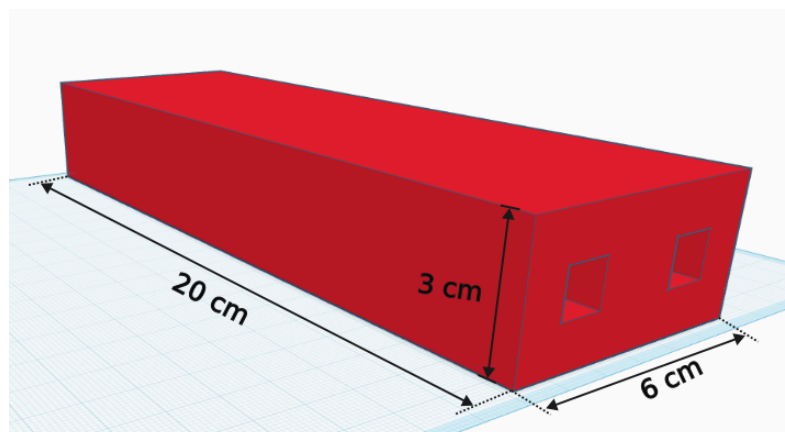


Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 3.2.1.4 Peça central

A peça central (Figura 16) possui dimensões de 20 cm  $\times$  6 cm  $\times$  3 cm e foi projetada com cavidades de acoplamento em duas de suas faces, permitindo sua conexão com duas peças intermediárias com postes.

Figura 16 – Projeto para a peça central.



Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 3.2.1.5 Configuração final da base

As nove peças foram organizadas na seguinte sequência de montagem: peça de extremidade + peça intermediária com poste + peça intermediária sem poste + peça intermediária com poste + peça central, seguida do espelhamento dessa mesma sequência, com exceção da peça central, no lado oposto. Essa disposição simétrica foi pensada para garantir a sustentação adequada e a estabilidade do suporte com as amostras durante a realização dos experimentos.

O comprimento total da base, somando todas as nove peças, é de 1 m. Essa dimensão foi escolhida por corresponder ao tamanho comercial das placas de isopor utilizadas. A configuração final da base com todas encaixadas pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 – Configuração final da base.



Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.2.2 Suporte para as estruturas periódicas

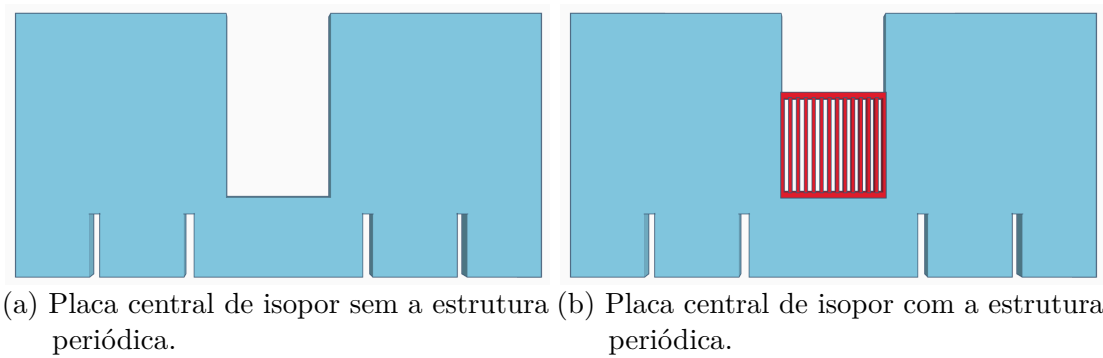
O suporte para as estruturas periódicas foi pensado para ser em formato de “sanduíche”, composto por placas de isopor. As placas externas atuaram como elementos de bloqueio, garantindo a fixação do conjunto na base, enquanto as placas internas funcionaram como elemento de encaixe entre o suporte e a base. Ao longo deste trabalho, foram desenvolvidas três configurações distintas, que evoluíram de acordo com os resultados obtidos nos experimentos realizados com cada uma delas, com o intuito de melhorar a qualidade das medições.

#### 3.2.2.1 Primeira Configuração

Na primeira configuração, foram utilizadas três placas de isopor de 2 cm de espessura e dimensões de 50 cm  $\times$  1 m para compor o suporte para as estruturas.

A placa central foi cortada de modo a permitir a inserção e remoção das estruturas pela parte superior, funcionando como uma espécie de gaveta, além de comportar as bordas das estruturas e conter os recortes correspondentes aos encaixes dos postes da base, garantindo o correto alinhamento das estruturas (Figura 18).

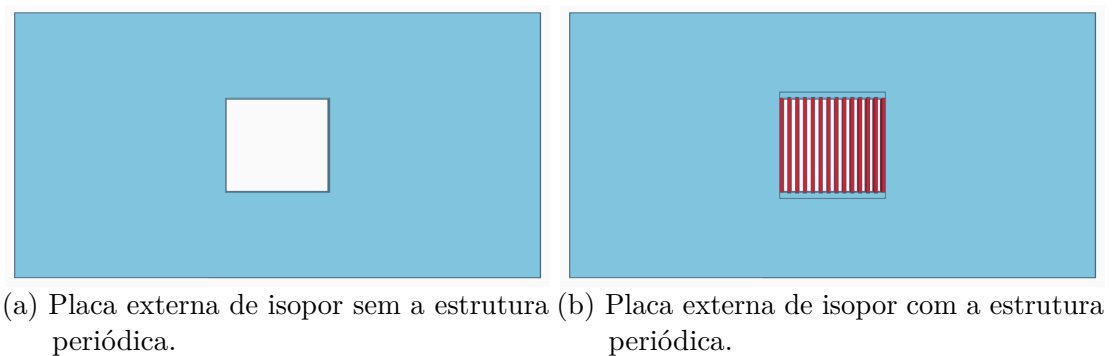
Figura 18 – Desenho esquemático da região recortada na placa central de isopor.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Nas placas externas, foi cortada apenas uma janela central para permitir a exposição das estruturas, ocultando suas bordas (Figura 19).

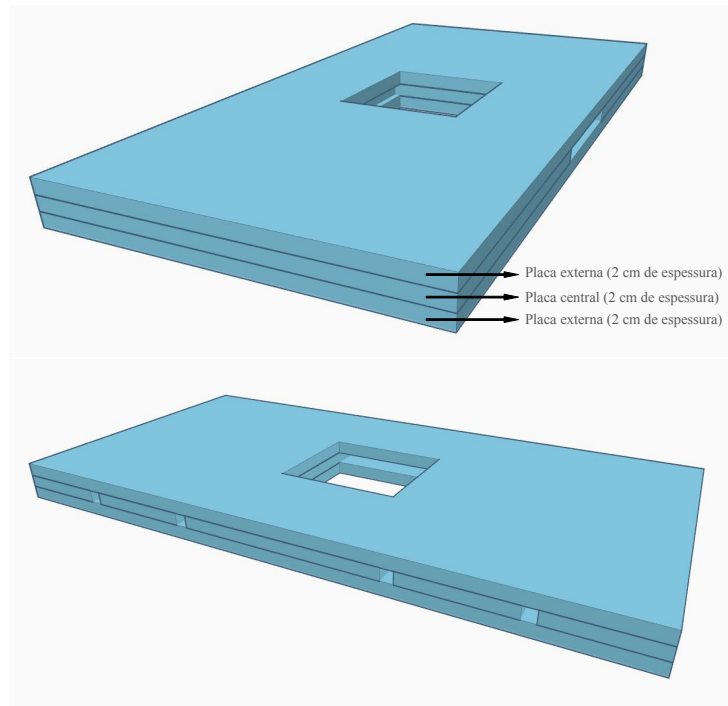
Figura 19 – Desenho esquemático da região recortada nas placas externas de isopor.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após o corte, as três placas foram coladas com cola de isopor (Figura 20).

Figura 20 – Organização das placas para a primeira configuração do suporte para as estruturas.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Por fim, uma das faces externas foi revestida com papel alumínio fixado com cola branca, a fim de bloquear a passagem das ondas e garantir que sua incidência ocorresse apenas sobre as estruturas antes de chegar na antena receptora.

Figura 21 – Primeira configuração do suporte para as estruturas (uma placa).



Fonte: Autoria própria, 2025.



Esse processo foi repetido para a construção dos suportes correspondentes às estruturas compostas por uma, duas e três placas. Entretanto, devido à espessura de 2 cm das placas (Figura 22a), observou-se uma leve inclinação angular das estruturas durante as medições, indicada pelo ângulo  $\alpha$  na Figura 22b, o que comprometeu os resultados das medições e motivou o desenvolvimento de uma nova configuração.

Figura 22 – Inclinação das estruturas devido à espessura de 2 cm das placas.



(a) Espaço de 2 cm destinado ao (b) Inclinação observada nas estruturas durante a medição.  
apoio das placas.

Fonte: Autoria própria, 2025.

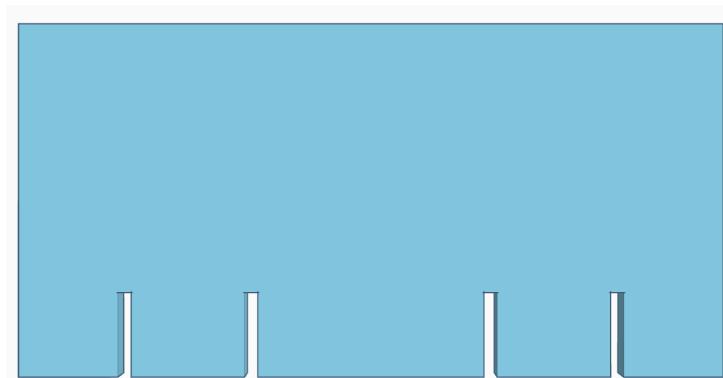
### 3.2.2.2 Segunda Configuração

Com o objetivo de corrigir a inclinação observada na primeira configuração e manter as estruturas mais alinhadas, foi projetada uma nova estrutura utilizando placas de isopor de diferentes espessuras. Optou-se por manter a largura da região destinada para o encaixe dos postes de 2 cm para garantir a compatibilidade com a base existente — evitando custos adicionais de reimpressão e preservando a estabilidade proporcionada pelos postes de 2 cm  $\times$  2 cm.

A placa central, de 0,5 cm de espessura, foi cortada com uma janela capaz de comportar as bordas da amostra e com uma abertura superior para permitir sua inserção e remoção. Também foram feitos recortes para o encaixe dos postes da base. Esses cortes foram realizados de maneira análoga ao que foi apresentado na Figura 18.

Em seguida, foi adicionada uma placa intermediária de 1,5 cm de espessura, totalizando os 2 cm necessários para o encaixe adequado dos postes. Nessa placa, foram realizados cortes correspondentes aos postes da base (Figura 23).

Figura 23 – Desenho esquemático da região recortada na placa intermediária de isopor sem o recorte para a exposição da estrutura.

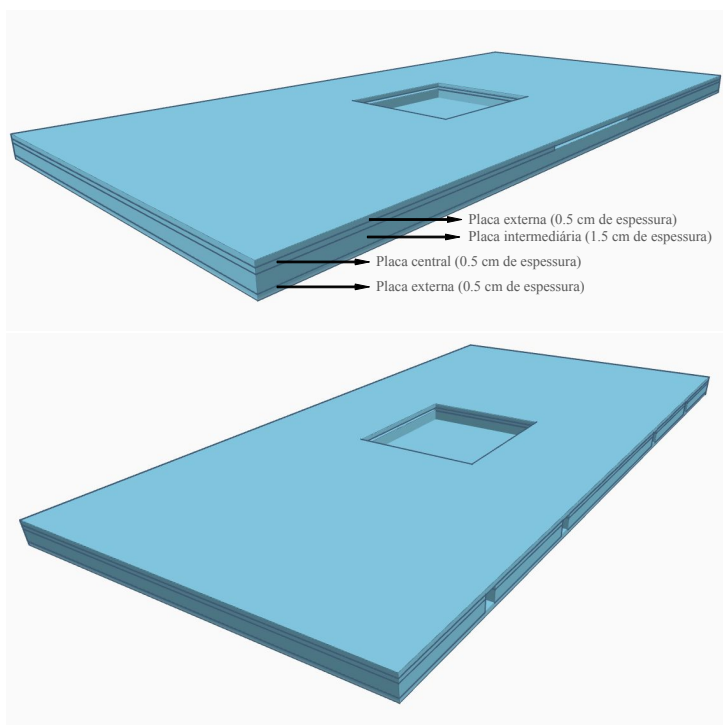


Fonte: Autoria própria, 2025.

