

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
GUERRA ELETRÔNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MODELAGEM, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA CÂMARA
SEMIANECOICA DE BAIXO CUSTO NA FREQUÊNCIA DE 9 GHZ



PRIMEIRO-TENENTE ALEX DE SOUZA RAMOS

Rio de Janeiro
2025

PRIMEIRO-TENENTE ALEX DE SOUZA RAMOS

MODELAGEM, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA CÂMARA SEMIANECOICA DE
BAIXO CUSTO NA FREQUÊNCIA DE 9 GHZ

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Alexandrino como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em
Guerra Eletrônica.

Orientadores:

Antonio Breno de Alleluia, Capitão de Corveta (EN)

Tiago Ogioni Costalonga, Capitão-Tenente

CIAA
Rio de Janeiro
2025

PRIMEIRO-TENENTE ALEX DE SOUZA RAMOS

MODELAGEM, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA CÂMARA SEMIANECOICA DE
BAIXO CUSTO NA FREQUÊNCIA DE 9 GHZ

MONOGRAFIA APRESENTADA AO CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE
ALEXANDRINO COMO REQUISITO PARCIAL À CONCLUSÃO DO CURSO DE
APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM GUERRA ELETRÔNICA.

Aprovada por:

Banca Examinadora:



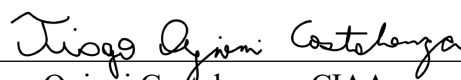
Documento assinado digitalmente

ANTONIO BRENO DE ALLELUIA

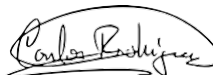
Data: 28/11/2025 11:28:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Antonio Breno de Alleluia - CTMRJ

A handwritten signature in black ink, reading "Tiago Ogioni Costalonga".

CT Tiago Ogioni Costalonga - CIAA

A handwritten signature in black ink, reading "Carlos Vinicio Rodriguez".

Prof. Carlos Vinicio Rodriguez, DSc - PUC Rio

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2025

Ramos, Alex de Souza

Modelagem, construção e análise de uma câmara semianecoica de baixo custo na frequência de 9 GHz: MB/CIAA, 2025.

XIII, 54 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antonio Breno de Alleluia; Tiago Ogioni Costalonga

Trabalho de Conclusão de Curso – MB/CIAA/Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 49-52.

1. Câmara anecoica. 2. Absorvedores eletromagnéticos. I. Alleluia, Antonio Breno; Costalonga, Tiago Ogioni. II. Marinha do Brasil, CIAA, Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Thayana, pela compreensão diante dos afastamentos necessários e por sempre contribuir para que eu pudesse me dedicar aos estudos. Sua paciência, incentivo e amor foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À minha filha, Maria Helena, que com sua pureza e alegria renovou meu propósito e foi minha maior fonte de inspiração e energia nos momentos de dúvida. Sua presença tornou cada desafio mais leve e cada conquista mais significativa.

Aos meus pais, Dilson e Janete, por todo amor e carinho dedicados à minha criação, por serem exemplos de integridade e dedicação, e por me apoiarem incondicionalmente em todas as fases da minha vida e carreira profissional. Sem o esforço e os valores que me transmitiram, esta conquista não seria possível.

Aos amigos Michel Rivera e Lennon Valença, pela amizade sincera, companheirismo e constante apoio ao longo dessa trajetória.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, deixo minha sincera gratidão.

“A segurança de uma nação depende,
em última análise, da ciência”.
(Winston Churchill)

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao CIAA/MB como requisito parcial para a conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado para Oficiais da Armada

MODELAGEM, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA CÂMARA SEMIANECOICA DE BAIXO CUSTO NA FREQUÊNCIA DE 9 GHZ

Primeiro-Tenente Alex de Souza Ramos

Novembro/ 2025

Orientadores: CC (EN) Antonio Breno de Alleluia
CT Tiago Ogioni Costalonga

Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma câmara semianecoica retangular de baixo custo, projetada para operar em 9 GHz, com foco em aplicações de medição de antenas e ensaios eletromagnéticos. O estudo teve como objetivo principal modelar e construir experimentalmente uma estrutura funcional que conciliasse simplicidade construtiva e viabilidade econômica. A fundamentação teórica abrangeu os princípios de propagação de ondas eletromagnéticas, os tipos de absorvedores disponíveis e as geometrias mais empregadas em câmaras anecoicas, justificando a adoção da configuração retangular e o uso de absorvedores piramidais de poliuretano para operação em altas frequências. A metodologia baseou-se em referências clássicas de dimensionamento, realizando-se cálculos das dimensões internas, da espessura dos absorvedores e da distância de campo distante conforme o critério de Fraunhofer. O protótipo foi construído no Laboratório de Micro-ondas, Potência e Fotônica (LaMP), utilizando materiais acessíveis, como placas de MDF e absorvedores comerciais do tipo PU-RAM. Ensaios experimentais foram conduzidos com antenas do tipo corneta, gerador de sinais e osciloscópio, possibilitando a análise do diagrama de radiação e da potência recebida na frequência de 9 GHz. Os resultados demonstraram coerência com os valores teóricos obtidos pela equação de Friis, apresentando um desvio aproximado de 7 dB.

Palavras-chave: Câmara anecoica. Absorvedores eletromagnéticos. Campo distante. Guerra eletrônica.

Abstract of the Undergraduate Final Work presented to CIAA/MB as a partial fulfillment of the requirements for the conclusion of the Advanced Improvement Course for Navy Officers

MODELING, CONSTRUCTION, AND ANALYSIS OF A LOW-COST SEMI-ANECHOIC CHAMBER AT 9 GHZ

Alex de Souza Ramos

November/ 2025

Advisors: Antonio Breno de Alleluia
Tiago Ogioni Costalonga

Advanced Improvement Course in Electronic Warfare

ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost rectangular semi-anechoic chamber designed to operate at 9 GHz, with a focus on antenna measurement applications and electromagnetic testing. The main objective of the study was to model and experimentally construct a functional structure that combines constructive simplicity and economic feasibility.

The theoretical foundation covered the principles of electromagnetic wave propagation, the types of available absorbers, and the geometries most commonly employed in anechoic chambers, justifying the adoption of the rectangular configuration and the use of polyurethane pyramidal absorbers for high-frequency operation.

The methodology was based on classical dimensioning references, including calculations of internal dimensions, absorber thickness, and far-field distance according to the Fraunhofer criterion. The prototype was built in the Laboratory of Microwaves, Power, and Photonics (LaMP), using accessible materials such as MDF panels and commercial PU-RAM absorbers. Experimental tests were carried out using horn antennas, a signal generator, and an oscilloscope, enabling the analysis of the radiation pattern and the received power at 9 GHz. The results showed consistency with the theoretical values obtained from Friis' equation, exhibiting an approximate deviation of 7 dB.

Keywords: Anechoic chamber. Electromagnetic absorbers. X-band. Far-field. Electronic warfare.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético e principais faixas de radiofrequência.....	3
Figura 2 - Placas de absorvedores piramidais de radiações eletromagnéticas	8
Figura 3 - Reflexão de ondas eletromagnéticas em absorvedores piramidais	9
Figura 4 - Exemplo de Telha de Ferrite.....	10
Figura 5 - Absorvedor híbrido formado por um absorvedor piramidal fixado sobre uma placa de ferrite.....	11
Figura 6 - Absorvedor híbrido composto por placas de ferrite e absorvedores piramidais.....	12
Figura 7 - Câmara anecoica com absorvedores nas paredes e piso	13
Figura 8 - Câmara semianecoica sem absorvedores em seu piso	14
Figura 9 - Câmara Anecoica Retangular	15
Figura 10 - Exemplo de emissões direta e refletidas chegando na antena de medição.	16
Figura 11 - Câmara Anecoica Afunilada.	17
Figura 12 - (a) Representa as reflexões ocorrida no interior de uma Câmara Retangular enquanto (b) representa as reflexões no interior de uma Câmara Afunilada	18
Figura 13 - Região de campo próximo reativo, campo próximo radiante e campo distante	20
Figura 14 - Refletividade em função da frequência para câmaras retangulares e afunilada. ...	24
Figura 15 - Exemplos de absorvedores.....	26
Figura 16 - Gráfico do desempenho dos absorvedores em função do angulo de incidência....	28
Figura 17 - Prédio do Laboratório de Micro-ondas, Potência e Fotônica	31
Figura 18 - Osciloscópio Tektronix TPS 2012	33
Figura 19 - Gerador de Sinais MXG N5183A.....	33
Figura 20 - Câmara semianecoica projetada.....	34
Figura 21 - Câmara semianecoica expandida	35
Figura 22 - Absorvedores sendo fixados nas placas MDF	36
Figura 23 - Absorvedores sendo fixados nas placas MDF	37
Figura 24 - Junção da estrutura lateral com a superior.....	38
Figura 25 - Antena do tipo corneta utilizada nos testes.....	39
Figura 26 - Posicionamento das antenas no interior da câmara semianecoica.....	39
Figura 27 - Alinhamento da AUT com auxílio do goniômetro	40
Figura 28 - Medições realizadas com osciloscópio	42
Figura 29 - Diagrama de radiação em coordenadas cartesianas	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distâncias de campo distante calculadas pela regra prática e pelo critério de Fraunhofer.	21
Tabela 2 - Características dos absorvedores piramidais (tipos P-4 a P-72).....	25
Tabela 3 - Resumo dos parâmetros do projeto	30
Tabela 4 - Lista de matérias para construção da câmara semianecoica.....	32
Tabela 5 - Dados preliminares das antenas	33
Tabela 6 - Parâmetros obtidos nas medições.....	41
Tabela 7 - Parâmetros utilizados na Equação de Friis.....	45

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AUT	<i>Antenna Under Test</i>
CR	<i>Compact Range</i>
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
EMI	Medições de Interferência Eletromagnética
GE	Guerra Eletrônica
HPBW	<i>Half-Power Beamwidth</i>
LaMP	Laboratório de Micro-ondas de Potência e Fotônica
MAE	Medidas de Ataque Eletrônico
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MARE	Material Absorvedor de Radiação Eletromagnético
MPE	Medidas de Proteção Eletrônica
MB	Marinha do Brasil
OM	Organizações Militares
QZ	<i>Quiet Zone</i>
RF	Radiofrequência
RCS	Seção Reta Radar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos Gerais	4
1.2. Objetivos Específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1. Aplicações das Câmaras Anecoicas	6
2.2. Absorvedores Eletromagnéticos	7
2.2.1. Absorvedores Dielétricos Piramidais	8
2.2.2. Telhas de Ferrite	10
2.2.3. Absorvedores Híbridos.....	11
2.3. Geometrias de Câmaras Anecoicas	12
2.3.1. Câmaras Anecoicas x Câmaras semianecoicas	13
2.3.2. Câmaras Anecoicas Retangulares	14
2.3.3. Câmaras Anecoicas Afuniladas	16
2.4. Seleção do tipo de medição	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1. Dados Iniciais do Projeto.....	23
3.2. Cálculos Dimensionais	24
3.3. Montagem do protótipo	31
3.3.1. Relação de Material Utilizado	32
3.3.2. Construção da Câmara.....	34
3.3.3. Paredes Laterais.....	36
3.3.4. Parte inferior e superior	37
3.3.5. União dos módulos	38
3.4. Medições da Câmara Semianecoica	40
3.5. Ferramenta para análise dos dados	42
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
5 CONCLUSÃO.....	47
5.1. Sugestões para futuros trabalhos	48
REFERÊNCIAS.....	49

APÊNDICE A	53
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa científica é uma das principais forças motrizes do desenvolvimento humano, resultando da integração entre a estudo de conhecimentos prévios, observação das aplicações práticas dos conceitos existentes em nosso mundo, e interpretação dos resultados decorrentes dessas observações. Esse processo sistemático sustenta e direciona o avanço tecnológico contemporâneo (Pereira *et al.*, 2018). Os avanços tecnológicos também são fundamentais para atender e subsidiar os estudos da Marinha do Brasil (MB) no presente e no futuro.

A capacidade de modelar matematicamente os fenômenos naturais, com o objetivo de analisar teorias e verificar se os resultados obtidos são coerentes com a hipótese estudada, constitui um dos alicerces da ciência moderna (Barbosa, 2023).

A formulação das equações do eletromagnetismo por James Clerk Maxwell, em 1865, representou um marco na ciência, ao unificar eletricidade e magnetismo em uma teoria única capaz de prever a existência das ondas eletromagnéticas (Balanis, 2016).

Alguns anos depois, entre 1886 e 1887, Heinrich Hertz comprovou experimentalmente essa previsão, ao gerar e detectar ondas em laboratório, demonstrando suas propriedades de propagação, reflexão e polarização (Liu *et al.*, 2023). Posteriormente, com base no conhecimento adquirido nesses estudos, em 1901, Guglielmo Marconi validou a capacidade das ondas eletromagnéticas de transportar informação por longas distâncias por meio da primeira transmissão transatlântica sem fio (De Oliveira *et al.*, 2023).

A partir dessas descobertas, consolidaram-se diversas aplicações civis do espectro eletromagnético na faixa de Radiofrequência (RF). Entre elas, destacam-se as telecomunicações, que possibilitam a transmissão de sinais de rádio, televisão, telefonia celular e internet sem fio (Liu *et al.*, 2023); a utilização industrial, voltada à detecção e mitigação de interferências por meio da Compatibilidade Eletromagnética (CEM) na produção de automóveis (Alfaro, 2006); a área médica, na qual o desenvolvimento de marca-passos mais seguros que sofram menos influência de campos eletromagnéticos indesejados (Carvalho; Costa, 2018); e, por fim, o campo do sensoriamento remoto, em que se destacam as aplicações em monitoramento climático e observação da Terra por satélites, reforçando a relevância do espectro eletromagnético em diferentes áreas do conhecimento (Guo, Zhang e Zhu, 2015).

No meio militar, o uso das ondas eletromagnéticas revelou-se igualmente estratégico, especialmente com o advento do radar no século XX, tecnologia fundamental para detecção, navegação e defesa (Skolnik, 2008). Nesse mesmo contexto, a Guerra

Eletrônica (GE) que consiste no conjunto de ações voltadas ao uso e ao controle do espectro eletromagnético em operações militares, com o objetivo de obter vantagem tática e estratégica sobre o oponente, consolidou-se como um dos principais campos de aplicação das ondas eletromagnéticas (Marinha do Brasil, 2023). Integram o conceito de GE as Medidas de Ataque Eletrônico (MAE), voltadas a negar ao inimigo o uso efetivo do espectro eletromagnético, e as Medidas de Proteção Eletrônica (MPE), destinadas à preservação da integridade e da operacionalidade dos sistemas próprios frente a tentativas de interferência (Marinha do Brasil, 2023).

Ainda no aspecto bélico, existe também a aplicação das ondas eletromagnéticas empregadas em tecnologias furtivas (*stealth*), despistadores do tipo chaff (dipolos ressonantes) e mísseis antirradiação, o que reforça a necessidade de estudos contínuos e ambientes de ensaio específicos nessa área (Neri, 2018).

Observando as diversas aplicações civis e militares nas quais o espectro eletromagnético tem papel de destaque, desde a formulação das Leis de Maxwell, no século XIX, até suas diversas aplicações atuais, surge, então, a necessidade de ambientes controlados de teste, como as câmaras anecoicas. Essas estruturas são projetadas para simular um espaço livre de reflexões, por meio do revestimento interno com materiais absorvedores de radiação eletromagnética, os quais atenuam as ondas incidentes e impedem que retornem ao ambiente de medição. Tal característica permite a caracterização de antenas, a medição da seção reta radar (RCS) e a validação de contramedidas eletrônicas, reduzindo reflexões indesejadas e aumentando a confiabilidade dos ensaios (Miacci; Martin; Rezende, 2005).

Ao ressaltar a importância dessas estruturas capazes de simular ambientes livres de reflexões indesejadas e suas aplicações na exploração do espectro eletromagnético, evidencia-se sua relevância no âmbito das Forças Armadas, em especial da MB. A disponibilidade de câmaras anecoicas poderia contribuir de maneira significativa tanto na realização de testes em sistemas e equipamentos já existentes quanto no campo da pesquisa e desenvolvimento de novas soluções (Woods, 2006).

Entretanto, o alto custo de construção das câmaras anecoicas constitui, entretanto, um obstáculo significativo, uma vez que a principal parte do investimento está associada aos absorvedores de RF e à estrutura física da sala, o que dificulta sua implementação em países em desenvolvimento (Gomes, 2017). Com isso, destaca-se a busca por alternativas de menor custo mantendo desempenho adequado por meio da otimização da geometria da sala e do arranjo dos absorvedores, reduzir os custos de construção sem comprometer os requisitos técnicos de desempenho (Chung, Teh; Chuah 2003).

Diante desse cenário, este estudo propõe a modelagem de uma câmara anecoica de baixo custo destinada a medir equipamentos que operem na banda X (8–12 GHz). Essa faixa de frequência foi selecionada por ser amplamente empregada em sistemas navais em radar e telecomunicações, devido à possibilidade de projetar antenas compactas com elevada resolução e eficiência, características ideais para aplicações embarcadas, o que reforça sua relevância prática (Leonardo DRS, 2022).

Além disso, no contexto do espectro de radiofrequências, as faixas mais elevadas — que incluem, entre outras, as bandas C, X e Ku — caracterizam-se por operar em frequências da ordem de gigahertz (GHz). A Figura 1 apresenta o espectro eletromagnético, destacando a faixa de micro-ondas e explicitando seu comprimento de onda e principais aplicações. Nessas faixas, os comprimentos de onda são menores, o que reduz a distância necessária para atender aos critérios de campo distante e possibilita o projeto de câmaras anecoicas mais compactas, representando um benefício substancial em termos de redução de custos (Balanis, 2016).

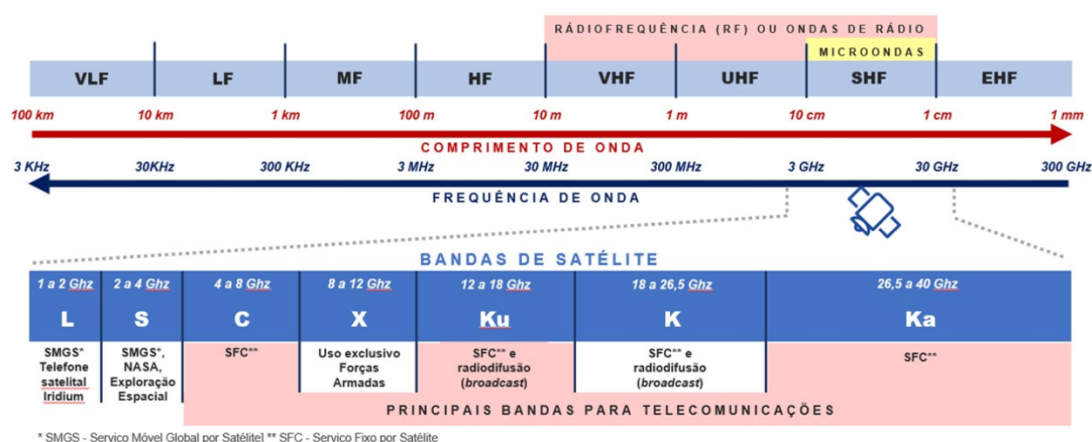


Figura 1 - Espectro eletromagnético e principais faixas de radiofrequência

Fonte: Briskom (2025).

Pretende-se, ainda, desenvolver em laboratório um protótipo funcional de câmara semianecoica de baixo custo e baixa complexidade construtiva, utilizando materiais e técnicas acessíveis, de modo a validar experimentalmente os parâmetros definidos na modelagem teórica. O projeto busca verificar se as dimensões internas da câmara e as características dos absorvedores eletromagnéticos correspondem aos resultados estimados por meio dos cálculos de campo distante, assegurando o desempenho adequado na faixa de operação da banda X.

Diferentemente das câmaras anecoicas completas, que possuem revestimento absorvedor em todas as superfícies internas, incluindo piso, paredes e teto, as câmaras semianecoicas mantêm apenas as paredes e o teto revestidos, utilizando o piso refletor como parte integrante do ambiente de medição (Santos, 2007). Essa configuração reduz significativamente o custo e a complexidade construtiva, sem comprometer a precisão dos ensaios de antenas em determinadas condições de teste (Pavão; Mathias; Idalmir Júnior, 2008). Assim, a validação prática do protótipo permitirá avaliar a viabilidade de replicação do modelo em outras unidades de pesquisa, contribuindo para a realização de ensaios de antenas e o apoio ao ensino e à pesquisa sobre ondas eletromagnéticas em centros tecnológicos e laboratórios vinculados à Marinha do Brasil.

1.1.Objetivos Gerais

- Construir um ambiente controlado para testes voltado à realização de ensaios e medições no domínio eletromagnético em altas frequências, especificamente em 9 GHz.
- Justificar as escolhas relacionadas ao formato e às dimensões físicas da câmara com base na literatura especializada.
- Estudar os diferentes tipos de absorvedores eletromagnéticos, avaliando suas características e aplicabilidade na faixa de frequência de interesse.
- Com base no referencial teórico determinar a geometria a ser utilizada de visando maximizar o desempenho dos componentes utilizados.
- Utilizando a literatura modelar por meio das equações disponíveis as dimensões a serem utilizadas nos absorvedores, dimensões da câmara semianecoica e condições físicas para que o projeto possa operar.
- Reduzir os custos de construção sem comprometer o desempenho da câmara.
- Minimizar a complexidade construtiva, visando maior acessibilidade e aplicabilidade prática.
- Verificar a viabilidade do projeto por meio da montagem de um protótipo de modo a possibilitar futuras aplicações no âmbito da MB.

1.2.Objetivos Específicos

Por meio deste trabalho, busca-se a partir do estudo das câmaras anecoicas e de seus absorvedores, realizar a modelagem física das dimensões da estrutura e dos absorvedores por meio de cálculos baseados no referencial teórico. Pretende-se, ainda,

realizar testes que verifiquem a viabilidade do projeto, de modo a verificar as hipóteses teóricas por meio de cálculos com medições reais, além de contribuir com diretrizes para futuras aplicações em pesquisas e instituições de ensino da MB.

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 – Introdução apresenta a relevância do estudo, contextualizando a importância das câmaras anecoicas no cenário das tecnologias de defesa e comunicação, com ênfase em sua aplicação no meio militar, especialmente para a MB. Justifica-se a escolha da banda X como faixa de frequência de interesse e delimita-se o escopo do trabalho.

O Capítulo 2 – Fundamentação Teórica aborda os conceitos essenciais que sustentam o desenvolvimento do projeto, incluindo o conceito e as aplicações das câmaras anecoicas, as geometrias tipicamente utilizadas na construção desses ambientes de medição, os critérios para a seleção do tipo de medição a ser empregado, os mecanismos de absorção utilizados, os tipos e propriedades dos materiais absorvedores disponíveis na literatura.

O Capítulo 3 – Metodologia e Modelagem descreve a aplicação prática dos fundamentos teóricos na definição do formato e das dimensões da câmara semianecoica. São apresentados os critérios adotados para o dimensionamento físico da estrutura e dos absorvedores, considerando limitações de espaço e desempenho, de modo a assegurar a viabilidade do projeto em contextos institucionais, como os da MB. Além disso, é detalhada a construção do protótipo realizada no Laboratório de Micro-ondas, Potência e Fotônica (LaMP), destacando os materiais utilizados, os equipamentos de medição e estrutura física para montagem da câmara semianecoica.

O Capítulo 4 – Resultados e Análises aborda as avaliações e os parâmetros considerados, bem como os resultados obtidos e sua comparação com os valores esperados, com o objetivo de validar a viabilidade da construção de uma câmara anecoica em conformidade com os critérios de custo e complexidade previamente estabelecidos.

Por fim, o Capítulo 5 – Considerações Finais apresenta as conclusões obtidas a partir do estudo, destacando a aplicabilidade da proposta, suas limitações e as contribuições para futuras pesquisas. Também são sugeridos trabalhos futuros com o objetivo de ampliar os resultados alcançados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos que servirão de fundamento para as decisões estruturais para o dimensionamento de uma câmara anecoica, com ênfase na redução de custos e complexidade. Para isso, serão discutidas as aplicações das câmaras anecoicas, bem como os princípios de funcionamento dos absorvedores eletromagnéticos, com destaque para os diferentes tipos disponíveis (telhas de ferrite, absorvedores dielétricos e híbridos). Em seguida, será realizada uma análise comparativa das geometrias mais empregadas na construção dessas estruturas, evidenciando suas vantagens e limitações. Por fim, serão apresentados os critérios para a seleção do tipo de medição mais adequado, seja em campo próximo ou em campo distante.

2.1. Aplicações das Câmaras Anecoicas

Uma questão primordial em projetos que utilizam o espectro eletromagnético é o estudo dos parâmetros das antenas a serem utilizadas (Balanis, 2016). Essa análise torna-se ainda mais crítica ao se considerar que cada tipo de aplicação possui suas peculiaridades, como: diagrama de radiação, diretividade, largura de banda e polarização (Pinho *et al.*, 2020). Historicamente, métodos de avaliação em ambientes internos e externos eram empregados para analisar essas peculiaridades, entretanto, os ensaios realizados em ambientes abertos eram fortemente impactados por interferências, reflexões e espalhamentos indesejados, além de estarem sujeitos às condições meteorológicas (Pinho *et al.*, 2020).

Por outro lado, o uso de ambientes confinados e controlados para a realização de ensaios internos mostrou-se a forma mais precisa de avaliar os critérios operacionais das antenas (Hemming, 2002). De forma complementar, os experimentos realizados em estruturas fechadas necessitavam de bem menos espaço, sendo este mais um dos fatores de vantagem (Hemming, 2002). Nos ambientes de teste, busca-se replicar um espaço ideal livre de ruídos externos indesejados, no qual as medições podem ser feitas de modo fidedigno. Com a posse de estruturas confiáveis para realizar as medições sem interferências foram desenvolvidas as câmaras anecoicas, preenchidas com materiais absorventes (Pinho *et al.*, 2020).

A partir de 1953, iniciou-se a comercialização dos primeiros absorvedores de micro-ondas, fato que impulsionou o uso e o desenvolvimento das câmaras anecoicas para

medições eletromagnéticas (Pinho *et al.*, 2020). Esses absorvedores tinham como função principal iluminar a QZ ao redor da antena sob ensaio AUT com um campo elétrico o mais uniforme possível, minimizando as múltiplas reflexões internas (PINHO *et al.*, 2020). Outro aspecto relevante é que essas câmaras são tipicamente revestidas externamente por materiais metálicos, com o objetivo de reduzir a entrada de sinais parasitas provenientes do ambiente externo. Esse tipo de instalação é amplamente utilizado para medições de antenas, ensaios de interferência eletromagnética (EMI) e compatibilidade eletromagnética (CEM), garantindo a minimização de interferências externas (Pinho *et al.*, 2020). Com os avanços tecnológicos, otimizações estruturais nessas instalações foram implementadas, por meio do correto planejamento geométrico das paredes da câmara e da disposição estratégica dos materiais absorvedores, obtém-se uma melhoria significativa no desempenho da QZ por evitar reflexões indesejadas ou direcionando de maneira planejadas as ondas eletromagnéticas para uma região determinada (Chung, Chuah, 2003).

Com esse panorama da evolução das câmaras anecoicas, o próximo tópico deste trabalho aprofundará os conceitos básicos que caracterizam uma câmara anecoica, iniciando pela análise do seu elemento mais fundamental: os materiais absorvedores.

2.2. Absorvedores Eletromagnéticos

Outro aspecto relevante no projeto e na construção de uma câmara anecoica é a escolha adequada do tipo de Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética (MARE). Esses materiais possuem propriedades físicas que fazem com que as ondas eletromagnéticas incidentes sejam dissipadas sob a forma de calor, por meio de mecanismos de ressonância (Tenório, 2023). A seleção do MARE a ser empregado impacta diretamente a eficácia da atenuação das reflexões internas e, consequentemente, a precisão das medições realizadas no interior da câmara (Chung; Chuah, 2003).

Os absorvedores são geralmente classificados, de acordo com o seu material constitutivo, em três grupos principais:

Absorvedores dielétricos, empregados predominantemente na faixa de micro-ondas e absorvedores de ferrite, utilizados em faixas de frequência mais baixas (Hemming, 2002). Há ainda um terceiro grupo, resultante da combinação entre ferrite e materiais dielétricos — os chamados absorvedores híbridos — que integram as propriedades de ambos os tipos, permitindo a operação em uma faixa de frequências mais ampla (Chung; Chuah, 2003).