Depois, uma placa externa de 0,5 cm de espessura foi cortada apenas com uma janela central, permitindo a exposição da estrutura (Figura 19).

Então, as três placas mencionadas e uma placa sem cortes de 0,5 cm de espessura foram coladas com cola de isopor (Figura 24).

Figura 24 – Organização das placas para a segunda configuração do suporte para as estruturas.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Por fim, uma das faces externas foi revestida com papel alumínio fixado com cola branca.

Figura 25 – Segunda configuração do suporte para as estruturas (duas placas).



Fonte: Autoria própria, 2025.

Durante o processo de colagem, ocorreu um erro: foi aplicada cola por engano na região destinada à passagem de sinal e, além disso, a secagem completa não havia sido atingida no momento da medição, o que resultou em interferências nos resultados experimentais. Outro problema identificado foi a ausência de uma janela posterior à estrutura, que dificultou a substituição das geometrias e provocou fácil desalinhamentos do suporte experimental entre a coleta do sinal de referência e a coleta do sinal com a estrutura, comprometendo a qualidade das medições.

Por esse motivo, só foi contruída a variação para apoiar duas placas e o desenvolvimento da configuração seguinte para o suporte foi iniciada.

### 3.2.2.3 Configuração Final

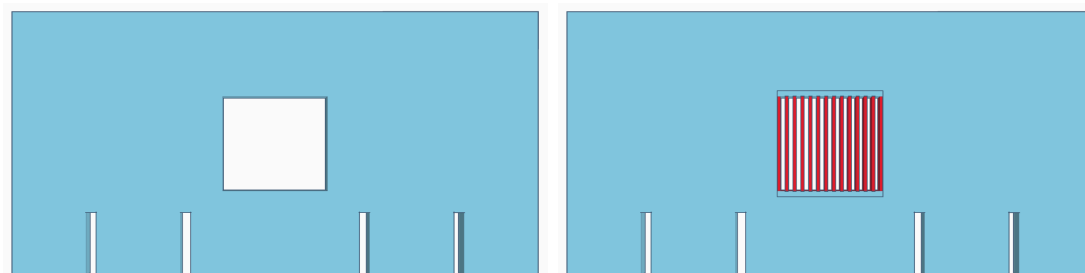
Com base nas observações anteriores, a configuração final foi projetada para garantir maior estabilidade e facilidade de troca das geometrias.

Para isso, manteve-se o conceito de espessura para o encaixe dos postes de 2 cm para a compatibilidade com a base, mas as espessuras das placas foram ajustadas. A placa central, de 0,5 cm, foi cortada de modo a formar uma janela para expor a estrutura às ondas incidentes e com aberturas para os postes da base, além do corte da abertura superior para permitir a inserção e a remoção da estrutura (Figura 18).

Duas placas intermediárias de 0,75 cm foram cortadas com janelas centrais e aberturas para o encaixe dos postes, de modo a reduzir o vão interno e evitar que as bordas das estruturas ficassem expostas, aumentando a estabilidade das estruturas durante as

medições (Figura 26). Diferentemente da segunda configuração, nesta versão as janelas foram vazadas em ambos os lados do suporte, permitindo a passagem das ondas e facilitando a troca das estruturas.

Figura 26 – Desenho esquemático da região recortada na placa intermediária de isopor com o recorte para a exposição da estrutura periódica.



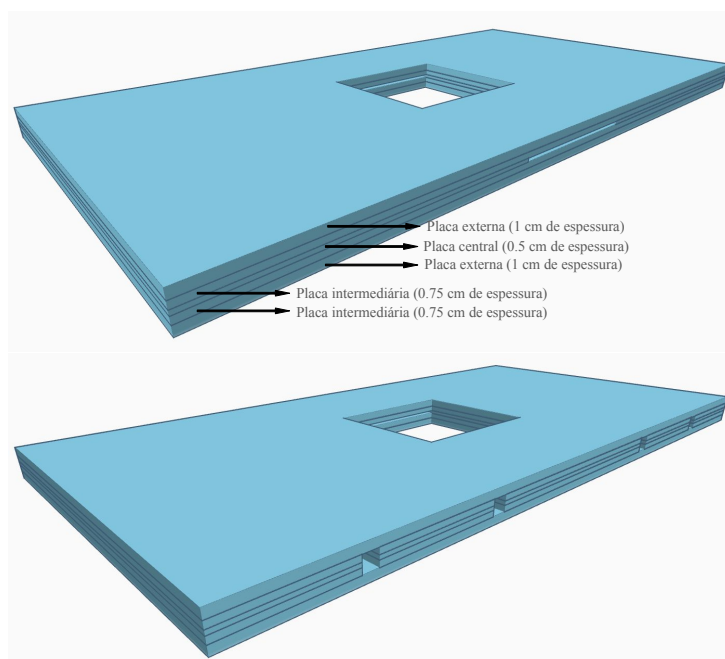
(a) Placa intermediária de isopor com o recorte para a exposição da estrutura sem a estrutura. (b) Placa intermediária de isopor com o recorte para a exposição da estrutura com a estrutura.

Fonte: Autoria própria, 2025.

As duas placas externas de 1 cm foram cortadas de maneira idêntica com janelas centrais (Figura 18).

Após o corte, todas as placas foram coladas com cola de isopor (Figura 27).

Figura 27 – Organização das placas para a configuração final do suporte para as estruturas.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Em seguida, uma das faces foi revestida com papel alumínio com a utilização de cola branca, atuando como uma barreira refletora para assegurar que as ondas atravessassem exclusivamente a estrutura.

Figura 28 – Configuração final do suporte para as estruturas (duas placas).



Fonte: Autoria própria, 2025.

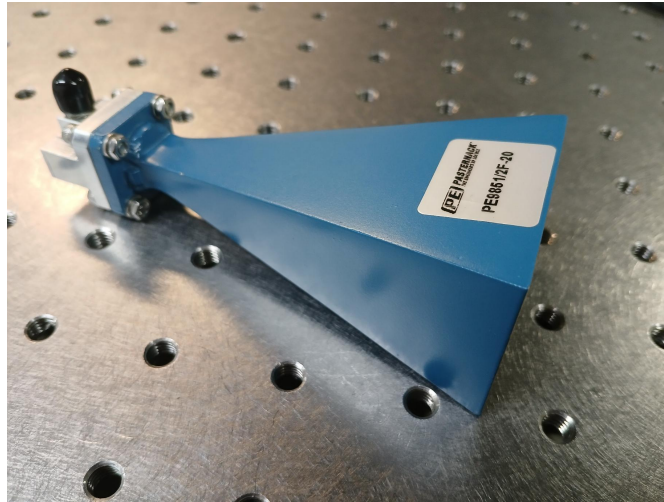
Essa configuração final apresentou maior estabilidade mecânica, facilidade de montagem e qualidade superior nas medições em comparação às anteriores.

### 3.3 Experimento

Os experimentos foram realizados com o objetivo de comparar o comportamento eletromagnético dos dois tipos de geometrias em diferentes condições estruturais. Para a primeira e para a última configuração dos suportes desenvolvidos, foram efetuadas medições com cada estrutura (*single ridge* e *double ridge*) em suas disposições compostas por uma, duas e três placas, permitindo avaliar a influência do número de períodos nos resultados obtidos. Para a segunda configuração para o suporte para as estruturas, foram realizadas medidas apenas com a geometria *double ridge* com duas placas.

Para a realização dos experimentos, foram utilizadas duas antenas do tipo corneta, modelo PE9851/2F-20, da empresa Pasternack (Figura 29).

Figura 29 – Antena PE9851/2F-20 da empresa Pasternack.



Fonte: Autoria própria, 2025.

As antenas foram fixadas sobre a mesa óptica com o auxílio de suportes desenvolvidos anteriormente por Guilherme Simoneti de Arruda, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Suporte utilizado para fixar as antenas na mesa óptica.



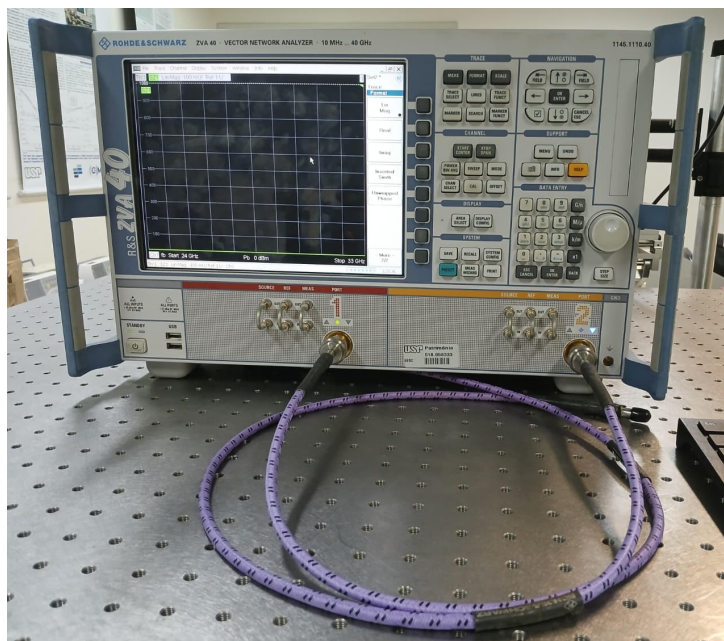
Fonte: Autoria própria, 2025.

As medições foram realizadas com o auxílio de um VNA, utilizado para registrar os parâmetros de transmissão e de recepção das ondas eletromagnéticas. O VNA utilizado



nas medições pode ser observado na Figura 31.

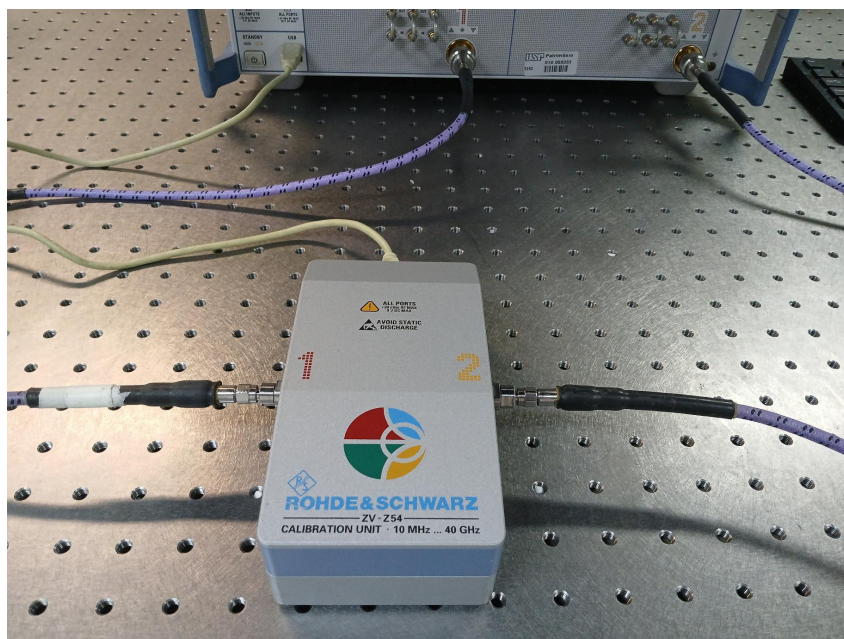
Figura 31 – VNA utilizado nas medições.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Antes do início dos experimentos, os cabos do VNA eram calibrados. Para isso, foi utilizado um módulo de calibração (Figura 32) conectado aos cabos das antenas emissora e receptora, e o procedimento de calibração era executado por meio da interface do VNA. Essa etapa assegurava que as medições subsequentes fossem realizadas com a menor margem de erro possível, compensando perdas e reflexões indesejadas nos cabos.