Esta seção tem por objetivo analisar os três principais tipos de absorvedores eletromagnéticos.

2.2.1. Absorvedores Dielétricos Piramidais

Dentre os materiais utilizados no revestimento de câmaras anecoicas, o uso de absorvedores dielétricos, normalmente em formato piramidal, é o mais difundido (Hemming, 2002). Esse produto consiste em um absorvedor sólido de espuma de poliuretano carregada com carbono, ilustrado pela Figura 2. Após a ocorrência de incêndios envolvendo esse tipo de material, passou-se a tratá-lo com produtos químicos retardantes de fogo, que são adicionados à solução de carbono ou aplicados em um segundo processo de tratamento (Hemming, 2002).

A Figura 2 apresenta de espuma absorvente em seu formato piramidal tradicional no interior de uma câmara anecoica.

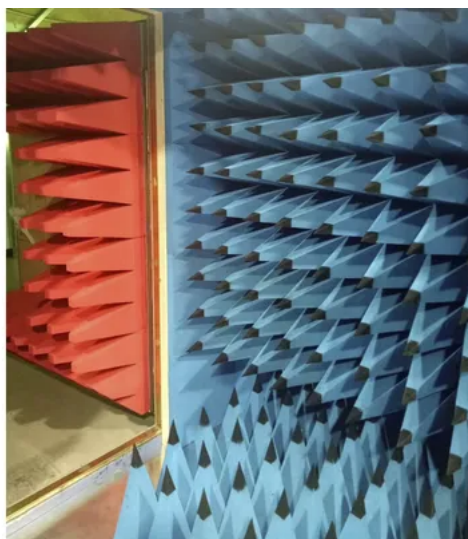


Figura 2 - Placas de absorvedores piramidais de radiações eletromagnéticas

Fonte: Made in China (2025).

Trabalhando com a faixa de frequência de 1 a 40 GHz o desempenho de absorvedores piramidais é ótimo, ainda é possível complementar essa informação ao notar que os absorvedores piramidais, confeccionados a partir de espuma impregnada com carbono, oferecem melhor desempenho em frequências mais elevadas (Rodriguez; Fischer, 2016).

Acima de 1 GHz, beneficiando-se de sua geometria, que promove múltiplas reflexões internas e uma transição gradual de impedância entre o espaço livre e o material (Chung, Chuah, 2003).

A Figura 3 ilustra o comportamento de uma onda eletromagnética ao incidir sobre um MARE. Nesse processo, parte da energia da onda incidente é refletida, enquanto outra fração penetra no material, sendo gradualmente atenuada e convertida em calor por meio de mecanismos de perda dielétrica e magnética, onda refratada. Dessa forma, as ondas refletidas indesejadas são significativamente reduzidas, contribuindo para a criação de um ambiente eletromagneticamente controlado.

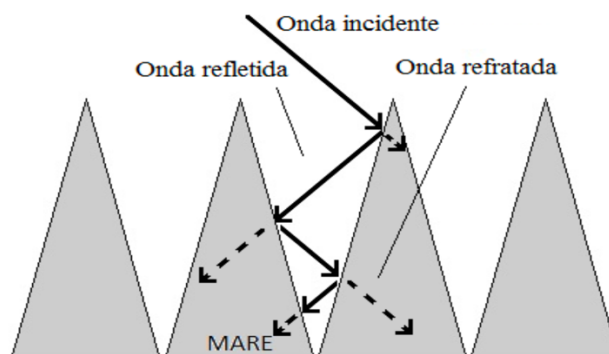


Figura 3 - Reflexão de ondas eletromagnéticas em absorvedores piramidais

Fonte: Gomes (2017)

Além dos modelos consagrados de absorvedores piramidais, diversos estudos indicam a viabilidade do desenvolvimento de materiais absorvedores de ondas eletromagnéticas de baixo custo, capazes de atender a aplicações laboratoriais e medições específicas (Gomes, 2017). A utilização de espumas impregnadas com carbono produzidas nacionalmente, apresentando desempenho suficiente para substituir absorvedores importados, mantendo os níveis de atenuação exigidos para a faixa de micro-ondas (Gomes, 2017).

A otimização do desempenho desses materiais é obtida por meio do controle da geometria das pirâmides e da adequada densidade de carga de carbono, parâmetros que influenciam diretamente a eficiência da absorção. Esses absorvedores de baixo custo mantêm o formato piramidal tradicional, justamente para favorecer as múltiplas reflexões internas, as quais contribuem para a redução das reflexões residuais no interior da câmara anecoica (Gomes, 2017).

Complementando essa visão existe ainda a possibilidade de uso de outros materiais alternativos que também podem ser aproveitados, como borracha triturada, compósitos poliméricos reciclados e misturas com aditivos condutivos, podem ser empregados como absorvedores em aplicações de menor complexidade ou em faixas de frequência restritas (Chung; Chuah, 2003). Essa abordagem, pode reduzir o custo final do

projeto, incorpora práticas sustentáveis ao reaproveitar resíduos industriais, alinhando desempenho e responsabilidade ambiental. No entanto, esses materiais exigem caracterização eletromagnética criteriosa, especialmente quando o objetivo é operar em faixas mais exigentes, como a banda X, onde a precisão nas medições e a estabilidade das propriedades de absorção são essenciais.

2.2.2. Telhas de Ferrite

Uma solução alternativa para aplicações em absorvedores de RF em câmaras anecoicas é o uso de telhas de ferrite (Hemming, 2002). A Figura 4 ilustra uma placa de ferrite, o furo no centro da placa é utilizado para sua fixação em estruturas. O grande diferencial desse tipo de absorvedor está em seu volume reduzido em comparação às espumas dielétricas, além de sua imunidade ao fogo, à umidade e a produtos químicos, o que o torna um material mais robusto e seguro (Hemming, 2002). Seu funcionamento baseia-se no princípio de que, quando uma onda eletromagnética que se propaga no espaço livre encontra um meio diferente, a onda pode ser refletida, transmitida e/ou absorvida. Nas placas de ferrite, a espessura é ajustada de forma que as fases relativas da onda refletida e da onda transmitida se cancelem, resultando em uma condição de perda ressonante ampla (Hemming, 2002).

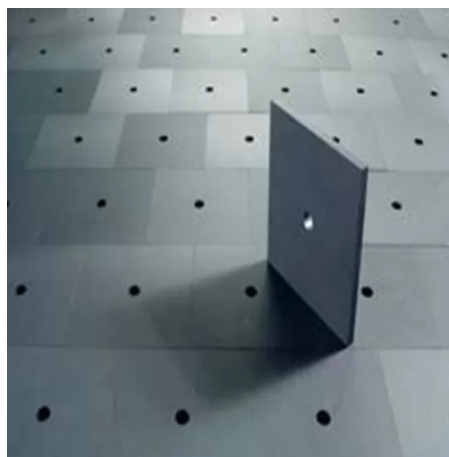


Figura 4 - Exemplo de Telha de Ferrite

Fonte: Changzhou Haozhuo Electronic Co., Ltd. (2025).

Com relação à aplicação das telhas de ferrita, este material apresenta melhor eficiência na faixa de baixas frequências, geralmente abaixo de 1 GHz, devido às propriedades magnéticas que conferem elevada permeabilidade e favorecem a adaptação de impedância para ondas de maior comprimento (Gomes, 2017). Essa característica é oriunda, principalmente, da capacidade do material dissipar energia eletromagnética por

meio de perdas magnéticas, sendo desta forma largamente usado em medições de baixas frequências.

Por outro lado, este tipo de absorvedor se degrada rapidamente conforme a frequência aumenta sendo ineficiente para frequências mais elevadas (Chung; Chuah, 2003). Acima de aproximadamente 1 GHz a espessura física das propriedades inerentes da ferrita deixam de oferecer uma absorção significativa, aumentando os coeficientes de reflexão que é definido como a razão entre a amplitude da onda refletida e a amplitude da onda incidente (Alexander; Sadiku, 2021). Para contornar essa limitação a literatura indica o uso de estruturas híbridas que serão expostas posteriormente neste trabalho (Chung; Chuah, 2003).

2.2.3. Absorvedores Híbridos

A combinação das duas tecnologias apresentadas anteriormente resulta nos absorvedores híbridos, que exigem compatibilidade crítica entre as propriedades do ferrite e da espuma dielétrica, o que torna complexa a manipulação de seus materiais (Holloway *et al.*, 1997). A Figura 5 apresenta a disposição dos absorvedores piramidais e das placas de ferrite na formação do modelo híbrido. Essa abordagem mostra-se eficaz quando se busca cobrir uma ampla faixa de frequências, como de 30 MHz a 18 GHz, utilizando um único tipo de absorvedor (Chung; Chuah, 2003). O uso de absorvedores híbridos tem sido considerado ideal em câmaras destinadas a aplicações gerais, nas quais a versatilidade de medição é essencial (Chung; Chuah, 2003).

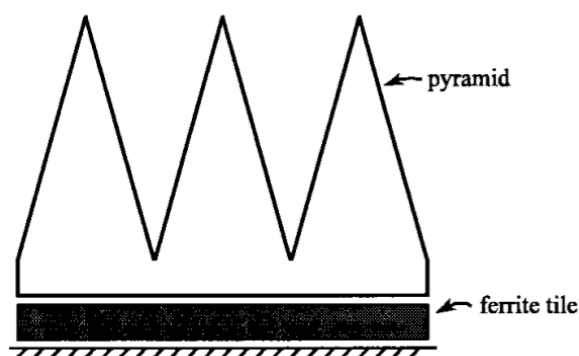


Figura 5 - Absorvedor híbrido formado por um absorvedor piramidal fixado sobre uma placa de ferrite.

Fonte: (Holloway *et al.*, 1997).

Nessa configuração, uma camada frontal de espuma piramidal é instalada sobre um substrato de telhas de ferrite, permitindo que as propriedades magnéticas da ferrite atenuem os componentes de baixa frequência, enquanto a espuma absorve as altas frequências (Hemming, 2002). A Figura 6 ilustra um absorvedor híbrido, no qual os absorvedores piramidais se encaixam nos intervalos formados pelas placas de ferrite.

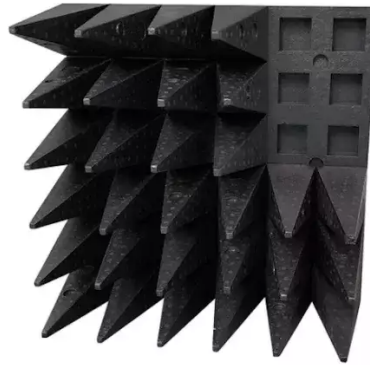


Figura 6 - Absorvedor híbrido composto por placas de ferrite e absorvedores piramidais
Fonte: MVG (2025).

Com a apresentação dos três principais tipos de absorvedores utilizados as próximas seções deste trabalho vão abordar os principais fatores que influenciam o arranjo dos absorvedores geometria da instalação, o tipo de medição e faixa de frequência.

2.3. Geometrias de Câmaras Anecoicas

Entre as alternativas existentes, duas tipologias se destacam: as câmaras retangulares, disposta na Figura 9, que constituem a configuração mais tradicional devido à simplicidade construtiva, menor custo e facilidade de aplicação dos absorvedores, e as câmaras afuniladas (*tapered*), que exploram princípios de ótica geométrica para otimizar a incidência normal das ondas sobre os absorvedores e reduzir as reflexões especulares internas, exposta na Figura 11 (Chung; Chuah, 2003). A escolha da geometria, portanto, não é apenas um aspecto arquitetônico, mas um fator determinante para a criação de um ambiente controlado (Alfaro, 2006).

2.3.1. Câmaras Anecoicas x Câmaras semianecoicas

Nesse contexto, é importante destacar a diferença entre as câmaras anecoicas e as semianecoicas. As câmaras anecoicas completas possuem absorvedores em todas as superfícies internas, simulando condições ideais de campo livre. A Figura 7 apresenta uma câmara anecoica, na qual é possível observar duas antenas — uma transmissora e outra sob teste — posicionadas para a realização das medições. Outro aspecto relevante é que todas as faces internas da estrutura são revestidas com material absorvente de radiofrequência (RF).

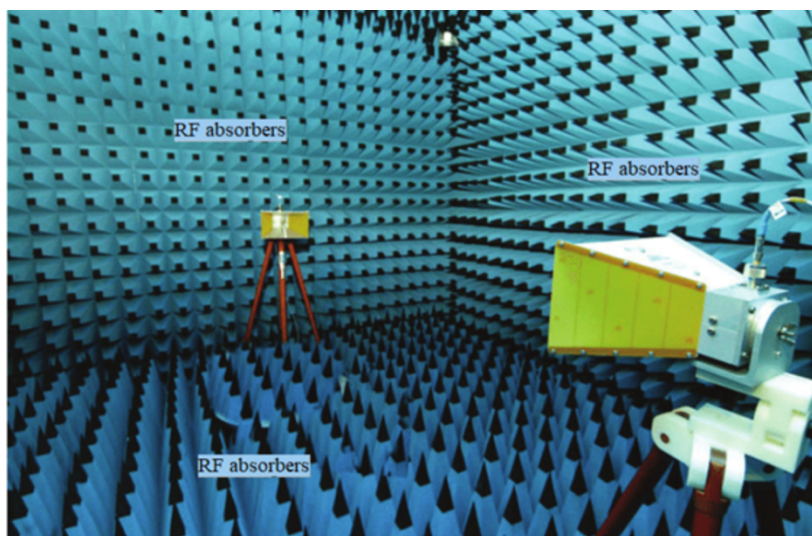


Figura 7 - Câmara anecoica com absorvedores nas paredes e piso

Fonte: EMC Directory (s.d.).

As câmaras semianecoicas começaram a ser empregadas para medições de emissão na década de 1970, como alternativa aos locais de teste em área aberta. Essas estruturas possuíam um piso condutor, enquanto as demais superfícies internas eram revestidas por materiais absorvedores (Holloway *et al.*, 1997). Diferentemente das câmaras totalmente anecoicas, as semianecoicas mantêm o piso refletivo e aplicam absorvedores apenas nas paredes e no teto, criando um ambiente parcialmente livre de reflexões. A Figura 8 ilustra uma câmara semianecoica que não possui material absorvente em seu piso.

Essa configuração reduz custos e complexidade construtiva, sendo amplamente utilizada em medições de antenas e em ensaios de compatibilidade eletromagnética (CEM). Dessa forma, as câmaras semianecoicas representam um equilíbrio eficiente entre

desempenho e custo, adequando-se bem a aplicações industriais e a testes de dispositivos eletrônicos (Balanis, 2016; Rodriguez; Fischer, 2016).

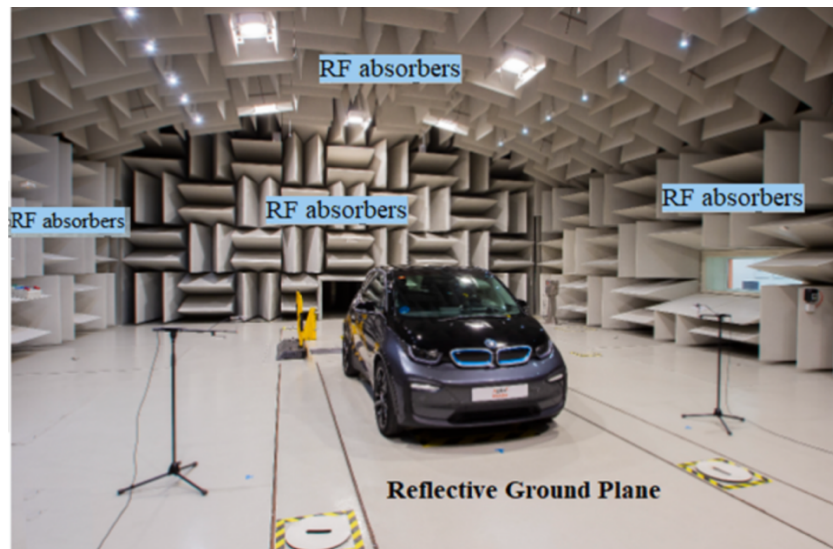


Figura 8 - Câmara semianecoica sem absorvedores em seu piso

Fonte: EMC Directory (s.d.).

O objetivo fundamental da geometria de uma câmara anecoica é garantir que a AUT seja avaliada em condições livres de interferências externas e internas, simulando com precisão o campo livre. Nesse sentido, cada configuração apresenta vantagens específicas que serão explicitadas nos próximos tópicos (Alfaro, 2006; Balanis, 2016).

2.3.2. Câmaras Anecoicas Retangulares

Projetos de formato retangular apresentam, em geral, grande versatilidade dimensional, podendo variar desde pequenos recintos, semelhantes a escritórios, até grandes instalações. Normalmente, as câmaras utilizadas em testes de antenas seguem uma razão de aspecto próxima de 2:1 entre o comprimento e a largura. A adoção dessa proporção garante que o ângulo de incidência permaneça inferior a 60° , uma vez que ângulos superiores a esse limite tendem a degradar a eficiência dos absorvedores. (Hemming, 2002).

Nessa configuração, posiciona-se uma antena transmissora em uma das extremidades do compartimento e a AUT na extremidade oposta. Esse arranjo tem como objetivo assegurar que os sinais de visada direta cheguem em níveis superiores àqueles

provenientes de reflexões no teto, piso e paredes laterais da câmara, os quais são revestidos com MARE para atenuar a reflexão eletromagnética (Balanis, 2016).

A Figura 9 ilustra um exemplo de câmara anecoica retangular com o posicionamento das antenas previamente descrito, além disso, é possível observar na figura a utilização de um gerador de ondas ligado a antena da direita, antena emissora, e um osciloscópio conectado a AUT, antena da esquerda.

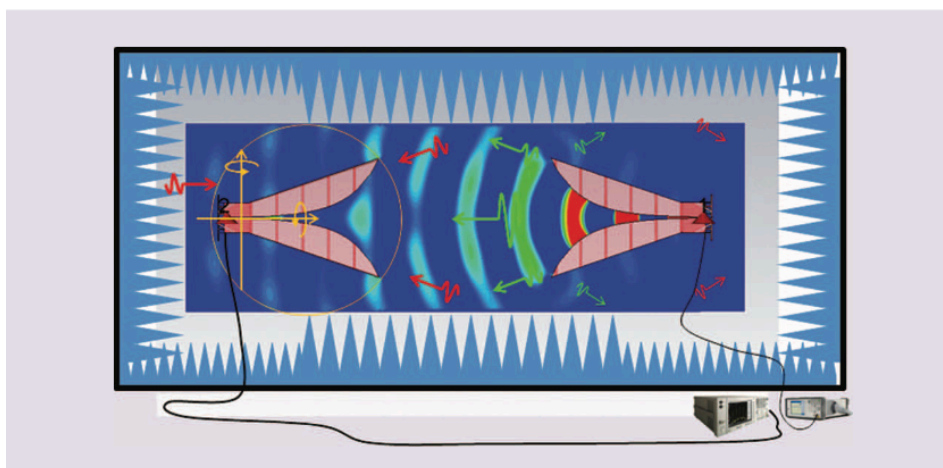


Figura 9 - Câmara Anecoica Retangular

Fonte: Rodriguez e Fischer (2016)

O nível de energia refletida depende tanto da quantidade de energia irradiada pela antena fonte que incide sobre as superfícies quanto do grau de energia espúria que pode ser tolerado na região de teste, sendo ambos parâmetros dependentes da frequência de operação. É relevante destacar que o desempenho deste tipo de geometria é fortemente condicionado pela eficiência de seus absorvedores (Hemming, 2002; Balanis, 2016).

Por outro lado, os absorvedores empregados em câmaras de geometria retangular apresentam maior tendência ao espalhamento das ondas incidentes. Isso ocorre porque parte da energia refletida pelas superfícies internas pode se somar às ondas provenientes da linha de visada direta entre as antenas, produzindo padrões de interferência construtiva e destrutiva dentro da QZ. A Figura 10 ilustra as emissões direta e emissões refletidas que podem chegar QZ. Como resultado, formam-se variações indesejadas de campo elétrico, comprometendo a uniformidade do campo e a precisão das medições realizadas.

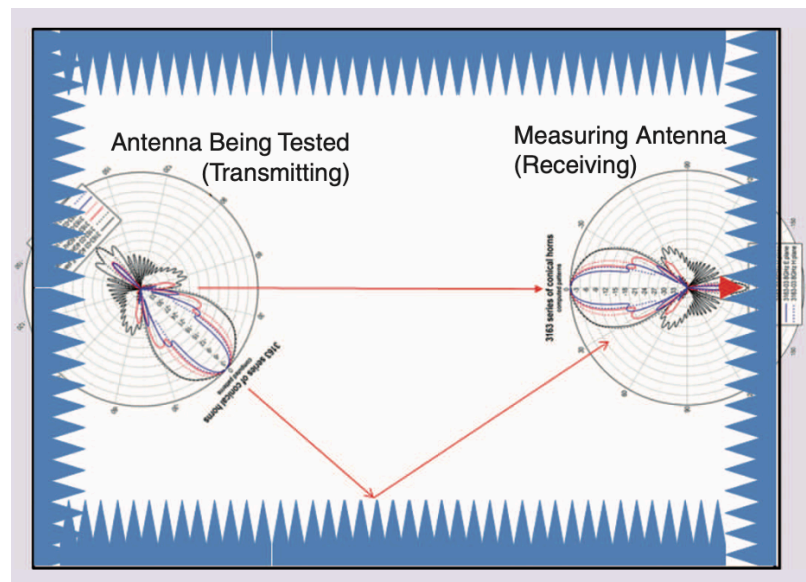


Figura 10 - Exemplo de emissões direta e refletidas chegando na antena de medição.

Fonte: Rodriguez e Fischer (2016).

Essa limitação torna-se mais evidente em frequências mais baixas, nas quais o desempenho dos absorvedores piramidais diminui significativamente. Nesses casos, o comprimento de onda é comparável às dimensões físicas das pirâmides, reduzindo a eficiência da absorção e exigindo estruturas de maior volume para atingir os níveis de atenuação adequados. Tal necessidade implica aumento substancial no tamanho e no custo total da câmara, sendo esse um dos principais fatores que motivaram o desenvolvimento das câmaras de geometria afunilada, que permitem melhor controle da propagação e do amortecimento das ondas refletidas (Chung; Chuah, 2003)

2.3.3. Câmaras Anecoicas Afuniladas

O avanço tecnológico, aliado à necessidade crescente de realizar estudos em frequências inferiores a 1 GHz, possibilitou que, na década de 1960, fosse desenvolvida uma solução para que as câmaras anecoicas realizassem testes com a precisão requerida, com o surgimento das chamadas câmaras anecoicas afuniladas, (Chung, Chuah, 2003).

A Figura 11 apresenta um exemplo de câmara anecoica afunilada, na ilustração é possível notar que a geometria difere bastante das câmaras retangulares.

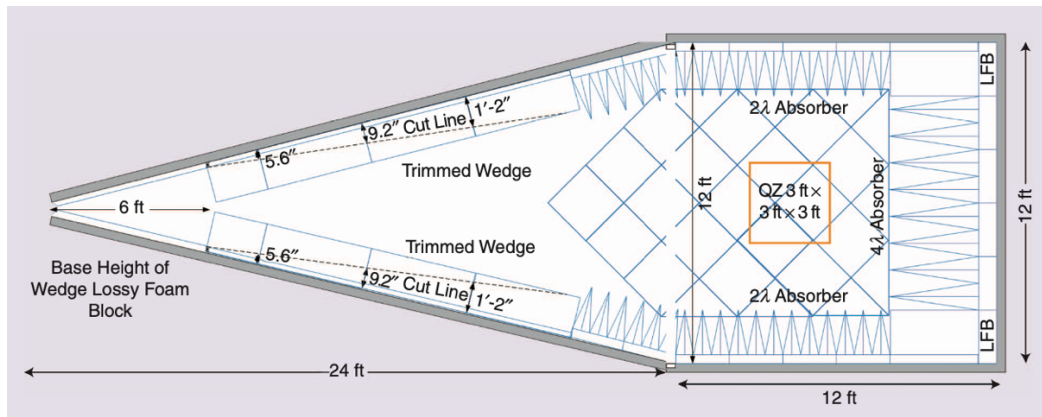


Figura 11 - Câmara Anecoica Afunilada.

Fonte: Rodriguez e Fischer (2016).

Nesse período, verificou-se que não era possível obter uma supressão adequada das reflexões laterais nas câmaras retangulares (Chung, Chuah, 2003). Como alternativa, foi concebido um projeto de câmara que aproveitava a energia refletida das paredes laterais para controlar a iluminação da região de teste, empregando uma geometria cônica ou em funil ao redor da antena fonte, de maneira oposta aos absorvedores das câmaras retangulares que visava atenuar reflexões (Hemming, 2002).

A Figura 12 apresenta o comportamento das ondas eletromagnéticas no interior das duas geometrias de câmaras anecoicas analisadas. A figura (a) mostra as reflexões internas em uma câmara retangular, onde os absorvedores dispostos nas paredes laterais e no teto reduzem significativamente as ondas refletidas, atenuando-as por meio de múltiplas reflexões sucessivas até sua absorção completa. Já a figura (b) ilustra o comportamento das ondas em uma câmara afunilada (*tapered*), na qual a geometria convergente das paredes é projetada para redirecionar as reflexões em direção à região central de testes, onde se encontra a AUT, garantindo uma iluminação mais uniforme e controlada do campo elétrico.

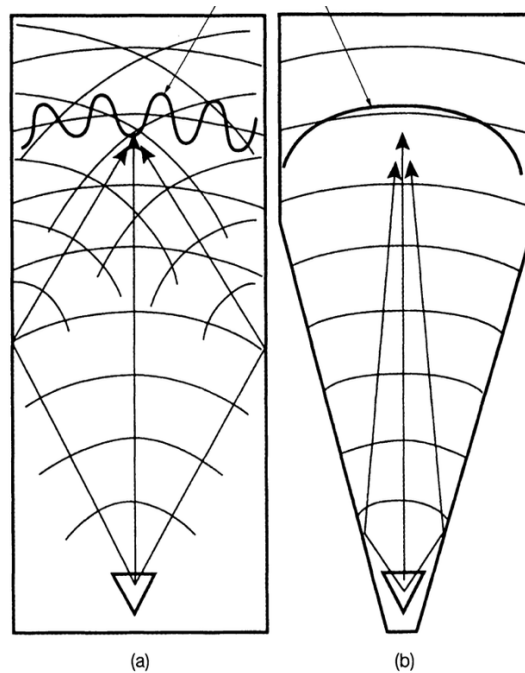


Figura 12 - (a) Representa as reflexões ocorridas no interior de uma Câmara Retangular enquanto (b) representa as reflexões no interior de uma Câmara Afunilada

Fonte: Hemming (2002)

As câmaras afuniladas têm como principais aplicações as medições de antenas em baixas frequências. Essa geometria surge como uma solução eficiente para os desafios relacionados ao desempenho dos absorvedores nessa faixa espectral. O formato cônico ou em funil direciona as ondas refletidas para fora da QZ, reduzindo a interferência entre as ondas diretas e as refletidas, o que resulta em um campo mais uniforme e medições mais precisas. Esse tipo de configuração é especialmente vantajoso em aplicações que envolvem antenas de grande porte e de baixa frequência, incluindo aquelas utilizadas em sistemas de satélite (Hemming, 2002).

Uma das principais vantagens das câmaras afuniladas é a redução da quantidade e da espessura dos materiais absorvedores necessários para alcançar o mesmo desempenho em baixas frequências, o que pode representar economia significativa em projetos de grande escala (Balanis, 2016).

Contudo, essa vantagem vem acompanhada de uma maior complexidade construtiva, já que a execução de uma câmara afunilada exige cortes inclinados, alinhamento preciso e, muitas vezes, ajustes empíricos após a montagem para atingir o desempenho ideal na QZ (Rodriguez; Fischer, 2016). Assim, enquanto as câmaras retangulares se destacam pela simplicidade e menor custo estrutural, as *tapered* oferecem desempenho superior em baixas frequências, ainda que com maior desafio de engenharia e instalação (Chung; Chuah, 2003).

O presente capítulo apresentou os principais absorvedores e geometrias empregados na construção de câmaras anecoicas, ressaltando como esses elementos estruturais criam as condições necessárias para a realização de ensaios controlados. Na sequência, serão discutidas três abordagens distintas de caracterização de antenas possíveis nesses ambientes: a iluminação direta em campo distante, as análises em campo próximo e as avaliações em *Compact Range* (CR).