Figura 32 – Unidade de calibração utilizada.

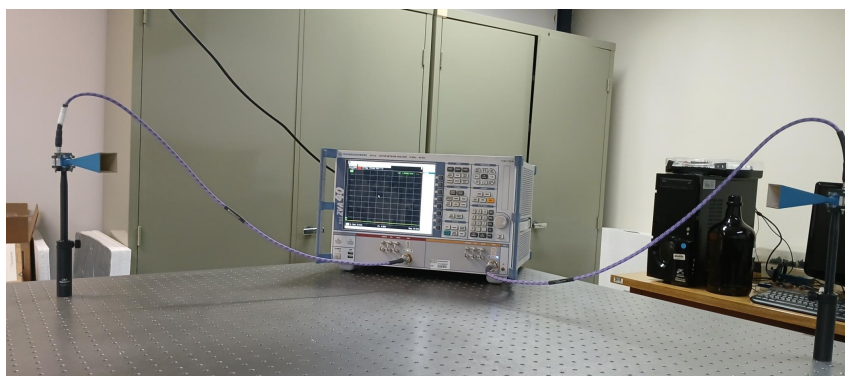


Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a realização do procedimento de calibração, os cabos foram conectados às antenas, as antenas eram alinhadas e a etapa experimental foi iniciada.

Durante os experimentos, as antenas foram posicionadas o mais distante possível uma da outra (127.27 cm), respeitando o limite imposto pelo comprimento dos cabos (como mostra a Figura 33), sendo uma utilizada como emissora e a outra como receptora. O alinhamento das antenas foi ajustado cuidadosamente, a fim de minimizar perdas por desalinhamento e garantir que o sinal atravessasse adequadamente a estrutura.

Figura 33 – Disposição das antenas no experimento.



Fonte: Autoria própria, 2025.

O suporte correspondente à configuração escolhida (de acordo com o número de



placas utilizado no experimento) era então fixado na base (Figura 34).

Figura 34 – Fixação do suporte utilizado na base.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Toda a estrutura era posicionada de modo que a estrutura periódica permanecesse centralizada e alinhada com o eixo das antenas, assegurando que a onda eletromagnética incidisse normalmente sobre sua superfície.

Inicialmente, era obtido um sinal de referência — sem a presença da estrutura — no intervalo de frequência de 24 GHz a 33 GHz, como mostra a Figura 35

Figura 35 – Configuração experimental antes da inserção da estrutura periódica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Em seguida, a estrutura periódica era cuidadosamente inserida pela abertura superior do suporte (Figura 36), evitando qualquer deslocamento da estrutura experimental, já que o sinal de referência já havia sido obtido.

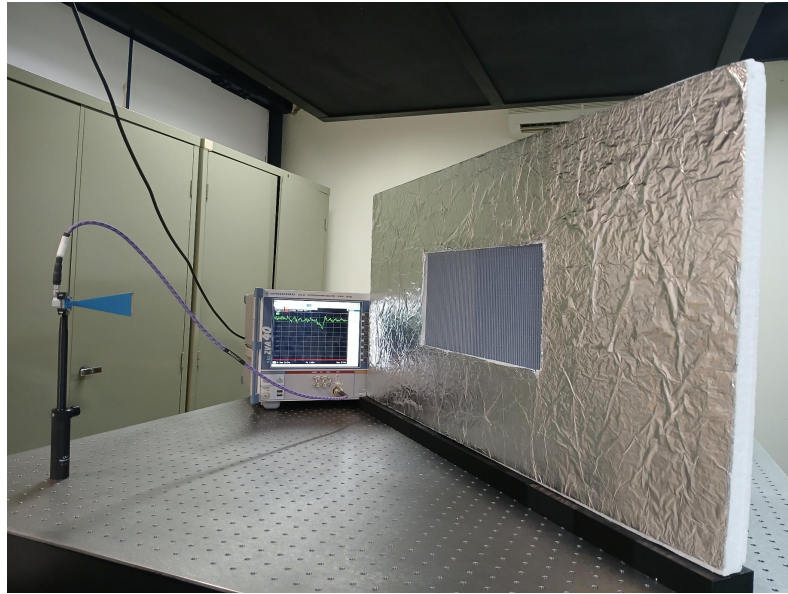
Figura 36 – Inserção da estrutura periódica no suporte.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a inserção, realizava-se uma nova coleta de dados dentro do mesmo intervalo de frequência (de 24 GHz a 33 GHz), agora com a estrutura periódica posicionada. Os resultados obtidos já estavam normalizados em relação ao sinal de referência.

Figura 37 – Configuração experimental com a estrutura periódica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.4 Análise dos dados experimentais

Por fim, os dados experimentais foram processados no software *MATLAB*, onde foram analisadas a amplitude da ressonância e o Fator Q de cada resposta espectral obtida. Para cada ressonância identificada, aplicou-se um *fit* não linear do tipo Lorentziano aos dados experimentais, permitindo extrair os parâmetros ópticos de forma menos suscetível ao ruído presente nas medições.

#### 3.4.1 Amplitude da ressonância

A amplitude foi obtida a partir da curva ajustada pelo *fit*. Após selecionar o intervalo de frequências correspondente à ressonância, o código em *MATLAB* ajustava o modelo Lorentziano aos dados experimentais.

A amplitude foi definida como a diferença entre os valores máximo e mínimo da curva ajustada. Esse procedimento, baseado no *fit*, permite determinar a profundidade da ressonância minimizando a influência de flutuações experimentais.

### 3.4.2 Fator de qualidade (Fator Q)

O cálculo do Fator Q também foi realizado a partir dos parâmetros fornecidos pelo ajuste. Eram obtidos, assim, tanto a posição central da ressonância ( $\omega_0$ ) quanto a largura à meia altura ( $\Delta\omega_{\text{FWHM}}$ ), utilizada na definição do fator de qualidade, que pode ser expressa pela Equação 3.1 [27].

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{\text{FWHM}}}. \quad (3.1)$$

A extração da largura espectral a partir da curva ajustada assegura que o ruído seja suavizado pelo *fit*. Dessa forma, o valor de  $Q$  é estimado de forma mais coerente com o fator de qualidade real da estrutura.

## 4 RESULTADOS

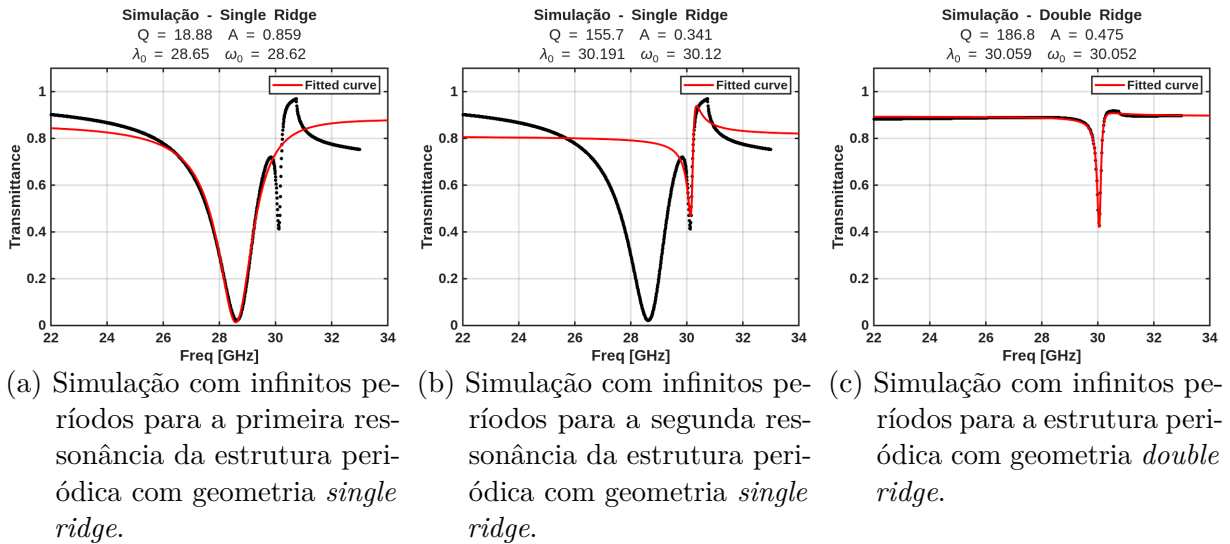
Os resultados aqui apresentados referem-se às melhores curvas obtidas nas medições realizadas. Para cada tipo de configuração, variando a quantidade de placas e a geometria estudada, foram realizadas entre dez e quinze medições, de modo a garantir que o sinal estivesse otimizado devido à posição das antenas e das próprias estruturas periódicas.

As medições foram realizadas com duas resoluções: 501 e 801 pontos. Essa variação ocorreu porque, ao longo das coletas, a configuração de varredura do analisador de rede foi alterada sem que a diferença fosse imediatamente percebida. Somente após a realização dos testes notou-se que parte dos dados havia sido registrada com 501 pontos e outra parte com 801. Como não foi possível repetir todas as coletas, ambas as resoluções foram mantidas na análise. Ainda assim, verificou-se que essa discrepância no número de pontos não comprometeu a identificação nem o comportamento das ressonâncias estudadas.

### 4.1 Simulações

Foram realizadas simulações numéricas no software *COMSOL* para as estruturas periódicas estudadas, considerando períodos infinitos. Dessa forma, simulou-se a geometria *single ridge*, considerando a primeira (Figura 38a) e a segunda (Figura 38b) ressonâncias da estrutura, bem como a geometria *double ridge* (Figura 38c).

Figura 38 – Simulações realizadas para as geometrias *single ridge* e *double ridge*.



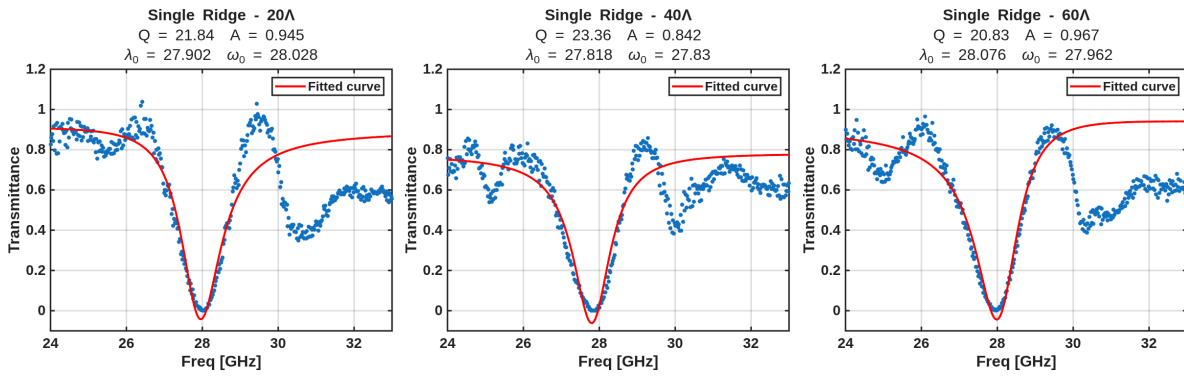
Fonte: Gráficos elaborados a partir de dados cedidos por Guilherme Simoneti de Arruda (2025).