2.4. Seleção do tipo de medição

A escolha do tipo mais adequado depende diretamente da frequência de operação e da dimensão da AUT, que destacam as vantagens e limitações práticas de cada configuração (Rodriguez e Fischer, 2016).

O campo próximo reativo é a região mais próxima da antena, sua principal característica é o predomínio de campos armazenados resultando num espaço onde não há propagação, desta forma, esta região se torna inapropriada para a realização de medições de radiação, sendo mais aplicada para cálculos de impedância (Balanis, 2016).

Em seguida, encontra-se o campo radiante próximo (ou região de Fresnel), no qual já há propagação parcial das ondas eletromagnéticas, mas a distribuição angular do campo ainda depende da distância. Essa região pode ser aproveitada em medições experimentais com o uso de técnicas de transformação de campo próximo para campo distante (Jannuzzi, 2022).

A região de campo distante, também conhecida como região de Fraunhofer, corresponde à distância radial a partir da antena na qual a frente de onda pode ser considerada plana e o campo eletromagnético apresenta uma distribuição angular estável. Nessa região, os lóbulos de radiação — principal, laterais e nulos — mantêm-se constantes, não variando com a distância (Balanis, 2016). A Figura 13 apresenta a disposição das regiões de campo próximo reativo, campo próximo radiante e campo distante. Nela, R_1 indica o limite de transição para o campo próximo radiante, enquanto R_2 representa o critério de início da região de campo distante.

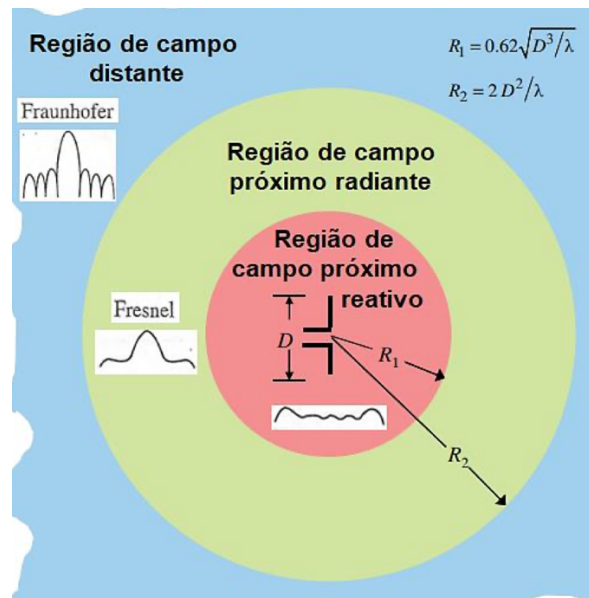


Figura 13 - Região de campo próximo reativo, campo próximo radiante e campo distante

Fonte: (Jannuzzi, 2022).

A condição de campo distante apresenta a vantagem de permitir a medição do padrão de radiação da antena sem a necessidade de grandes distâncias entre os equipamentos, possibilitando uma caracterização precisa por meio da Equação de Friis. Esse fator será particularmente relevante na fase de análise dos resultados, sendo posteriormente discutido ao longo deste trabalho. A distância mínima necessária para que a região de Fraunhofer seja estabelecida é determinada pela Equação (1) (Balanis, 2016).

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

Em que R representa a distância até o ponto de observação (m), D corresponde à maior dimensão física da antena (m) e λ é o comprimento de onda da radiação (m).

Por outro lado, para em antenas pequenas, condizentes com modelagens em frequências de micro-ondas, é possível realizar uma aproximação nos cálculos da distância R com o uso da regra prática presente na Equação (2) (Rodriguez; Fischer, 2016.)

$$R \approx 10\lambda \quad (2)$$

Com base nas Equações (1) e (2) e considerando uma antena que possua o valor de sua maior dimensão D com 0,165 mm, podemos calcular o valor esperado de campo distante (R) para as frequências das componentes da faixa da banda X espaçadas de 1 em 1 GHz conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Distâncias de campo distante calculadas pela regra prática e pelo critério de Fraunhofer.

Frequência (GHz)	Comprimento de onda (m)	Campo Distante - Fraunhofer (m)	Campo Distante regra prática (m)
8	0,0375	1,45	0,38
9	0,0333	1,64	0,33
10	0,03	1,81	0,3
11	0,0273	1,99	0,27
12	0,0251	2,18	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base nos dados da Tabela 1, é fácil notar que utilizando a regra prática para a medida do campo distante é possível reduzir consideravelmente o espaço físico necessário para realizar as medições. Como o projeto apresentado neste trabalho se propõe a ser realizado com baixo custo e complexidade esta aproximação torna-se fundamental para que estes requisitos sejam atendidos.

Há ainda um mais um tipo de medição a CR que é uma solução frequentemente empregada para medições de antenas de grandes dimensões elétricas, especialmente quando os testes em campo distante (*far-field*) não são economicamente viáveis. A CR utiliza um refletor parabólico para gerar uma onda plana na zona de teste, simulando as condições do campo distante em um espaço fisicamente limitado (Rodriguez; Fischer, 2016).

Apesar das vantagens de simular o campo distante em um espaço menor, a eficácia da CR depende fortemente do tamanho do refletor parabólico, que transforma as ondas curvas em ondas planas dando origem a um campo plano (Rodriguez; Fischer, 2016). A precisão do campo plano gerado é diretamente relacionada à geometria da superfície refletora, ao alinhamento da fonte e ao acabamento da superfície, o que demanda alto rigor construtivo (Rodriguez; Fischer, 2016). O padrão de radiação da CR pode ser altamente diretivo (acima de 25 dBi), o que exige controle rigoroso sobre a energia refletida pelas paredes laterais e pelo piso da câmara. Isso implica, por exemplo, o uso de absorvedores com espessuras específicas, que mesmo assim podem não atingir a refletividade ideal em certas direções (Rodriguez; Fischer, 2016).

No contexto de aplicações na banda X, o uso da CR apresenta limitações importantes. Embora a CR possa operar até 200 GHz, o desempenho ideal ocorre quando o refletor é suficientemente grande para gerar uma QZ que cubra toda a AUT. Entretanto, na banda X, mesmo antenas de dimensões moderadas podem exigir QZs de 30 cm a 50 cm, o que implica refletores grandes e caros (Rodriguez; Fischer, 2016). Além disso, a geometria de iluminação da CR pode introduzir erros se a energia refletida não for adequadamente atenuada, algo que se torna mais crítico conforme aumenta a frequência (Rodriguez; Fischer, 2016). Sendo assim, para projetos de câmaras anecoicas voltados à banda X, principalmente em ambientes com restrições de espaço e custo, a CR não se apresenta como a opção mais indicada (Rodriguez; Fischer, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo aplica os conhecimentos adquiridos no referencial teórico para estabelecer as diretrizes do projeto, com o objetivo de reduzir a complexidade construtiva da câmara semianecoica. Para isso, são apresentados e discutidos os cálculos dimensionais necessários à elaboração física do protótipo, contemplando as relações geométricas e eletromagnéticas envolvidas.

Além disso, são descritos e analisados os parâmetros adotados na montagem, incluindo materiais, instrumentos e equipamentos utilizados tanto na construção da câmara quanto nas medições e testes experimentais realizados.

3.1. Dados Iniciais do Projeto

Na frequência proposta, 9 GHz, os absorvedores dielétricos piramidais apresentam desempenho superior aos demais, os outros tipos de absorvedores disponíveis não oferecem bom rendimento nessa faixa o que acarretaria aumentos de custo desnecessários para compensar essa deficiência, com isso, justifica-se sua adoção neste projeto, conforme discutido no capítulo anterior.

Quanto à geometria selecionada, a câmara foi projetada no formato retangular semianecoico, visando reduzir a complexidade construtiva e o custo do projeto.

Outro fator relevante para a adoção desse formato pode ser observado na análise comparativa do desempenho de atenuação entre as geometrias retangular e afunilada. A Figura 14 apresenta a relação entre a refletividade (em decibéis) e a frequência (em megahertz – MHz) para ambos os formatos.

Ao analisar o gráfico, observa-se que, à medida que a frequência aumenta, o desempenho da câmara retangular supera o da afunilada. A faixa de frequência adotada neste projeto está destacada em vermelho, indicando a região de interesse para o dimensionamento e os testes realizados, próximo de 10 GHz.

Além disso, as câmaras anecoicas afuniladas requerem um alinhamento mais preciso, característica que aumentaria a complexidade do projeto.

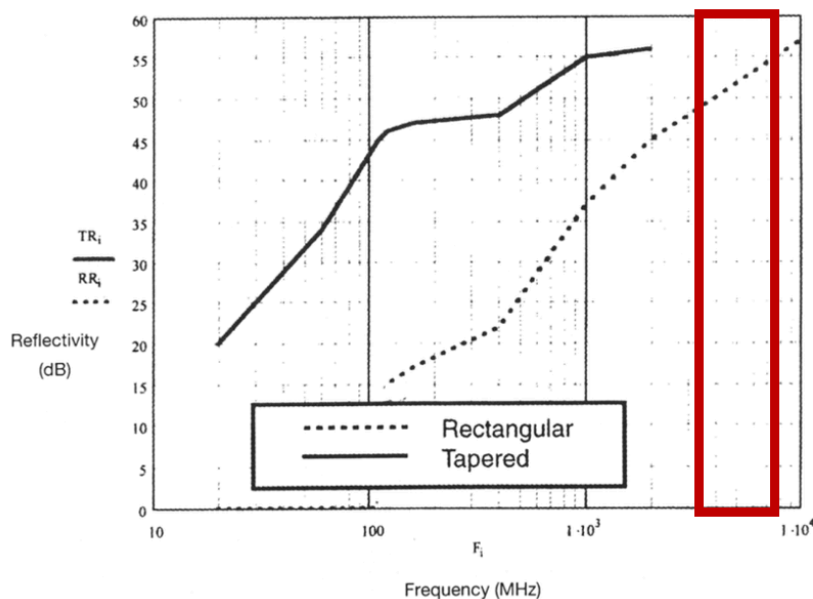


Figura 14 - Refletividade em função da frequência para câmaras retangulares e afuniladas.

Fonte: Adaptado de Hemming (2002).

Optou-se pela técnica de medição em campo distante por proporcionar maior precisão em comparação ao campo próximo, uma vez que os cálculos realizados nessa região não necessitam considerar a influência dos campos reativos, os quais poderiam comprometer a exatidão das medições (Saunders; Aragón-Zavala, 2007). A técnica baseada em *Compact Range* (CR) não foi adotada por demandar grandes espaços físicos, além de antenas parabólicas de grandes dimensões e equipamentos de alta precisão (Rodríguez; Fischer, 2016).

Além disso, a análise em campo distante permite a aplicação direta da Equação de Friis, que será utilizada na avaliação dos resultados apresentados no Capítulo 4 (Saunders; Aragón-Zavala, 2007). Essa abordagem contribui para reduzir as dimensões da câmara e simplificar o projeto, resultando em menor número de absorvedores e, consequentemente, redução do custo total de implementação.

3.2.Cálculos Dimensionais

Considerando as opções selecionadas, uso de absorvedores dielétricos piramidais, adoção da geometria retangular e realização de medições em campo distante, o primeiro fator a ser dimensionado é a distância de campo distante R . Para isso, considera-se uma

câmara anecoica projetada para operar na faixa de frequência de 9 GHz e, por meio da Equação (3) é obtido o valor do comprimento de onda (Halliday; Resnick; Walker, 2016).

$$c = \lambda \cdot f \quad (3)$$

Onde c representa a velocidade da luz, f a frequência e é obtido comprimento de onda λ de 3,33 cm.

Aplicando a Equação (1) e adotando o comprimento de onda proposto, e o valor de maior dimensão da AUT de 165 mm, obtém-se uma distância de campo distante de aproximadamente 1,65 m. Dessa forma, garantindo-se essa separação mínima entre a antena transmissora e a AUT, assegura-se que a medição ocorra sob condição de campo distante para a faixa de operação definida.

O primeiro parâmetro a ser calculado é a espessura dos absorvedores a serem utilizados na câmara, em função da frequência de operação prevista. Para esse fim, será empregada a aproximação que estabelece como regra prática que o absorvedor deve apresentar atenuação mínima de -25 dB até o ângulo de incidência de 50°. Nessa abordagem, o dimensionamento deve atender à Equação (4) (Rodriguez; Fischer, 2016).

$$t = 2\lambda \quad (4)$$

Em que t representa a espessura do absorvedor e λ o comprimento de onda já estabelecido como 3,3 cm. Assim, para a faixa de frequência proposta, adota-se a espessura de 6,6 cm.

Além da regra prática apresentada, para uma maior confiabilidade no projeto também se utiliza o requisito comum para câmaras de teste em micro-ondas é a refletividade máxima de -40 dB na menor frequência de operação (Hemming, 2002).

Tabela 2 - Características dos absorvedores piramidais (tipos P-4 a P-72)

Tipo	Altura (cm)	Peso (kg)	Número de pirâmides por peça	Refletividade em incidência normal (dB) para frequência de 10 GHz
P-4	10,9	1,4	144	42
P-6	15,2	1,6	100	45
P-8	20,3	2,0	64	50
P-12	30,5	2,7	36	50
P-18	45,7	5,4	16	50

P-24	61	7,7	9	50
P-36	91,4	10,9	4	50
P-48	121,9	17	2	50
P-72	182,9	23	1	50

Fonte: Adaptado de Hemming (2002).

Analisando os principais tipos de painéis piramidais disponíveis no mercado, observa-se que a Tabela 2 apresenta as principais características dos produtos comercializados pela indústria. Com base nos dados de refletividade em incidência normal, constata-se que os absorvedores piramidais mais difundidos atendem ao requisito de desempenho, o que reduz a complexidade do projeto e viabiliza o uso de materiais amplamente acessíveis no mercado. A Figura 15 ilustra as placas absorvedoras dispostas na Tabela 2.

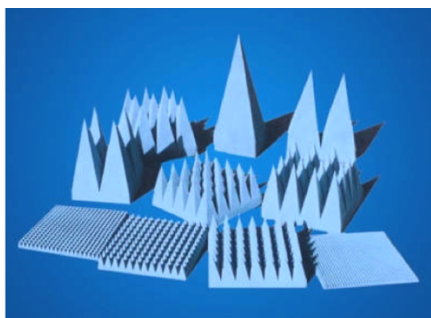


Figura 15 - Exemplos de absorvedores

Fonte: Dongshin Microwave (2014) *apud* (Jung *et al.*, 2016, p. 22).

Para a continuidade dos cálculos, é necessário definir a maior dimensão da antena sob teste (AUT). Antenas típicas utilizadas nesse tipo de aplicação incluem cornetas, espirais, dipolos log-periódicos e pequenos arranjos de patch, cujas aberturas geralmente apresentam diâmetro inferior a 0,23 m (0,75 ft) (Hemming, 2002).

No presente projeto, a antena adotada possui maior dimensão D igual a 165 mm. As demais características das antenas empregadas serão apresentadas nas seções seguintes deste trabalho.

A partir dessa dimensão, determina-se o tamanho elétrico n da AUT por meio da Equação (5), que relaciona a maior dimensão física da antena ao comprimento de onda correspondente.

$$n = \frac{D}{\lambda} \quad (5)$$

Esse parâmetro é fundamental no dimensionamento da região de teste (QZ) em câmaras anecoicas, a qual deve englobar integralmente a antena sob ensaio, assegurando condições adequadas de campo distante. Com base nos valores estipulados anteriormente, $D=165$ mm e $\lambda = 3,3$ cm obtém-se $n \approx 5$ (Rodriguez; Fischer, 2016).

A próxima dimensão a ser determinada é o comprimento da câmara (L), obtido por meio da Equação (6).

$$L = (2n^2 + n + 2 + t + K)\lambda \quad (6)$$

Para esse cálculo, utilizam-se os valores já determinados de $n \approx 5$, $t = 6,6$ cm e $\lambda = 3,3$ cm, sendo ainda necessário adotar parâmetros adicionais. Tipicamente considera-se $K=4$, valor utilizado para garantir uma margem de segurança no projeto, contemplando o espaço da fonte e a inserção de absorvedores adicionais assim (Rodriguez e Fischer, 2016). Substituindo os valores na Equação (6), obtém-se:

$$L = (50 + 5 + 2 + 6,6 + 4) \cdot 3,3 = 223,08 \text{ cm}$$

Após o cálculo do comprimento da câmara (L), como os valores de n , t e λ já são conhecidos, torna-se necessário definir o ângulo de incidência (θ).

A Figura 16 apresenta um gráfico em que a refletividade é expressa em decibéis (eixo vertical), em função da espessura do absorvedor piramidal, representada em múltiplos do comprimento de onda (λ), no eixo horizontal.

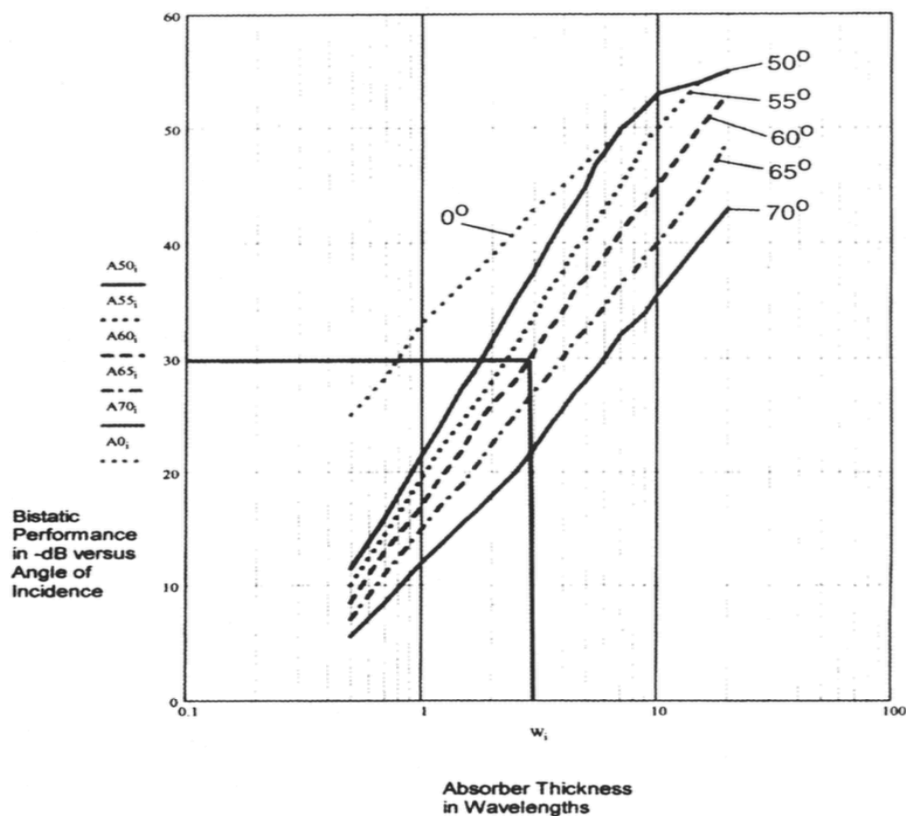


Figura 16 - Gráfico do desempenho dos absorvedores em função do ângulo de incidência

Fonte: Hemming (2002).

Os absorvedores utilizados neste projeto possuem espessura de 30 cm, e serão discutidos detalhadamente neste capítulo. Considerando o comprimento de onda de 3,3 cm, a espessura equivalente em múltiplos de comprimento de onda é de aproximadamente 10λ .

Levando esse valor em consideração e adotando a regra prática segundo a qual os absorvedores devem apresentar desempenho mínimo de -40 dB (Hemming, 2002), observa-se que um ângulo de incidência de 60° atende aos requisitos do projeto.

Obtidas as variáveis, a Equação (7) dimensiona a largura interna da câmara (Rodriguez; Fischer, 2016).

$$W = (2n^2 \cdot \cot(\theta) + 2t)\lambda \quad (7)$$

Utilizando os valores de $n \approx 5$, $t = 6,6$ cm, $\lambda = 3,3$ cm e $\theta = 60^\circ$, calculamos:

$$W = (2 \cdot 5^2 \cdot 0,577 + 2 \cdot 6,6) \cdot 3,3 = 138,8 \text{ cm}$$

Dessa forma, é obtido o valor de largura $W \approx 1,39$ m, confirmando a regra prática que recomenda valores de θ entre 45° e 60° para projetos compactos de câmaras anecoicas (Rodriguez; Fischer, 2016).

Também é relevante observar que o mesmo procedimento adotado para o cálculo da largura (W) pode ser aplicado ao eixo vertical, a fim de determinar a altura (H). Dessa forma, conclui-se que $W \approx H$ (Rodriguez; Fischer, 2016).

Os cálculos de L e W , realizados respectivamente pelas Equações (6) e (7), apresentam maior rigor técnico, incorporando valores adicionais que aumentam a margem de segurança do projeto, sendo, portanto, mais conservadores (Rodriguez; Fischer, 2016). Por outro lado, é possível adotar como valor de campo distante (R) o equivalente a 10λ , conforme apresentado na Equação (2), obtendo-se assim $R = 0,33$ m.

Além disso, outra regra prática pode ser empregada para reduzir o tamanho do projeto: admite-se o valor mínimo necessário para o funcionamento, assumindo que o comprimento da câmara (L) seja igual à distância de campo distante, conforme a Equação (8) (Hemming, 2002).

$$L = R \quad (8)$$

Utilizando esta aproximação é calculado o valor de $L = 0,33$ m.

Para o cálculo da largura interna também é possível realizar uma aproximação adotando o disposto na Equação (9) (Hemming, 2002).

$$W \geq \frac{R}{2} \quad (9)$$

Com base nesse cálculo se obtém o valor de $W = 0,165$ m. O mesmo conceito é aplicado para a altura H .

Considerando que o presente trabalho tem como premissa a redução da complexidade do projeto, optou-se pela adoção dos valores práticos de L , W e H , que, embora não contemplem a margem adicional dos cálculos conservadores, asseguram as dimensões essenciais para a viabilidade da montagem e operação da câmara. Para projetos futuros que visem alcançar maior grau de confiabilidade e precisão, recomenda-se a aplicação dos métodos e valores calculados neste trabalho com base nas equações mais conservadoras.

Em resumo, com base nos dados obtidos, a Tabela 3 apresenta, de forma consolidada, todos os parâmetros calculados durante o processo de dimensionamento da câmara semianecoica.

Nela estão reunidos os valores correspondentes às condições de projeto, possibilitando uma visão geral dos parâmetros mínimos teóricos necessários à execução do protótipo.

Tabela 3 - Resumo dos parâmetros do projeto

Parâmetro	Valor Teórico	Valor Prático
Frequência de operação	9 GHz	9 GHz
Comprimento de onda (λ)	0,0333 m	0,0333 m
Maior dimensão da AUT (D)	0,165 m	0,165 m
Tamanho elétrico da AUT (n)	5	5
Espessura elétrica do absorvedor (t)	$2\lambda \approx 0,066$ m	$2\lambda \approx 0,066$ m
Folga longitudinal (K)	4	Não aplicável
Largura interna da câmara (W)	1,39 m	0,165 m
Altura interna da câmara (H)	$\approx W \approx 1,39$ m	$\approx W \approx 0,165$ m (*) 1,22 m (**)
Comprimento da câmara (L)	2,23m	0,33 m (*) 1,22 m (**)
Distância mínima de campo distante (R)	1,65 m	0,33 m
Formato da câmara	Retangular (semianecoica)	Retangular (semianecoica)
Tipo de medição	Campo distante (<i>far-field</i>)	Campo distante (<i>far-field</i>)
Tipo de absorvedor	Dielétrico (piramidal)	Dielétrico (piramidal)

Nota: (*) valor mínimo calculado, (**) valor utilizado no projeto.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, observa-se que, utilizando as dimensões teóricas – $L = 2,23$ m e $W \approx H \approx 1,39$ m – obtém-se um volume aproximado de $4,30 \text{ m}^3$ para a câmara (Rodriguez; Fischer, 2016). Por outro lado, ao adotar o critério da regra prática para o projeto, definiu-se que $L = W = H = 1,22$ m, resultando em um volume de aproximadamente $1,81 \text{ m}^3$ (Hemming, 2002).

A comparação entre os dois cenários evidencia que a adoção da regra prática reduziu o volume total da estrutura em cerca de 57,8%. Essa diminuição significativa ressalta a relevância desse critério, pois permite reduzir as dimensões físicas da câmara sem comprometer sua funcionalidade para os ensaios propostos, além de diminuir

substancialmente o custo de aquisição de materiais e o custo operacional/laboratorial associado à construção, montagem e realização de medições experimentais.

3.3.Montagem do protótipo

A montagem do protótipo foi realizada no Laboratório de Micro-ondas, Potência e Fotônica (LaMP) localizado no campus da Universidade de São Paulo (USP), na Cidade Universitária. A Figura 17 apresenta a parte externa do prédio onde se localiza o laboratório.

O Laboratório de Micro-ondas de Potência e Fotônica (LaMP) tem competências para desenvolver tecnologias relacionadas com os amplificadores de micro-ondas, de alta potência, que empregam feixes de elétrons. Em particular, amplificadores klystrons e válvulas TWT. O LaMP possui, também, competência em projeto e desenvolvimento de radares do tipo *'phased array'* e, ainda, no desenvolvimento de lasers e dispositivos fotônicos. (PNIPE, s.d.)



Figura 17 - Prédio do Laboratório de Micro-ondas, Potência e Fotônica

Fonte: (PNIPE, s.d).

O modelo produzido possibilita a reprodução em escala reduzida das condições de projeto e a verificação experimental dos resultados teóricos. Além da descrição do processo de montagem, serão apresentadas as especificações dos materiais utilizados, o arranjo experimental adotado e os procedimentos de medição empregados, de modo a avaliar o desempenho da câmara semianecoica em termos de atenuação de sinais indesejados e adequação da região de teste (QZ). Outro fator relevante é que possibilitando a reprodução em escala reduzida das condições de projeto e a verificação experimental dos resultados teóricos.

3.3.1. Relação de Material Utilizado

Para a montagem da câmara semianecoica, foram utilizados os materiais listados na Tabela 4, tais como placas absorvedoras, antenas do tipo corneta, peças de madeira, parafusos, arruelas e cantoneiras, foram disponibilizados pelo LaMP. As peças de madeira foram cortadas de acordo com o dimensionamento da câmara e utilizadas na sustentação lateral e na base da estrutura.

Tabela 4 - Lista de matérias para construção da câmara semianecoica

Material	Quantidade	Observação
Placas Absorvedoras de Poliuretano (PU-RAM)	10	610 x 610 x 300 mm
Chapas MDF 3 mm	10	1,22 x 0,61 m
Peças de madeira perfil 40 x 40 mm	09	1,35 m
Braçadeiras plásticas Helerman	100	50 x 100 mm
Antena do tipo Corneta	02	Abertura: 10,22 x 165 mm
Osciloscópio Tektronix TPS 2012	01	Disponível no LaMP
Gerador de Sinais MXG N5183A (100kHz 20GHz)	01	Disponível no LaMP
Parafuso M5 x 8	88	Disponível no LaMP
Arruelas lisas 5 mm	88	Disponível no LaMP
Cantoneira	44	Disponível no LaMP

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os absorvedores piramidais de poliuretano representam o principal custo associado à montagem da câmara semianecoica. Esse tipo de material é fundamental para assegurar a atenuação adequada das ondas eletromagnéticas refletidas internamente, especialmente na faixa de micro-ondas. A maior parte dos absorvedores disponíveis no mercado nacional é importada, sendo comercializada por revendedores estrangeiros, principalmente do mercado chinês, o que eleva o custo final devido ao frete internacional e eventuais taxas de importação. Em média, cada placa apresenta um valor aproximado de USD 100 (US\$ 100), impacto significativo no orçamento total do projeto, sobretudo quando considerada a quantidade necessária para o revestimento interno completo da estrutura (EMC Shop [s.d.], p. 4).

Para medição foi utilizado um Osciloscópio Tektronix TPS 2012, que realizou a medição da voltagem dos sinais recebidos pela AUT, ilustrado pela Figura 18.



Figura 18 - Osciloscópio Tektronix TPS 2012

Fonte: Leasametric (2025).