## 4.2 Amplitudes e Fatores de Qualidade obtidos anteriormente pelo GMETA

Foram obtidos, anteriormente pelo GMETA, os valores de amplitude de ressonância e fator de qualidade considerando diferentes larguras da estrutura periódica (uma, duas e três placas) e os dois tipos de geometrias estudadas (geometria *single ridge* e geometria *double ridge*). Cada placa possui 20 períodos, de modo que as configurações com uma, duas e três placas correspondem a 20, 40 e 60 períodos, respectivamente.

A Figura 39 apresenta os resultados obtidos pelo GMETA para a primeira ressonância da geometria *single ridge* com uma, duas e três placas.

Figura 39 – Resultados obtidos pelo GMETA para a primeira ressonância da geometria *single ridge*.

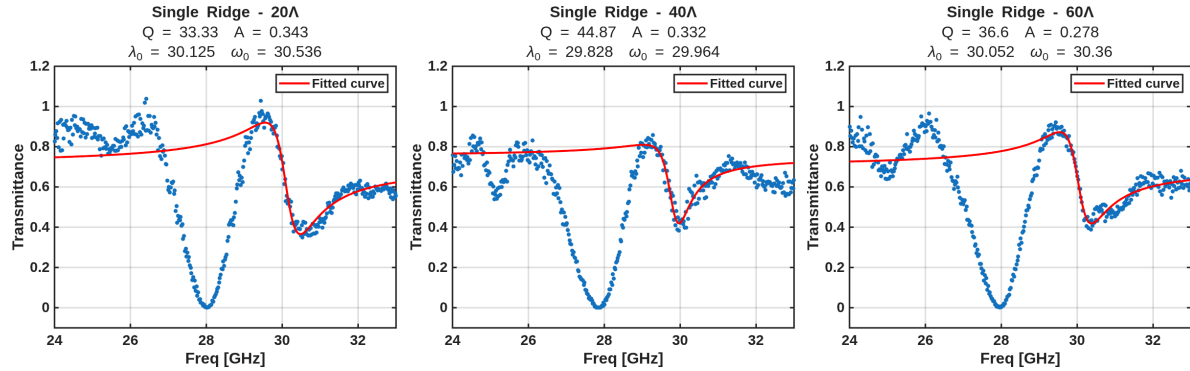


(a) Uma placa (20 períodos) (b) Duas placas (40 períodos) (c) Três placas (60 períodos)

Fonte: Gráficos elaborados a partir de dados cedidos por Guilherme Simoneti de Arruda (2025).

A Figura 40 apresenta os resultados obtidos pelo GMETA para a segunda ressonância da geometria *single ridge* com uma, duas e três placas.

Figura 40 – Resultados obtidos pelo GMETA para a segunda ressonância da geometria *single ridge*.

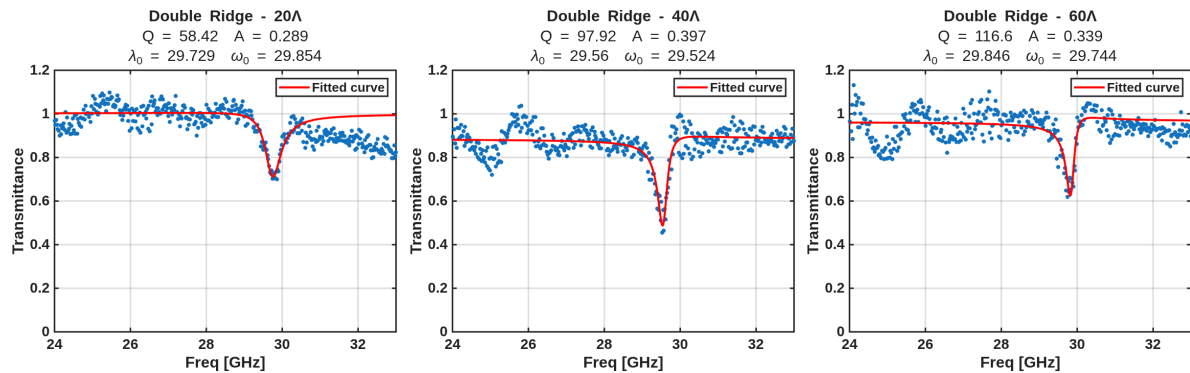


(a) Uma placa (20 períodos) (b) Duas placas (40 períodos) (c) Três placas (60 períodos)

Fonte: Gráficos elaborados a partir de dados cedidos por Guilherme Simoneti de Arruda (2025).

A Figura 41 apresenta os resultados obtidos pelo GMETA para a geometria *double ridge*, com uma, duas e três placas.

Figura 41 – Resultados obtidos pelo GMETA para a geometria *double ridge*.



(a) Uma placa (20 períodos) (b) Duas placas (40 períodos) (c) Três placas (60 períodos)

Fonte: Gráficos elaborados a partir de dados cedidos por Guilherme Simoneti de Arruda (2025).

Os valores extraídos das medições apresentadas nas Figuras 39, 40 e 41 estão reunidos na Tabela 1.



Tabela 1 – Resultados obtidos anteriormente pelo GMETA.

Número de placas	Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 1		Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 2		Geometria <i>double ridge</i>	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
1	21.84	0.945	33.33	0.343	58.42	0.289
2	23.36	0.842	44.87	0.332	97.92	0.397
3	20.83	0.967	36.6	0.278	116.6	0.339

Fonte: Autoria própria com base nos dados cedidos por Guilherme Simoneti de Arruda, 2025.

Para quantificar a divergência entre os resultados obtidos nas estruturas finitas (medidas) e os valores de referência da simulação para estruturas infinitas, calculou-se o erro relativo percentual para cada caso. O erro relativo foi determinado pela equação  $E_r = \frac{|V_{medido} - V_{ref}|}{V_{ref}} \times 100\%$ , onde  $V_{medido}$  corresponde aos dados da Tabela 1 e  $V_{ref}$  aos valores da simulação infinita.

A Tabela 2 apresenta os erros relativos calculados para o Fator de Qualidade ( $Q$ ) e para a Amplitude ( $A$ ) nas três configurações geométricas estudadas.

Tabela 2 – Erro relativo percentual entre as medições realizadas anteriormente pelo GMETA (estruturas finitas) e as simulações (estruturas infinitas).

Número de placas	Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 1 (Ref: $Q = 18.88$ , $A = 0.859$ )		Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 2 (Ref: $Q = 155.77$ , $A = 0.341$ )		Geometria <i>double ridge</i> (Ref: $Q = 186.8$ , $A = 0.475$ )	
	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)
1	15,68	10,01	78,60	0,59	68,73	39,16
2	23,73	1,98	71,19	2,64	47,58	16,42
3	10,33	12,57	76,50	18,48	37,58	28,63

Fonte: Autoria própria, 2025.

### 4.3 Primeira Configuração

Nesta configuração inicial foram realizadas medições para as estruturas com geometrias *single ridge* e *double ridge*, utilizando configurações com uma, duas e três placas.

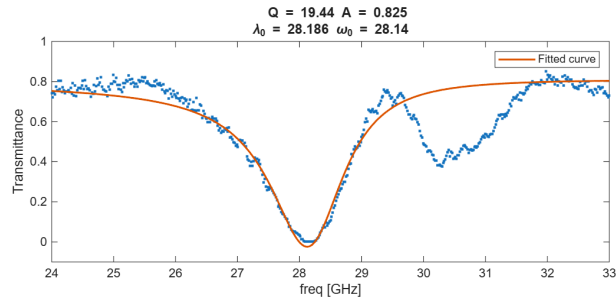


### 4.3.1 Geometria *single ridge*

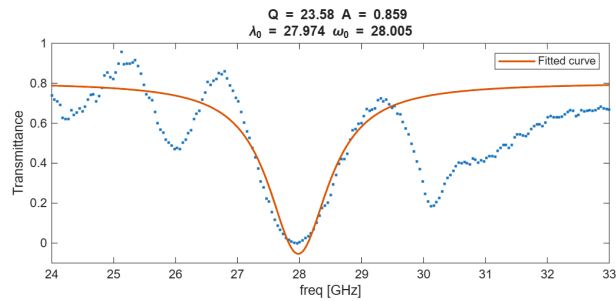
#### 4.3.1.1 Ressonância 1

A Figura 42 apresenta os resultados espectrais medidos para a primeira ressonância da estrutura com geometria *single ridge* na primeira configuração de suporte para estruturas periódicas, considerando uma, duas e três placas. Vale ressaltar que a coleta de dados foi realizada para uma faixa de 24 GHz a 33 GHz, com uma resolução de 801 pontos para a medição de 20 períodos (uma placa) e de 501 pontos para 40 e 60 períodos (duas e três placas, respectivamente).

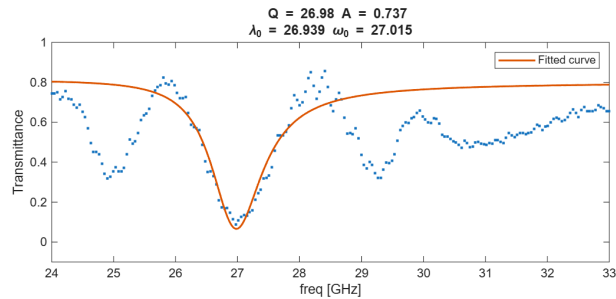
Figura 42 – Resultados obtidos para a primeira ressonância da estrutura com geometria *single ridge* com a primeira configuração experimental.



(a) Uma placa (20 períodos).



(b) Duas placas (40 períodos).



(c) Três placas (60 períodos).

Fonte: Autoria própria, 2025.

A Tabela 3 compara os fatores de qualidade e amplitudes obtidos nestas medições

com os resultados anteriores registrados pelo GMETA.

Tabela 3 – Primeira configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos e os dados obtidos anteriormente pelo GMETA para a ressonância 1 da estrutura com geometria *single ridge*.

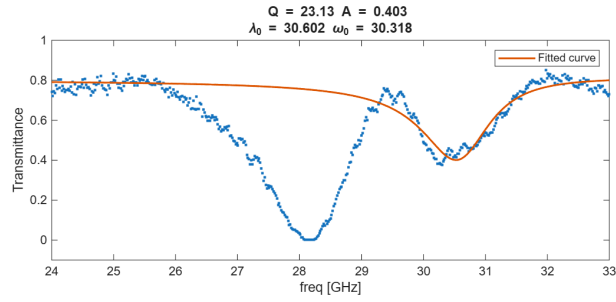
Número de placas	Resultados obtidos com a primeira configuração experimental		Resultados obtidos pelo GMETA	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
1	19.44	0.825	21.84	0.945
2	23.58	0.859	23.36	0.842
3	26.98	0.737	20.83	0.967

Fonte: Autoria própria, 2025.

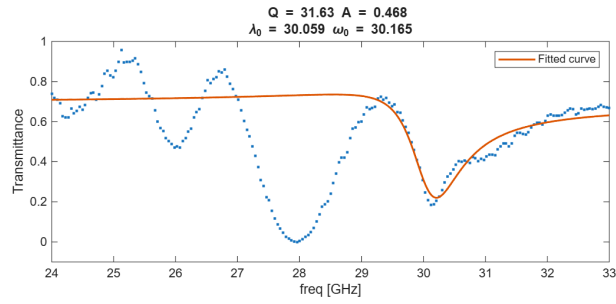
#### 4.3.1.2 Ressonância 2

A Figura 43 apresenta os resultados espectrais obtidos para a segunda ressonância da estrutura com geometria *single ridge*. A coleta de dados foi realizada para uma faixa de 24 GHz a 33 GHz, com uma resolução de 801 pontos para a medição de 20 períodos (uma placa) e de 501 pontos para 40 e 60 períodos (duas e três placas, respectivamente).