Outro equipamento utilizado foi o Gerador de Sinais MXG N5183A, da marca Keysight, configurado para emitir sinais com potência de 5 dBm, os quais foram transmitidos no interior da câmara por meio da antena transmissora. A Figura 19 apresenta o gerador de sinais utilizado.

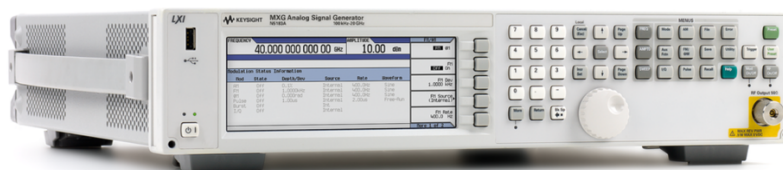


Figura 19 - Gerador de Sinais MXG N5183A

Fonte: Electro Rent (2025).

Ampliando os conhecimentos sobre os materiais empregados na construção da câmara semianecoica, os absorvedores de poliuretano utilizados apresentam densidade de potência de $1,5\text{kW/m}^2$ e atenuação de 40 dB para a frequência de 6 GHz e 50 dB para 10 GHz, atendendo aos requisitos de desempenho estabelecidos na seção 3.2 no qual afirma que o absorvedor deve ter refletividade máxima de - 40dB na frequência de operação (EMC Shop [s.d.], p. 4).

Para a utilização das antenas, foram considerados os dados teóricos preliminares apresentados na Tabela 5, referentes ao conjunto de antenas do tipo corneta.

Tabela 5 - Dados preliminares das antenas

Ganho (dBi)	Ângulo a meia potência (°)	Lóbulo Lateral (dB)	Abertura (WR90) (mm)	Altura (WR90) (mm)	Frequência de operação (GHz)	Potência (dBm)
13,3	90,9	-12,2	10,22 x 165	630 (TX)	9	5

				627 (RX)		
--	--	--	--	----------	--	--

Nota: (TX) indica a antena de transmissão e (RX) a antena de recepção.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3.2. Construção da Câmara

Descritos os materiais utilizados na construção da câmara semianecoica, esta seção apresenta os aspectos referentes à sua montagem. A Figura 20 ilustra a formatação final da câmara semianecoica compacta desenvolvida. As paredes laterais, superior e inferior, de coloração preta, são constituídas por chapas de MDF de 3 mm, responsáveis por garantir rigidez estrutural e acabamento superficial uniforme. Na região interna, observa-se o revestimento com absorvedores piramidais de poliuretano azul, dispostos de forma a maximizar a absorção das ondas eletromagnéticas incidentes, reduzindo reflexões indesejadas e mantendo a coerência das medições.

O molduramento externo em madeira natural confere rigidez e facilita o encaixe das placas, enquanto a base metálica fornece sustentação e estabilidade mecânica durante os ensaios experimentais. O processo de junção entre as placas de MDF e os absorvedores, bem como os métodos de vedação e fixação empregados, serão detalhados nas subseções seguintes

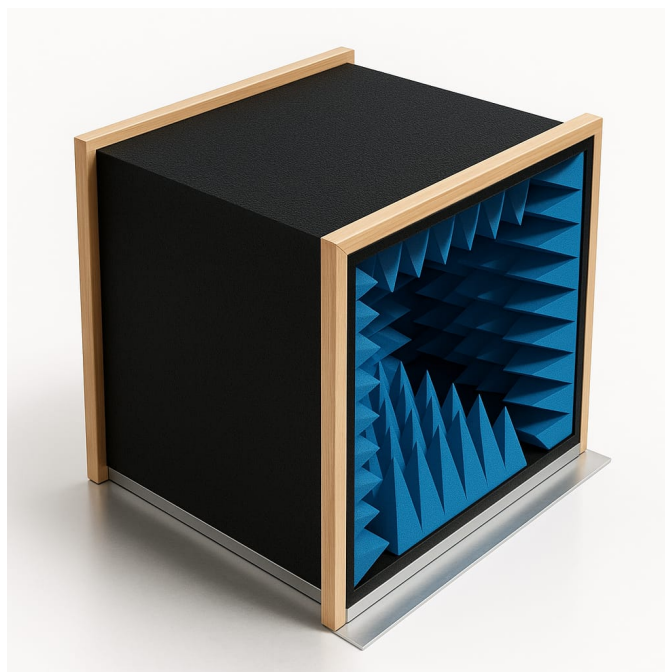


Figura 20 - Câmara semianecoica projetada

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

A Figura 21 apresenta a vista explodida da câmara semianecoica, evidenciando a disposição dos principais componentes da estrutura. Observa-se que:

- (1) os três bastões de madeira indicam a base de sustentação da estrutura;
- (2) dois bastões adicionais de madeira formam a sustentação lateral e superior da câmara;
- (3) as placas de MDF na cor preta compõem as paredes laterais, superior e inferior da câmara, sendo que cada face é constituída por duas placas. No centro da ilustração, identifica-se o núcleo interno revestido por absorvedores piramidais de poliuretano azul, responsáveis pela atenuação das ondas eletromagnéticas refletidas;
- (4) o conjunto de quatro absorvedores corresponde às laterais; e
- (5) o conjunto de dois absorvedores piramidais corresponde às faces superior e inferior.

Essa representação tem como objetivo facilitar a compreensão do processo de montagem e alinhamento das partes, destacando a característica modular do projeto, que permite facilidade de transporte, desmontagem e manutenção da estrutura. A sequência de encaixe e fixação das placas será detalhada nas próximas subseções.

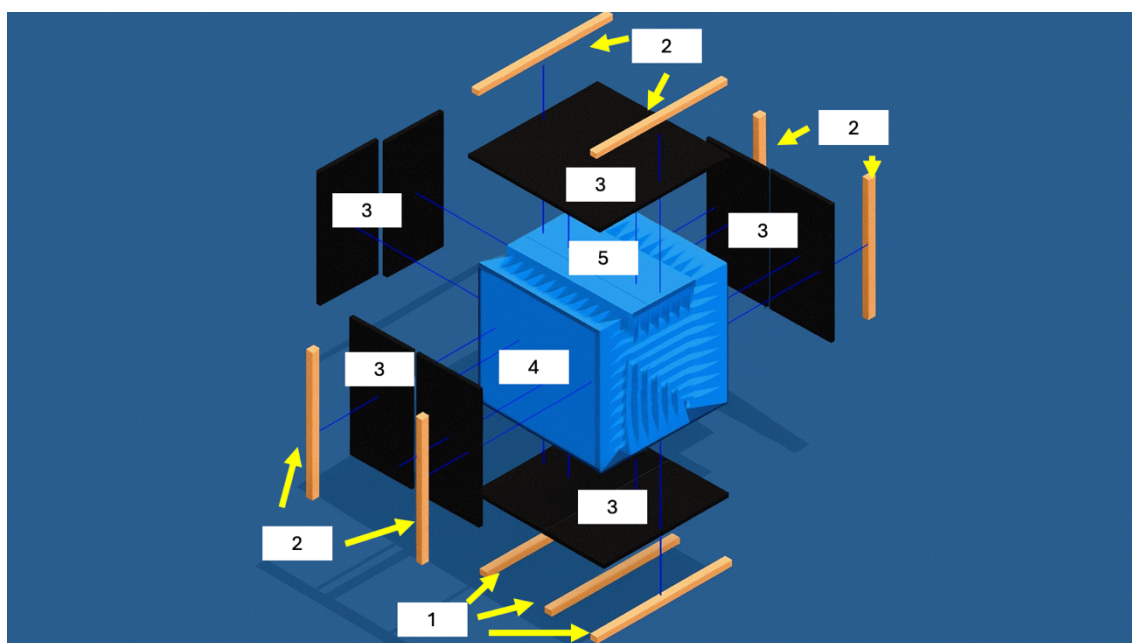


Figura 21 - Câmara semianecoica expandida

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

Visando otimizar a execução do processo de montagem, a construção de cada uma das faces foi realizada separadamente. As subseções seguintes descrevem, inicialmente, a montagem das paredes laterais da câmara. Em seguida, é apresentada a construção das

estruturas componentes da parte superior e inferior do projeto e, por fim, expõe-se o processo de união dos componentes.

3.3.3.Paredes Laterais

Para a montagem da estrutura lateral, dois módulos absorvedores, com 60 x 60 cm cada, foram fixados sobre uma placa de MDF de 122 × 61 cm, cobrindo praticamente toda a sua superfície. A fixação foi realizada por meio de braçadeiras plásticas, unidas entre si para formar um “fio” contínuo que prendeu os absorvedores à placa. Foram utilizados dois fios na dimensão maior e um na dimensão menor da placa, garantindo uma fixação firme e estável. A Figura 22 ilustra o processo de fixação dos absorvedores, nela podemos um absorvedor sendo fixado numa placa MDF utilizando uma das braçadeiras plásticas.



Figura 22 - Absorvedores sendo fixados nas placas MDF

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

A utilização de braçadeiras plásticas demonstrou-se uma solução eficiente para a fixação dos materiais, assegurando a instalação firme dos absorvedores nas placas de MDF e evitando o emprego de elementos metálicos, que poderiam comprometer a pureza do campo eletromagnético dentro da câmara.

Para compor cada lateral da estrutura, foram utilizadas duas placas de MDF cobertas integralmente com os módulos absorvedores, desta forma foram confeccionadas ao todo quatro placas com essa técnica.

3.3.4. Parte inferior e superior

Para a montagem das estruturas de inferior e superior da câmara, foi necessário alterar a técnica de fixação dos elementos absorvedores em relação àquela utilizada nas paredes laterais. Essa modificação a fim de evitar o contato direto entre as espumas absorvedoras laterais e as das estruturas superior e inferior, prevenindo possíveis interferências nas medições.

Cada módulo inferior e superior foi construído com um absorvedor de base 60×60 cm, fixado de forma centralizada sobre uma placa de MDF de 122×61 cm. Com essa configuração, manteve-se um espaçamento de aproximadamente 31 cm entre as bordas da placa e o absorvedor em todos os lados. Considerando que a altura dos absorvedores é de 30 cm, essa disposição permitiu que as estruturas fossem encaixadas sem sobreposição das espumas, garantindo o alinhamento adequado e evitando interferências indesejadas. A Figura 23 apresenta o conjunto de duas paredes laterais anexado numa placa superior, sendo possível notar que existe o espaçamento mencionado entre os absorvedores.

Foram utilizadas duas placas de MDF no teto e duas no piso, totalizando quatro placas, cada uma com apenas um absorvedor centralizado

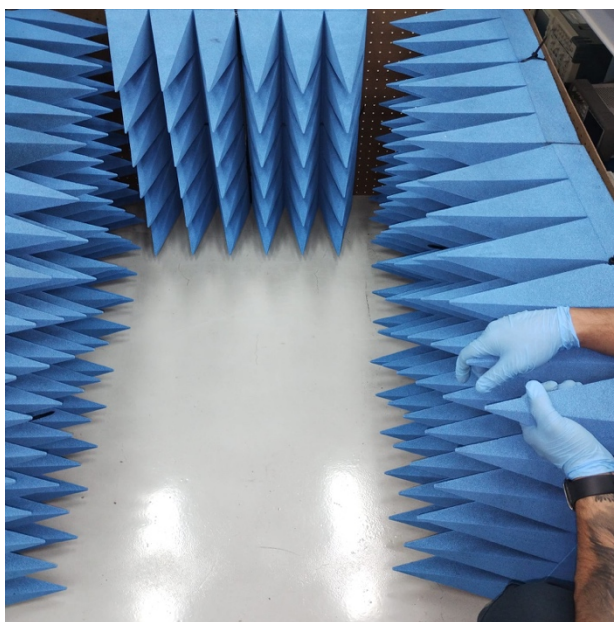


Figura 23 - Placas MDF com absorvedores sendo fixadas em conjunto.

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

Foram utilizadas duas placas de MDF no teto e duas no piso, totalizando quatro placas, cada uma com apenas um absorvedor centralizado.

3.3.5. União dos módulos

A sustentação de todo o conjunto foi realizada por meio de três sarrafos de madeira, sobre as quais se fixou a estrutura inferior — item (2) da Figura 21 — utilizando cantoneiras, parafusos e arruelas, conforme descrito na seção de materiais empregados. Com a base montada, foram construídas duas seções estruturais: uma localizada na parte anterior e outra na extremidade posterior da câmara. Cada seção era composta por duas placas laterais de MDF, montadas conforme a configuração utilizada nas paredes laterais, e por uma placa superior, formando uma estrutura em formato de “U”, a Figura 23 ilustra a montagem de uma das seções. Essa montagem contou com o reforço de sarrafos de madeira adicionais, empregados para garantir a sustentação e a estabilidade da câmara.

Após a montagem das duas seções, o conjunto completo foi suspenso e acoplado à base previamente instalada sobre uma das mesas do laboratório. A Figura 24 apresenta o processo de montagem de uma das seções onde duas partes laterais estão sendo juntadas com uma superior utilizando as cantoneiras.

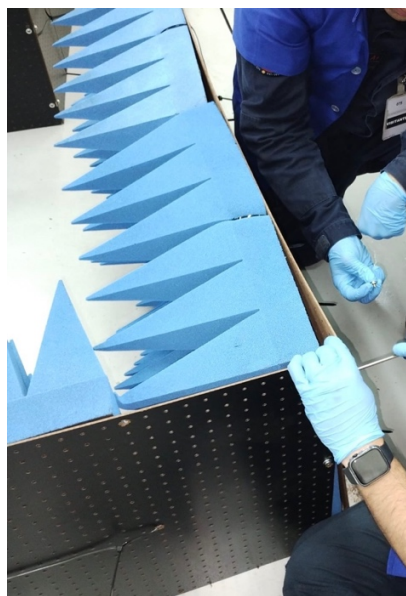


Figura 24 - Junção da estrutura lateral com a superior

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

Após a montagem da câmara semianecoica, foram posicionadas as duas antenas do tipo corneta utilizadas nos testes: uma na parte anterior da câmara e outra na parte posterior. A Figura 25 apresenta as antenas empregadas, enquanto a Figura 26 ilustra o posicionamento delas. O alinhamento horizontal entre as antenas foi realizado com o auxílio de um laser, garantindo o correto enquadramento na linha de visada. A antena

emissora foi posicionada a uma altura de 630 mm, enquanto a antena receptora em teste foi fixada a 627 mm, conforme dados da Tabela 5.