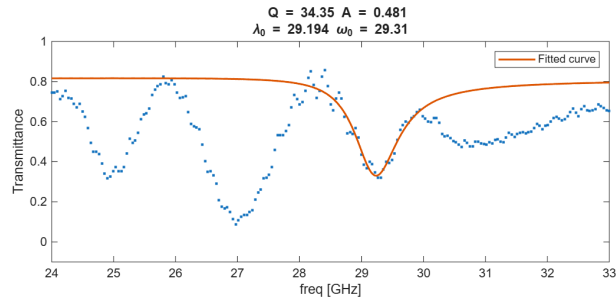
Figura 43 – Resultados obtidos para a segunda ressonância da estrutura com geometria *single ridge* com a primeira configuração experimental.



(a) Uma placa (20 períodos).



(b) Duas placas (40 períodos).



(c) Três placas (60 períodos).

Fonte: Autoria própria, 2025.

A comparação com os resultados do GMETA está organizada na Tabela 4.

Tabela 4 – Primeira configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos com a nova configuração experimental e os resultados obtidos anteriormente pelo GMETA para a ressonância 2 da estrutura com geometria *single ridge*.

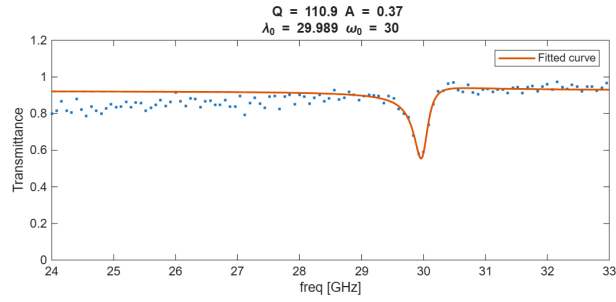
Número de placas	Resultados obtidos com a primeira configuração experimental		Resultados obtidos pelo GMETA	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
1	23.13	0.403	33.33	0.343
2	31.63	0.468	44.87	0.332
3	34.35	0.481	36.6	0.278

Fonte: Autoria própria, 2025.

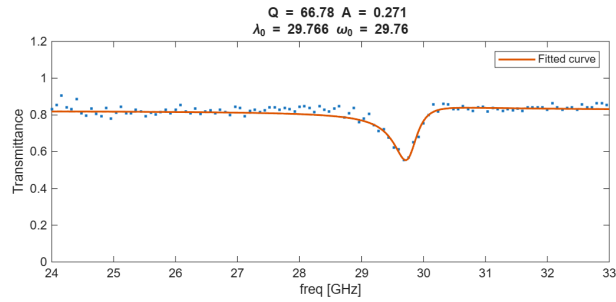
#### 4.3.2 Geometria *double ridge*

A Figura 44 apresenta os resultados obtidos para a estrutura com geometria *double ridge* na primeira configuração. Os dados foram coletados na faixa de 24 GHz a 33 GHz, com uma resolução de 501 pontos para a configuração com uma e duas placas (20 e 40 períodos, respectivamente) e de 801 pontos para a configuração com três placas (60 períodos).

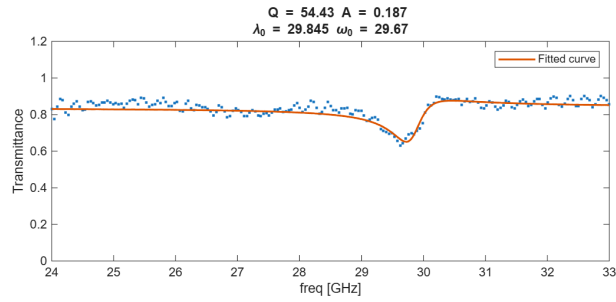
Figura 44 – Resultados obtidos para a estrutura com geometria *double ridge* com a primeira configuração experimental.



(a) Uma placa (20 períodos).



(b) Duas placas (40 períodos).



(c) Três placas (60 períodos).

Fonte: Autoria própria, 2025.

A comparação com os valores obtidos anteriormente pelo GMETA está na Tabela 5.

Tabela 5 – Primeira configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos e os dados obtidos anteriormente pelo GMETA para a estrutura com geometria *double ridge*.

Número de placas	Resultados obtidos com a primeira configuração experimental		Resultados obtidos pelo GMETA	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
1	110.9	0.37	58.42	0.289
2	66.78	0.271	97.92	0.397
3	54.43	0.187	116.6	0.339

Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.3.3 Análise dos resultados

A Tabela 6 apresenta os erros relativos percentuais calculados para os resultados obtidos com a primeira configuração experimental, utilizando como referência os valores da simulação para estruturas infinitas.

Tabela 6 – Erro relativo percentual entre as medições com a primeira configuração experimental (estruturas finitas) e as simulações (estruturas infinitas).

Número de placas	Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 1 (Ref: $Q = 18.88$ , $A = 0.859$ )		Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 2 (Ref: $Q = 155.77$ , $A = 0.341$ )		Geometria <i>double ridge</i> (Ref: $Q = 186.8$ , $A = 0.475$ )	
	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)
1	2,97	3,96	85,15	18,18	40,63	22,11
2	24,89	0,00	79,69	37,24	64,25	42,95
3	42,90	14,20	77,95	41,06	70,86	60,63

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 7 apresenta uma comparação direta entre os erros relativos obtidos anteriormente pelo GMETA e os erros obtidos com a primeira configuração experimen. Destacam-se em **negrito** os valores da configuração atual que apresentaram um aumento no erro relativo (piora na concordância com a simulação) em comparação aos dados obtidos anteriormente pelo GMETA.

Tabela 7 – Comparativo de erros relativos obtidos pelo GMETA e em medições com a utilização da primeira configuração experimental.

Nº de Placas	Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 1				Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 2				Geometria <i>double ridge</i>			
	Erro <i>Q</i> (%)		Erro <i>A</i> (%)		Erro <i>Q</i> (%)		Erro <i>A</i> (%)		Erro <i>Q</i> (%)		Erro <i>A</i> (%)	
	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual
1	15,68	2,97	10,01	3,96	78,60	<b>85,15</b>	0,59	<b>18,18</b>	68,73	40,63	39,16	22,11
2	23,73	<b>24,89</b>	1,98	0,00	71,19	<b>79,69</b>	2,64	<b>37,24</b>	47,58	<b>64,25</b>	16,42	<b>42,95</b>
3	10,33	<b>42,90</b>	12,57	<b>14,20</b>	76,50	<b>77,95</b>	18,48	<b>41,06</b>	37,58	<b>70,86</b>	28,63	<b>60,63</b>

Fonte: Autoria própria.

Nota-se, portanto, que esta configuração experimental apresentou desempenho irregular. Ainda que o erro relativo tenha diminuído consideravelmente em casos isolados, como na primeira ressonância *single ridge* para uma placa (redução de 15,68% para 2,97%), a tendência geral foi de aumento das discrepâncias, conforme evidenciado pelos valores em negrito na Tabela 7. Tal comportamento, provavelmente causado pelo desalinhamento angular já comentado, justifica e motiva a construção de uma nova proposta de suporte para as estruturas periódicas.

Além disso, observou-se um maior desvio espectral das ressonâncias em estruturas com maior número de períodos, evidenciando instabilidades para um maior número de placas, já que estruturas com mais placas eram mais suscetíveis a erros angulares provocados pelo encaixe não plano das placas.

#### 4.4 Segunda Configuração

Nesta etapa, foram realizadas medições com o aparato experimental revisado, cuja janela de encaixe foi reduzida para garantir melhor alinhamento angular das estruturas periódicas. O objetivo desta configuração foi aprimorar a estabilidade das medições e obter resultados espectrais mais consistentes para as diferentes geometrias e quantidades de placas analisadas.

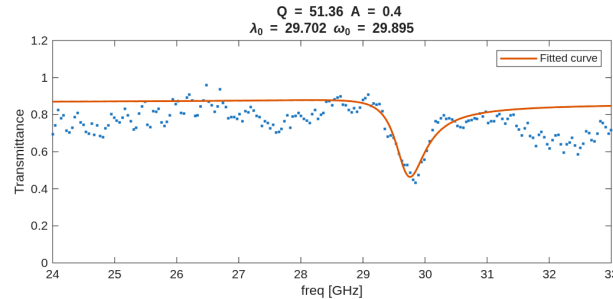
Entretanto, devido às dificuldades de inserção e remoção da estrutura no suporte, o que causava desalinhamento entre as medições do sinal de referência e do sinal com a estrutura, além do fato de os resultados obtidos com duas placas (primeiro suporte construído para essa configuração) não terem sido satisfatórios, optou-se por não realizar as demais medições e construir um novo suporte para as estruturas periódicas.

##### 4.4.1 Geometria *double ridge*

A Figura 45 apresenta os resultados obtidos para duas placas (40 períodos) da estrutura com geometria *double ridge* no segundo tipo de suporte construído. Os dados

foram coletados na faixa de 24 GHz a 33 GHz, com uma resolução de 501 pontos.

Figura 45 – Resultados medidos para a estrutura com geometria *double ridge* na segunda configuração experimental (medição disponível apenas para duas placas).



Fonte: Autoria própria, 2025.

A comparação entre o dado obtido no experimento com a segunda configuração de suporte e o dado obtido anteriormente pelo GMETA pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Segunda configuração experimental: comparação entre os resultados obtidos com a segunda configuração experimental e os resultados obtidos anteriormente pelo GMETA para a estrutura com geometria *double ridge* (duas placas).

Número de placas	Resultado obtido na segunda configuração		Resultado obtido pelo GMETA	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
2	51.36	0.4	97.92	0.397

Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.4.2 Análise dos resultados

A Tabela 9 apresenta os erros relativos percentuais calculados para o único caso medido nesta configuração (geometria *double ridge*, duas placas), mantendo como referência os valores da simulação para estruturas infinitas ( $Q = 186.8$  e  $A = 0.475$ ).

Tabela 9 – Erro relativo percentual entre as medições com a segunda configuração experimental (estruturas finitas) e a simulação (estruturas infinitas).

Número de placas	Geometria <i>double ridge</i> (Ref: $Q = 186.8$ , $A = 0.475$ )	
	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)
2	72,51	15,79

Fonte: Autoria própria.



A Tabela 10 estabelece o comparativo direto entre o erro relativo obtido anteriormente pelo GMETA e o erro obtido com esta segunda configuração. O valor em **negrito** indica onde houve aumento do erro em relação aos resultados obtidos pelo GMETA.

Tabela 10 – Comparativo de erros relativos obtidos pelo GMETA e em medições com a utilização da segunda configuração experimental.

Nº de Placas	Geometria <i>double ridge</i>			
	Erro $Q$ (%)		Erro $A$ (%)	
	GMETA	Atual	GMETA	Atual
2	47,58	<b>72,51</b>	16,42	15,79

Fonte: Autoria própria.

A análise dos dados revela que, embora tenha ocorrido uma ligeira redução no erro de amplitude (de 16,42% para 15,79%), o erro associado ao Fator de Qualidade aumentou significativamente nesta configuração, passando de 47,58% para 72,51%. Este agravamento na discrepância do fator  $Q$ , somado às dificuldades operacionais de manuseio e alinhamento descritas anteriormente, confirmou a inviabilidade deste arranjo experimental para a realização das demais medidas, justificando o encerramento dos testes com este suporte e o desenvolvimento de uma nova proposta.

## 4.5 Configuração Final

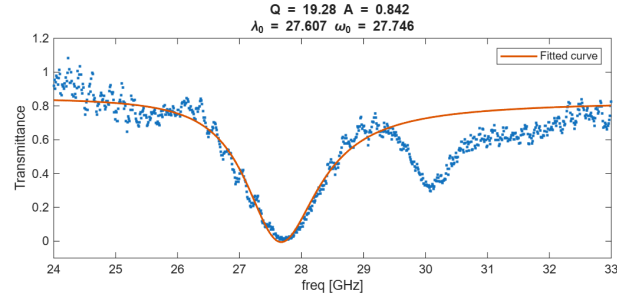
A configuração final incorporou ajustes estruturais que estabilizaram o suporte e reduziram a variação angular durante as medições. Foram realizadas medidas para as estruturas com geometria *single ridge* e *double ridge*, considerando configurações com uma (20 períodos), duas (40 períodos) e três placas (60 períodos).

### 4.5.1 Geometria *single ridge*

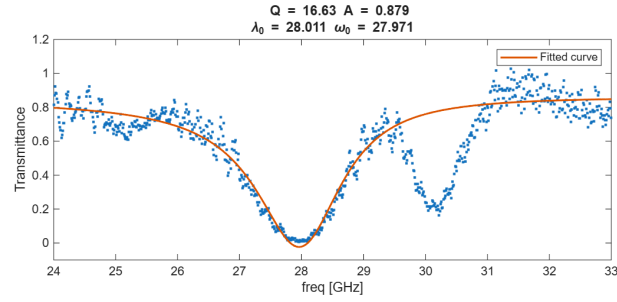
#### 4.5.1.1 Ressonância 1

A Figura 46 mostra os espectros obtidos para a primeira ressonância da estrutura com geometria *single ridge* na configuração final, nas condições de uma, duas e três placas. As medições foram realizadas na faixa de 24 GHz a 33 GHz, utilizando resolução de 801 pontos para 20 períodos, 40 e 60 períodos (uma, duas e três placas, respectivamente).

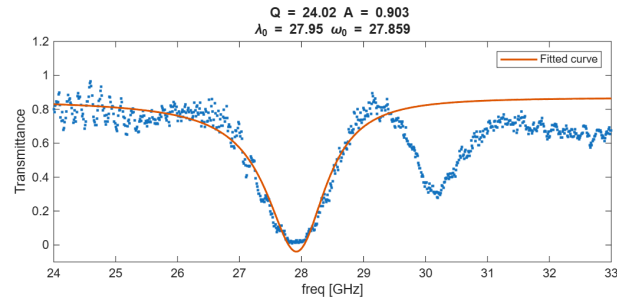
Figura 46 – Resultados obtidos para a primeira ressonância da estrutura com geometria *single ridge* na configuração experimental final.



(a) Uma placa (20 períodos).



(b) Duas placas (40 períodos).



(c) Três placas (60 períodos).

Fonte: Autoria própria, 2025.

A Tabela 11 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para a primeira ressonância da estrutura com geometria *single ridge* na configuração final e os valores previamente obtidos pelo GMETA.

Tabela 11 – Configuração experimental final: comparação entre os resultados obtidos e os dados anteriores do GMETA para a ressonância 1 da estrutura com geometria *single ridge*.

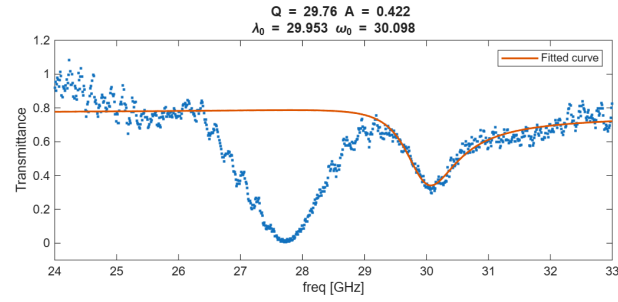
Número de placas	Resultados obtidos na configuração final		Dados obtidos pelo GMETA	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
1	19.28	0.842	21.84	0.945
2	16.63	0.879	23.36	0.842
3	24.02	0.903	20.83	0.967

Fonte: Autoria própria, 2025.

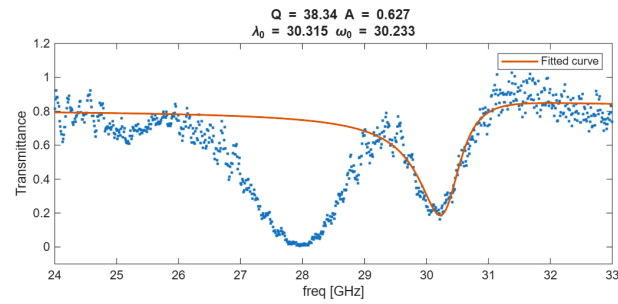
#### 4.5.1.2 Ressonância 2

A Figura 47 apresenta os espectros correspondentes à segunda ressonância da estrutura com geometria *single ridge* na configuração final, obtidos para as situações de uma, duas e três placas. Assim como no caso anterior, as medições foram realizadas no intervalo de 24 GHz a 33 GHz, utilizando resolução de 801 pontos para uma, duas e três placas (20, 40 e 60 períodos).

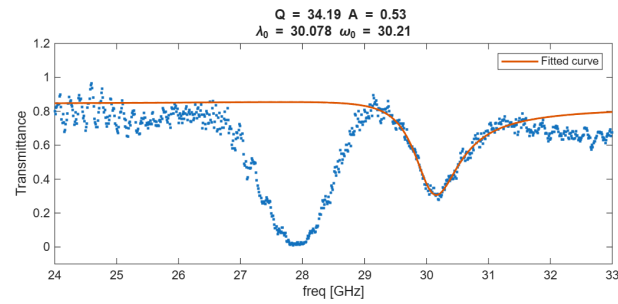
Figura 47 – Resultados obtidos para a segunda ressonância da estrutura com geometria *single ridge* na configuração experimental final.



(a) Uma placa (20 períodos).



(b) Duas placas (40 períodos).



(c) Três placas (60 períodos).

Fonte: Autoria própria, 2025.

A Tabela 12 reúne os valores de fator de qualidade e amplitude extraídos das curvas da segunda ressonância e os resultados anteriormente obtidos pelo GMETA.

Tabela 12 – Configuração experimental final: comparação entre os resultados obtidos e os dados anteriores do GMETA para a ressonância 2 da estrutura com geometria *single ridge*.

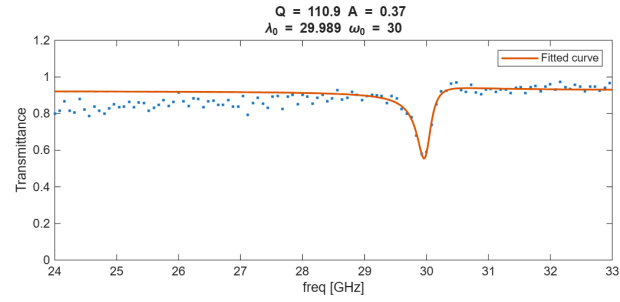
Número de placas	Resultados obtidos na configuração final		Dados obtidos pelo GMETA	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
1	29.76	0.422	33.33	0.343
2	38.34	0.627	44.87	0.332
3	34.19	0.53	36.6	0.278

Fonte: Autoria própria, 2025.

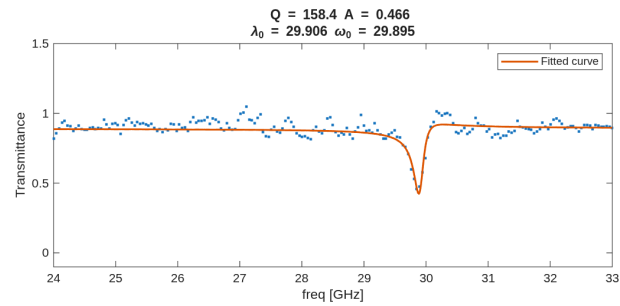
#### 4.5.2 Geometria *double ridge*

A Figura 48 apresenta os espectros medidos para a estrutura com geometria *double ridge* na configuração experimental final, considerando arranjos com uma, duas e três placas. As medidas foram realizadas na faixa de 24 GHz a 33 GHz, adotando resolução de 501 pontos para 20, 40 e 60 períodos.

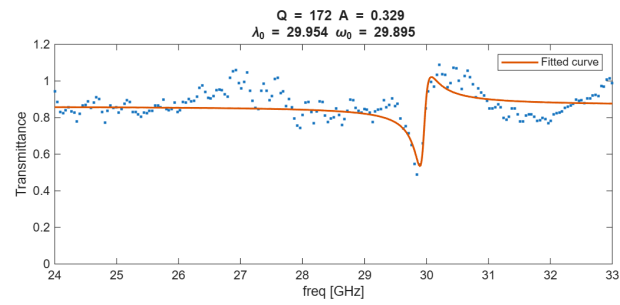
Figura 48 – Resultados obtidos para a estrutura com geometria *double ridge* na configuração experimental final.



(a) Uma placa (20 períodos).



(b) Duas placas (40 períodos).



(c) Três placas (60 períodos).

Fonte: Autoria própria, 2025.

A Tabela 13 mostra os valores de fator de qualidade e amplitude obtidos para essa estrutura e os compara com os dados anteriormente registrados pelo GMETA.

Tabela 13 – Configuração experimental final: comparação entre os resultados obtidos e os dados anteriores do GMETA para a estrutura com geometria *double ridge*.

Número de placas	Resultados obtidos na configuração final		Dados obtidos pelo GMETA	
	Fator de Qualidade	Amplitude	Fator de Qualidade	Amplitude
1	110.9	0.37	58.42	0.289
2	158.4	0.466	97.92	0.397
3	172	0.329	116.6	0.339

Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.5.3 Análise dos resultados

A Tabela 14 apresenta os erros relativos percentuais calculados para os resultados obtidos com a configuração final, utilizando como referência os valores das simulações para estruturas infinitas.

Tabela 14 – Erro relativo percentual entre as medições com a configuração experimental final (estruturas finitas) e as simulações (estruturas infinitas).

Número de placas	Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 1 (Ref: $Q = 18.88$ , $A = 0.859$ )		Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 2 (Ref: $Q = 155.77$ , $A = 0.341$ )		Geometria <i>double ridge</i> (Ref: $Q = 186.8$ , $A = 0.475$ )	
	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)	Erro $Q$ (%)	Erro $A$ (%)
1	2,12	1,98	80,90	23,75	40,63	22,11
2	11,92	2,33	75,39	83,87	15,20	1,89
3	27,22	5,12	78,05	55,43	7,92	30,74

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 15 apresenta o comparativo entre os erros relativos obtidos anteriormente pelo GMETA e os erros obtidos com a configuração experimental final. Os valores em **negrito** indicam os casos onde o erro relativo aumentou nesta configuração em relação às medições anteriores obtidas pelo GMETA.

Tabela 15 – Comparativo de erros relativos obtidos pelo GMETA e em medições com a utilização da configuração experimental final.

Nº de Placas	Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 1				Geometria <i>single ridge</i> Ressonância 2				Geometria <i>double ridge</i>			
	Erro $Q$ (%)		Erro $A$ (%)		Erro $Q$ (%)		Erro $A$ (%)		Erro $Q$ (%)		Erro $A$ (%)	
	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual	GMETA	Atual
1	15,68	2,12	10,01	1,98	78,60	<b>80,90</b>	0,59	<b>23,75</b>	68,73	40,63	39,16	22,11
2	23,73	11,92	1,98	<b>2,33</b>	71,19	<b>75,39</b>	2,64	<b>83,87</b>	47,58	15,20	16,42	1,89
3	10,33	<b>27,22</b>	12,57	5,12	76,50	<b>78,05</b>	18,48	<b>55,43</b>	37,58	7,92	28,63	<b>30,74</b>

Fonte: Autoria própria.

A análise da Tabela 15 mostra que a configuração final trouxe melhorias importantes, principalmente para a geometria *double ridge*, onde o erro do Fator de Qualidade caiu drasticamente de 37,58% para 7,92% no caso de três placas.

Por outro lado, nota-se que houve um aumento significativo do erro associado às amplitudes da segunda ressonância da geometria *single ridge*, o que demonstra a necessidade de estudos futuros focados nisso.

No entanto, nos demais casos em que houve um aumento do erro relativo, esse crescimento foi pequeno e pode ser desconsiderado. Variações como as observadas no Fator de Qualidade da segunda ressonância (de 71,19% para 75,39% e de 76,50% para 78,05%) e na amplitude da primeira ressonância (de 1,98% para 2,33%) indicam que o resultado se manteve praticamente constante. O mesmo raciocínio se aplica à amplitude da geometria *double ridge* (três placas), onde o erro passou de 28,63% para 30,74%. Esse pequeno aumento pode ser atribuído a possíveis erros no ajuste de curvas (*fit*) e não demonstra uma piora dos dados obtidos a partir de medições com o novo suporte.

#### 4.6 Dificuldades experimentais encontradas

Durante a realização dos experimentos, surgiram dificuldades relacionadas ao alinhamento dos elementos. A principal delas foi o alinhamento das antenas receptora e transmissora, que se mostrou um desafio constante. Além disso, houve a complicação adicional de alinhar essas antenas de forma adequada com as estruturas periódicas, o que também demandou ajustes frequentes para tentar otimizar o processo.

Para lidar com essas questões, foi necessário realizar inúmeras medições. A posição das antenas, tanto entre si quanto em relação às geometrias *double* e *single ridge*, foi alterada repetidamente, e novas medições foram feitas a cada ajuste, na tentativa de verificar se o sinal estava melhorando. Esse processo de ajustes contínuos, embora essencial para a otimização da qualidade da recepção e transmissão do sinal, acabou sendo muito demorado.



Na prática, esse processo exigiu bastante dedicação, envolvendo várias idas ao laboratório e um grande número de medições. Por vezes, o ciclo de ajustes e verificações se estendia por dias até que fosse possível alcançar um resultado satisfatório. Esse procedimento foi repetido em todas as configurações experimentais, sempre tomando como referência os resultados previamente obtidos pelo grupo GMETA e os dados de simulação. Quando, mesmo após muitos testes, os resultados não eram satisfatórios, concluía-se que a configuração experimental adotada não estava adequada.



## 5 CONCLUSÃO

O aparato experimental desenvolvido ao longo deste trabalho mostrou-se suficientemente estável para a medição de ressonâncias de alto fator de qualidade no regime de micro-ondas, permitindo a finalização do estudo do GMETA sobre o efeito da finitude em estruturas que suportam modos BIC, especificamente para as geometrias *single* e *double ridge*.

É importante destacar que, mesmo utilizando um aparato experimental acessível em espaço livre e sem a utilização de câmaras anecoicas, foram obtidas medidas com erros relativos extremamente pequenos em comparação com os dados de simulação. Como evidência dessa precisão, na configuração para a geometria *single ridge* (primeira ressonância) com 20 períodos, obteve-se um erro relativo de apenas 2,12% para o Fator de Qualidade e de 1,98% para a Amplitude. De forma análoga, para a estrutura *double ridge* com 40 períodos, o erro da amplitude foi de 1,89%, enquanto que para 60 períodos, o erro do Fator de Qualidade foi reduzido de 37,58% para 7,92%, demonstrando uma melhora significativa em relação às medições anteriores do grupo.

O sistema foi construído majoritariamente com materiais de baixo custo e de fácil obtenção. A exceção reside no uso VNA, único equipamento de maior valor agregado necessário para as medições, mas que se encontra disponível em laboratórios de universidades, como o laboratório do GMETA.

Durante os experimentos, o principal desafio encontrado foi o alinhamento das antenas, fator que impacta diretamente na reprodutibilidade dos resultados e exigiu múltiplas medições e ajustes contínuos para otimização do sinal. Para trabalhos futuros, propõe-se a implementação de mecanismos mais precisos e automatizados para o alinhamento das antenas.

Outra dificuldade observada está relacionada ao alinhamento do suporte das estruturas com as antenas. Dessa forma, sugere-se a implementação de um mecanismo mais eficiente para esse posicionamento.

Além disso, propõe-se também o aprimoramento do sistema de rotação e da fixação da base na mesa óptica, a fim de reduzir erros de alinhamento e aumentar a confiabilidade das medições.

Ademais, o isopor utilizado na montagem pode ser substituído por outro material estruturalmente mais resistente em melhorias futuras, desde que mantenha as propriedades dielétricas adequadas, sem comprometer a estabilidade e a facilidade de montagem do aparato. Também sugere-se o desenvolvimento de um único suporte adaptável a diferentes larguras de geometrias, o que facilitaria a análise sem a necessidade de substituições constantes dos suportes fabricados individualmente para cada tamanho de estrutura.

Ressalta-se ainda a necessidade de estudos futuros focados no erro relativo das amplitudes para a geometria *single ridge*, especificamente em relação à segunda ressonância. Embora os resultados para o primeiro modo tenham sido excelentes, notou-se uma discrepância maior nas amplitudes medidas para a segunda ressonância nesta configuração final, o que justifica uma investigação mais aprofundada para identificar as causas desse comportamento e refinar o aparato para diferentes faixas de frequência.

Também levanta-se a hipótese de que a limitação física imposta pelo comprimento dos cabos possa estar interferindo nos resultados, especialmente para as placas com maiores números de períodos. Essa restrição impede um afastamento maior das antenas em relação à amostra. Portanto, motiva-se para investigações futuras a realização de medições utilizando cabos mais longos e antenas mais afastadas, com o objetivo de garantir que a frente de onda incidente seja a mais próxima possível de uma onda plana, reproduzindo com mais fidelidade as condições consideradas na simulação.

Outra perspectiva relevante para trabalhos futuros deve-se ao fato de o aparato experimental ter sido projetado para operar em espaço livre. Essa característica permite que ele seja utilizado para a caracterização de sensores de gases no regime de micro-ondas, ampliando o escopo de aplicações do equipamento desenvolvido para além das estruturas fotônicas estudadas neste trabalho.

Conclui-se, portanto, que os objetivos estabelecidos neste trabalho foram atingidos, demonstrando a viabilidade e a eficiência do aparato experimental proposto para estudos de ressonâncias de alto fator de qualidade no regime de micro-ondas, sendo validado pelas caracterizações das estruturas *single* e *double ridge*, apesar dos desafios experimentais encontrados, que estimulam aperfeiçoamentos futuros.

## REFERÊNCIAS

- 1 BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. do V. **Introdução à Engenharia: Conceitos, ferramentas e comportamentos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006. 270 p. ISBN 85.328.0356-3.
- 2 CULSHAW, B. **Introducing Photonics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- 3 IJIRSET. **Photonics Research Articles**. 2025. <https://www.iomcworld.org/medical-journals/photonicsresearcharticles-32999.html>. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET). Acessado em 02 de novembro de 2025.
- 4 PASCHOTTA, R. **Photonics**. 2021. RP Photonics Encyclopedia. <https://www.rp-photonics.com/photonics.html>. Acessado em 02 de novembro de 2025.
- 5 GIRTAN, M. Is photonics the new electronics?. **Materials Today**, Elsevier Ltd, v. 17, n. 3, p. 100–101, apr 2014.
- 6 AMSALU, K.; PALANI, S. A review on photonics and its applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 3372–3377, 2020.
- 7 BUTT, M. A.; KAZANSKIY, N. L.; KHONINA, S. N. A review on photonic sensing technologies: status and outlook. **Biosensors**, v. 13, n. 5, p. 568, 2023.
- 8 BUTT, M. A.; MATEOS, X.; PIRAMIDOWICZ, R. Photonics sensors: a perspective on current advancements, emerging challenges, and potential solutions. **Physics Letters A**, v. 516, p. 129633, 2024.
- 9 ARRUDA, G. S. d. **Bloch mode engineering for photonic biosensors**. 2021. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. Orientador: Emiliano Rezende Martins.
- 10 WANGÜEMERT-PÉREZ, J. G. *et al.* Subwavelength structures for silicon photonics biosensing. **Optics & Laser Technology**, v. 109, p. 437–448, jan 2019.
- 11 JACKSON, J. D. **Classical Electrodynamics**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1998. ISBN 978-0471309321.
- 12 HSU, C. W. *et al.* Bound States in the Continuum. **Nature Reviews Materials**, v. 1, p. 16048, 2016.
- 13 BEZUS, E. A.; BYKOV, D. A.; DOSKOLOVICH, L. L. Bound states in the continuum and high-Q resonances supported by a dielectric ridge on a slab waveguide. **arXiv preprint arXiv:1807.01888**, jul 2018.
- 14 CIARELLA, L. *et al.* Finite-Size and Illumination Conditions Effects in All-Dielectric Metasurfaces. **Electronics**, v. 11, n. 7, mar 2022.
- 15 GMETA. **Metamaterials, Microwave and Optics Group (GMETA)**. 2025. <https://sel.eesc.usp.br/gmeta/>. Acessado em: 02 de novembro de 2025.

- 16 SALDUTTI, M. *et al.* Modal properties of photonic crystal cavities and applications to lasers. **Nanomaterials**, v. 11, n. 11, p. 3030, 2021.
- 17 JOANNOPOULOS, J. D. *et al.* **Photonic Crystals: Molding the Flow of Light**. 2. ed. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- 18 CAMPOSEO, A. *et al.* Quantum batteries: A materials science perspective. **Advanced Materials**, v. 37, n. 17, p. 2415073, 2025.
- 19 CAO, B.; HE, Z.; ZHANG, W. Random emission and control of whispering gallery mode using flexible optical fiber. In: **Photonics**. [S.l.]: MDPI AG, 2025. p. 29.
- 20 FÁVERO, F. **Desenvolvimento de Cavidades Fabry-Pérot no Interior de Fibras Ópticas para Aplicações em Sensoriamento**. 2012. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, 2012. Tese de Doutorado.
- 21 SHIBATA, T.; ASANO, T.; NODA, S. Fabrication and characterization of an l3 nanocavity designed by an iterative machine-learning method. **APL Photonics**, v. 6, n. 3, 2021.
- 22 VAHALA, K. J. Optical microcavities. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 424, n. 6950, p. 839–846, 2003.
- 23 KOSHELEV, K. *et al.* Asymmetric metasurfaces with high-q resonances governed by bound states in the continuum. **Physical Review Letters**, American Physical Society, v. 121, n. 19, p. 193903, 2018.
- 24 NEUMANN, J. V.; WIGNER, E. Über merkwürdige diskrete eigenwerte. **Physikalische Zeitschrift**, Hirzel Leipzig, v. 30, n. 465-467, 1929.
- 25 ARRUDA, G. S. *et al.* Fourier control of air modes in high-Q metasurfaces. **Advanced Optical Materials**, Wiley-VCH, v. 12, n. 3, p. 2301563, 2023. Disponível em: [AdvancedOpticalMaterials-2023-Arruda-FourierControlofAirModesinHighQMetasurfaces\(1\).pdf](#).
- 26 PLOTNIK, Y. *et al.* Experimental observation of optical bound states in the continuum. **Physical Review Letters**, American Physical Society, v. 107, n. 18, p. 183901, 2011.
- 27 ARRUDA, G. S. de. **Metasurfaces for photonic sensors applications**. 2025. Tese (Tese (Doutorado)) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025. Orientador: Prof. Dr. Emiliano Rezende Martins.
- 28 ENGSTRØM, D. S. *et al.* Additive nanomanufacturing: A review. **Nature Reviews Materials**, Nature Publishing Group, v. 5, n. 1, p. 1–2, 2020.
- 29 GATES, B. D. *et al.* New approaches to nanofabrication: molding, printing, and other techniques. **Chemical Reviews**, ACS Publications, v. 105, n. 4, p. 1171–1196, 2005.
- 30 SILVA, D. G. **Transformada óptica para obtenção de mapeamento quase-conforme em mantos de invisibilidade tridimensionais**. 2019. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

- 31 FIGUEIREDO, D. O. d. **Gravidade análoga em metamateriais: um elo entre a física da matéria condensada, gravitação e cosmologia**. 2018. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- 32 OLIVEIRA, J. J. d. **Aplicação de metamateriais na transmissão de energia sem fio**. 2019. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- 33 CUNHA, N. H. d. O. **Análise de células unitárias com metamaterial utilizando substratos EBG para aplicações em estruturas planares**. 2020. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- 34 GONÇALVES, F. J. F. **Projeto de mantos metamateriais para redução de espalhamento eletromagnético na faixa de micro-ondas**. 2016. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- 35 AMARAL, C. M. S. C. **Aplicação de Células Baseadas em Superfícies Seletivas em Frequência e Metamateriais em Antenas de Microfita**. 2021. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.
- 36 CASTRO, P. J. *et al.* Estudo experimental para determinação da permissividade e permeabilidade de materiais com suporte de um método de cálculo. In: **Anais do 60. Congresso Brasileiro de Cerâmica**. [S.l.: s.n.], 2016.
- 37 BRINCIOTTI, E. **RF and Microwave Material Measurements: Techniques and Applications**. [S.l.], 2018.
- 38 KREMPEL, D. L. d. B. **Câmaras Anecóicas: Princípios de Projeto**. São Paulo, SP: [s.n.], 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso em Acústica das Edificações e Ambiental). Orientador: Prof. Doutor José Luis Bento Coelho.
- 39 STOUT, B. **Interaction de la lumière avec les milieux hétérogènes tridimensionnels**. sep 2006. Tese (Habilitation à Diriger les Recherches) — Université de Provence, sep 2006.
- 40 CHANGZHOU HAOZHUO ELECTRONIC CO., LTD. Copyright 2021 - 2025. Disponível em: <https://portuguese.rfiemifilter.com>.
- 41 REIS, E. V. d. **Câmara Semi-Anecóica de Radiofrequência**. Instituto Eldorado, 2023. Disponível em: <https://www.eldorado.org.br/blog/camara-semi-anecoica-de-radiofrequencia/>.
- 42 HORTUS TECHNOLOGIES. **Laboratory measurement**. 2023. Copyright 2023. Disponível em: <https://www.hortus-technologies.com/en/laboratory-measurement/>.
- 43 KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **Network Analyzers**. Disponível em: <https://www.keysight.com/us/en/products/network-analyzers.html>.
- 44 BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3rd. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005. ISBN 0-471-66782-X.

- 45 PPG INDUSTRIES, INC. **Low Loss Dielectric Materials from Curing Microwave**. Copyright 2025 PPG Industries, Inc. Disponível em: <https://www.ppg.com/en-US/aerospace/products/engineered-materials/curing-microwave-products/low-loss-dielectric-materials>.
- 46 WALDRON, I. **Ring Resonator Method for Dielectric Permittivity Measurement of Foams**. May 2006. Dissertação (MS Thesis) — Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, May 2006.
- 47 ZHAO, G. *et al.* Terahertz dielectric properties of polystyrene foam. **J. Opt. Soc. Am. B**, Optica Publishing Group, v. 19, n. 6, p. 1476–1479, Jun 2002. Disponível em: <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?URI=josab-19-6-1476>.
- 48 PIEDMONT PLASTICS. **Find The Best RF Plastic For Your Radio Equipment**. 2023. Disponível em: <https://www.piedmontplastics.com/blog/rf-plastic-materials>.
- 49 Wikipedia contributors. **Faraday cage — Wikipedia, The Free Encyclopedia**. 2025. [https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday\\_cage](https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_cage). Accessed: November 13, 2025; [Online; last edited 12-Nov-2025].
- 50 THE COLLABORATION FOR NDT EDUCATION. **Electrical Conductivity and Resistivity for Aluminum and Aluminum Alloys**. 2025. [https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/ET\\_Tables/ET\\_matlprop\\_Aluminum.xhtml](https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/ET_Tables/ET_matlprop_Aluminum.xhtml). Source: NDE-Ed.org.



## **Anexos**



## ANEXO A – DATASHEET DA ANTENA PE9851/2F-20



WR-34 Waveguide Standard Gain Horn Antenna  
Operating from 22 GHz to 33 GHz with a Nominal  
20 dB Gain 2.92mm Female Input



## Gain Horns with Waveguide to Coax Adapters Tech-

PE9851/2F-20

**Configuration**

Design	WR-34 Standard Gain Horn
Pattern	Directional
Polarization	Linear
Coaxial Interface	2.92mm Female

**Electrical Specifications**

Description	Minimum	Typical	Maximum	Units
Frequency Range	22		33	GHz
Impedance		50		Ohms
<b>Waveguide Standard Gain Horn</b>				
Gain		20		dB
Horizontal Half Power Beam Width		17.4		Degrees
Vertical Half Power Beam Width		17		Degrees
<b>Waveguide to Coaxial Adapter</b>				
Input VSWR			1.25:1	

**Mechanical Specifications**

<b>Size</b>	
Weight	0.114 lbs [51.71 g]
<b>RF Connector</b>	
Type	2.92mm Female
<b>Waveguide Interface</b>	
Waveguide Size	WR-34

**Environmental Specifications****Compliance Certifications** (see [product page](#) for current document)**Plotted and Other Data**

2 Dimensional OML Drawing	PE9851/2F-20
Notes:	

Click the following link (or enter part number in "SEARCH" on website) to obtain additional part information including price, inventory and certifications: [WR-34 Waveguide Standard Gain Horn Antenna Operating from 22 GHz to 33 GHz with a Nominal 20 dB Gain 2.92mm Female Input PE9851/2F-20](#)



WR-34 Waveguide Standard Gain Horn Antenna  
Operating from 22 GHz to 33 GHz with a Nominal  
20 dB Gain 2.92mm Female Input



## Gain Horns with Waveguide to Coax Adapters Tech-

PE9851/2F-20

WR-34 Waveguide Standard Gain Horn Antenna Operating from 22 GHz to 33 GHz with a Nominal 20 dB Gain 2.92mm Female Input from Pasternack Enterprises has same day shipment for domestic and International orders. Our RF, microwave and millimeter wave products maintain a 99.4% availability and are part of the broadest selection in the industry.

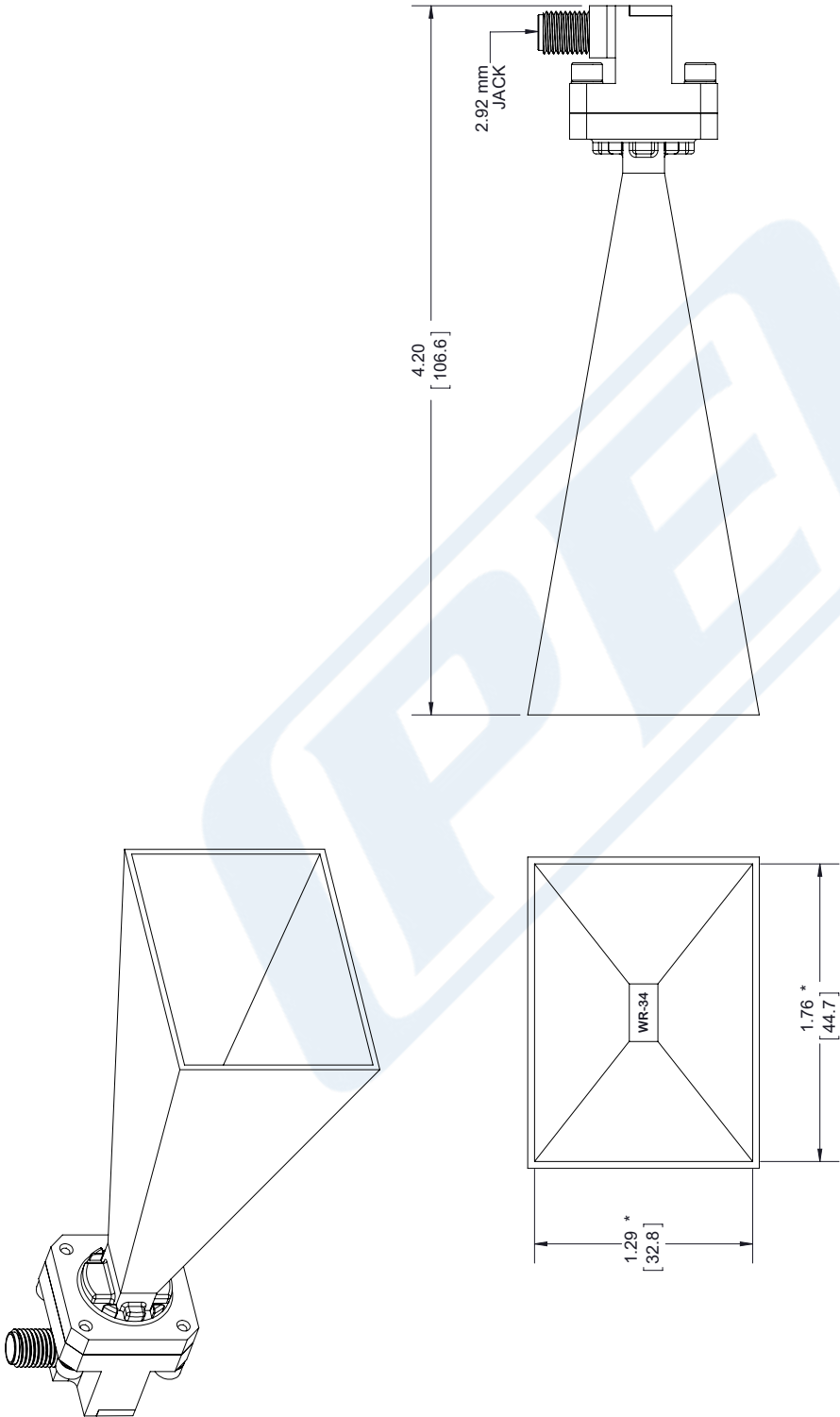
Click the following link (or enter part number in "SEARCH" on website) to obtain additional part information including price, inventory and certifications: [WR-34 Waveguide Standard Gain Horn Antenna Operating from 22 GHz to 33 GHz with a Nominal 20 dB Gain 2.92mm Female Input PE9851/2F-20](https://www.pasternack.com/standard-gain-horn-waveguide-size-wr34-20-db-gain-292mm-female-pe98512f-20-p.aspx)

URL: <https://www.pasternack.com/standard-gain-horn-waveguide-size-wr34-20-db-gain-292mm-female-pe98512f-20-p.aspx>

The information contained in this document is accurate to the best of our knowledge and representative of the part described herein. It may be necessary to make modifications to the part and/or the documentation of the part, in order to implement improvements. Pasternack reserves the right to make such changes as required. Unless otherwise stated, all specifications are nominal. Pasternack does not make any representation or warranty regarding the suitability of the part described herein for any particular purpose, and Pasternack does not assume any liability arising out of the use of any part or documentation.

PE9851/2F-20 CAD Drawing

WR-34 Waveguide Standard Gain Horn Antenna Operating from 22 GHz to 33 GHz with a Nominal 20 dB Gain 2.92mm Female Input



<b>PE PASTERNAK</b> THE ENGINEER'S RF SOURCE Pasternack Enterprises, Inc. P.O. Box 16759   Irvine   CA   92623 <b>Phone:</b> (949) 261-1920   <b>Fax:</b> (949) 261-7451 <b>Website:</b> www.pasternack.com   <b>E-Mail:</b> sales@pasternack.com	<b>DWG TITLE</b> PE9851/2F-20		<b>NOTES:</b> 1. UNLESS OTHERWISE SPECIFIED ALL DIMENSIONS ARE NOMINAL. 2. ALL SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE AT ANY TIME. 3. DIMENSIONS ARE IN INCHES [mm].	
	<b>CAGE CODE</b> 53919	<b>CAD FILE</b> 101117	<b>SCALE</b> N/A	<b>SIZE</b> A 7361