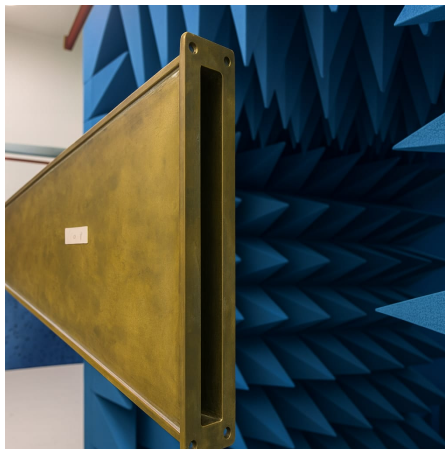


Figura 25 - Antena do tipo corneta utilizada nos testes

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

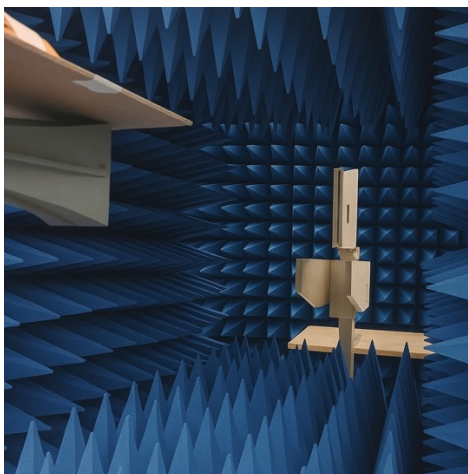


Figura 26 - Posicionamento das antenas no interior da câmara semianecoica

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

Na AUT foi instalado um goniômetro, construído no próprio laboratório, confeccionado em acrílico transparente e graduado em graus, com marcação central em 90° , variando de 55° a 125° de maneira unitária. O goniômetro é um instrumento utilizado para medir ou ajustar ângulos com precisão, sendo amplamente empregado em experimentos que envolvem caracterização de antenas, pois permite o controle do ângulo de rotação da antena receptora em relação à antena transmissora (Dias, 2007). Dessa forma, foi possível realizar medições sistemáticas da resposta angular da antena sob teste, assegurando a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos

Essa configuração permitiu que a antena receptora fosse posicionada em diferentes ângulos, possibilitando a avaliação do seu desempenho. A Figura 27 mostra a antena sendo alinhada com auxílio do goniômetro. Após o alinhamento a parte traseira da câmara foi fechada com duas placas de MDF.

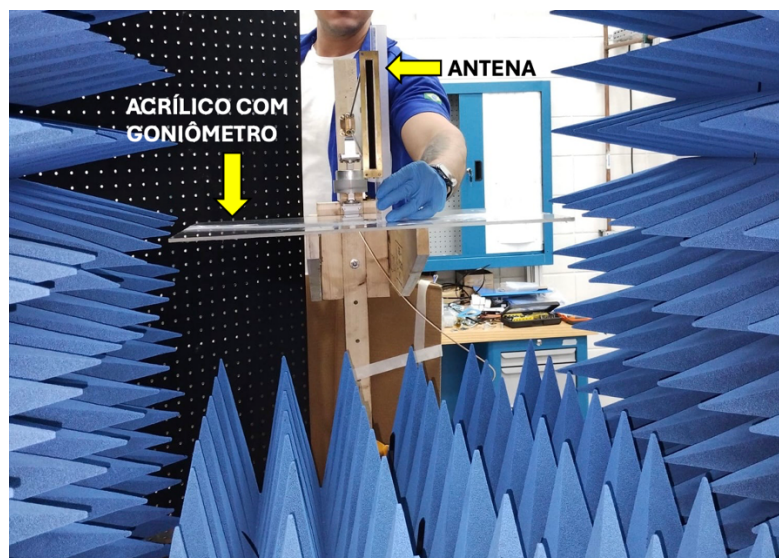


Figura 27 - Alinhamento da AUT com auxílio do goniômetro

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

Concluída a montagem, observa-se que os parâmetros práticos de dimensionamento definidos na Tabela 3 foram atendidos, restando agora realizar as medições e testes necessários para validar a construção da câmara.

3.4. Medições da Câmara Semianecoica

Encerrada a montagem da câmara semianecoica, o passo seguinte consistiu em verificar a adequação de seu funcionamento, assegurando que o ambiente interno estivesse suficientemente livre de interferências, de modo a possibilitar medições confiáveis na frequência de 9 GHz. Para isso, foi elaborado um ensaio experimental utilizando um Gerador de Sinais MXG N5183A (100 kHz – 20 GHz), operando com potência de 5 dBm, conectado a uma antena transmissora do tipo corneta comercial, fixada em uma das extremidades da câmara. A distância entre as duas antenas foi de 1,22 m. Na extremidade oposta, posicionou-se a AUT, também do tipo corneta, acoplada a um goniômetro que permitiu variar seu posicionamento angular no intervalo de 55° a 125°, com variação de 1°. As informações detalhadas das antenas utilizadas estão apresentadas na Tabela 5.

Para cada ângulo de rotação da AUT, foi realizada a leitura do sinal recebido por meio de um Osciloscópio Tektronix TPS 2012, e os valores obtidos foram organizados nos seguintes parâmetros:

Tabela 6 - Parâmetros obtidos nas medições

θ (°)	Corresponde ao ângulo de rotação da antena receptora em relação à antena transmissora, medido com o goniômetro transparente graduado. O intervalo de variação foi de 55° a 125°
R_x (mV)	Representa a tensão de saída medida na antena receptora para cada posição angular. Esses valores estão em milivolts e correspondem à amplitude do sinal captado, sendo diretamente proporcionais à potência recebida
R_{x_Norm}	Valores de Rx normalizados em relação ao maior valor de referência, permitindo comparar de forma relativa o comportamento angular da antena, independentemente da escala absoluta de tensão.
Log_{Rx}	Valores de R_{x_Norm} convertidos para escala logarítmica (dBm), obtidos pela aplicação da função logarítmica. Essa conversão é importante porque realça diferenças angulares sutis e aproxima a forma dos dados da maneira como os diagramas de radiação são tradicionalmente apresentados em engenharia de antenas

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 28 ilustra a execução das medições. Para cada grau do goniômetro, foi realizada uma aferição do valor de tensão, em milivolts, apresentado no osciloscópio conectado diretamente à AUT. Os valores obtidos foram posteriormente compilados, originando a tabela completa com todos os dados aferidos, a qual se encontra no Apêndice A.

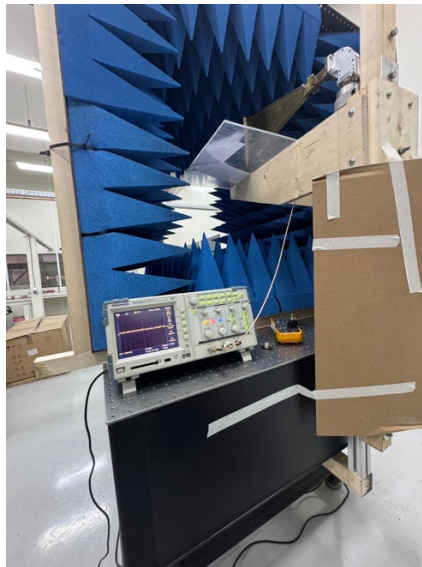


Figura 28 - Medições realizadas com osciloscópio

Fonte: Comunicação privada com o orientador (2025).

3.5. Ferramenta para análise dos dados

Para a análise e processamento dos dados obtidos durante as medições experimentais, foi utilizado o *software* MATLAB, desenvolvido pela empresa MathWorks. O MATLAB (Matrix Laboratory) é uma ferramenta computacional voltada para cálculos numéricos, análise de sinais, processamento de dados e representação gráfica (MathWorks, 2024). Amplamente empregado em pesquisas científicas e aplicações de engenharia, o *software* permite manipular matrizes, realizar operações matemáticas complexas, simular sistemas e gerar gráficos com alto nível de precisão e personalização (MathWorks, 2024).

Neste trabalho, o MATLAB foi utilizado para tratar e visualizar os dados experimentais obtidos com a variação angular da AUT, possibilitando a geração do gráfico de comportamento de irradiação da antena. A ferramenta permitiu organizar os valores aferidos, aplicar cálculos de conversão e representar graficamente o padrão de resposta da antena, facilitando a interpretação dos resultados e a comparação com o comportamento teórico esperado.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De posse dos dados obtidos nas medições experimentais realizadas na AUT, foi gerado, por meio do MATLAB, o gráfico do diagrama de radiação em coordenadas cartesianas, conforme apresentado na Figura 29. Nele, observa-se um lóbulo principal bem definido, centrado em aproximadamente 90° , o qual representa a direção de máxima irradiação da antena corneta. À medida que a varredura angular unitária ocorre se afastando do ponto central, a curva apresenta um decréscimo gradual da intensidade, atingindo valores próximos de -39 dBm nas extremidades, aproximadamente nos ângulos de 55° e 125° .

A linha tracejada em vermelho, na Figura 29, indica a região de 3 dB, também conhecida como largura de feixe a meia potência (do inglês *Half-Power Beamwidth* – HPBW). Essa região corresponde ao intervalo angular em torno da direção de máxima radiação no qual a intensidade de potência decai 3 dB em relação ao valor máximo, ou seja, reduz-se à metade da potência máxima irradiada (Jannuzzi, 2022). Em termos práticos, o HPBW é um parâmetro utilizado para avaliar a diretividade da antena — quanto menor o valor do HPBW, mais direcional é a antena (Balanis, 2016).

No gráfico, observa-se que a região de 3 dB está compreendida aproximadamente entre os ângulos de 75° e 105° , caracterizando o lóbulo principal de radiação da antena corneta analisada. Dessa forma, obtém-se um $\text{HPBW} \approx 28,4^\circ$, valor que representa a largura de feixe a meia potência da antena.

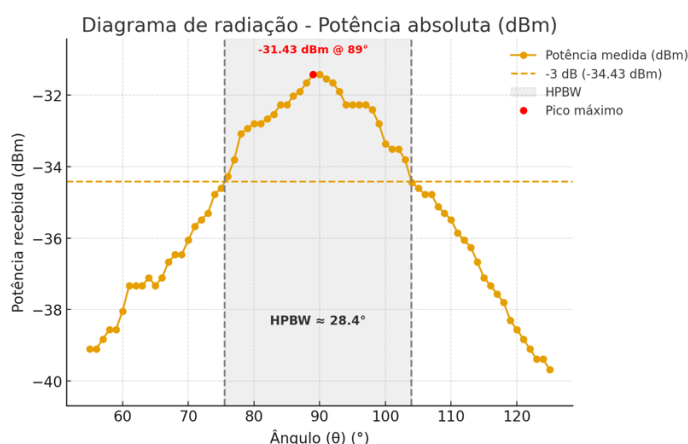


Figura 29 - Diagrama de radiação em coordenadas cartesianas

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A curva mostra-se razoavelmente simétrica em torno de 90° quando observamos que os dois trechos do gráfico onde ocorre HPBW estão aproximadamente espaçados igualmente ($\pm 15^\circ$), o que indica bom alinhamento entre as antenas transmissora e receptora.

Outro fator que pode ser analisado para verificar o desempenho da câmara semianecoica consiste em comparar a potência máxima recebida experimentalmente com a potência teórica esperada, calculada pela Equação de Friis, a partir dos parâmetros das antenas transmissora e receptora. Essa comparação permite avaliar o quanto o ambiente interno da câmara se aproxima de um comportamento ideal de propagação no campo distante.

Para o cálculo da potência recebida observada, utiliza-se a Equação (10), que relaciona a tensão eficaz medida no terminal da antena receptora à potência elétrica, conforme apresentado por (Alexander; Sadiku, 2021).

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (10)$$

Adotando R como a impedância padronizada de 50 Ω . (Alexander; Sadiku, 2021). Além disso, consideramos a tensão máxima medida a 90° de 6 mV, sendo assim $V_{RMS_90} = 6\text{mV}$. Desta forma, obtém-se o valor de potência de:

$$P = \frac{(6 \cdot 10^{-3})^2}{50} = 7,2 \cdot 10^{-7} \text{ W}$$

A Equação (11) é utilizada para converter o valor da potência de watts para escala logarítmica em dBm.

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{P_W}{1 \text{ mW}} \right) \quad (11)$$

Onde P_{dBm} é a potência em dBm e P_W é a potência em watts. Dessa forma tem-se uma potência de aproximadamente -31 dBm aferida durante o experimento.

Com o objetivo de fornecer um referencial teórico para comparação e análise dos dados experimentais obtidos, e tendo em vista que o projeto opera no modo de medição em campo distante, pode-se estimar, por meio da Equação (12) (Equação de Friis), o valor esperado da potência recebida na AUT (Saunders; Aragón-Zavala, 2007).

$$P_r = P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (12)$$

Onde P_t é a potência transmitida, G_t o ganho da antena transmissora, G_r o ganho da antena receptora, f a frequência de operação, R a distância entre as antenas e L as perdas totais do sistema.

Para facilitar os cálculos, foi utilizada a forma logarítmica da Equação de Friis Equação (13) (Saunders; Aragón-Zavala, 2007).

$$P_r \text{ [dBm]} = P_t \text{ [dBm]} + G_t \text{ [dBi]} + G_r \text{ [dBi]} + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) - L \text{ [dB]} \quad (13)$$

Substituindo os valores da Tabela 7 na Equação (13) obtemos:

$$P_r \text{ [dBm]} = 5 \text{ [dBm]} + 13,3 \text{ [dBi]} + 13,3 \text{ [dBi]} + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{0,033}{4\pi(1,22)} \right) - 2,4 \text{ [dB]} = -24 \text{ dBm}$$

Comparando o valor experimental de -31 dBm com o valor teórico de -24 dBm, observa-se uma diferença de erro de aproximadamente 7 dBm abaixo do esperado, o que fornece indicativos relevantes para futuras otimizações do sistema. Ressalta-se que discrepâncias desse tipo podem estar associadas a perdas adicionais não previstas, bem como a pequenos desalinhamentos ocorridos durante o ensaio experimental.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados na Equação de Friis

Parâmetros utilizados	
Potência transmitida (P_t)	5 dBm
Ganho da antena transmissora (G_t)	13,3 dBi
Ganho da antena receptora (G_r)	13,3 dBi
Comprimento de onda (λ)	0,0333 m
Distância (R)	1,22 m

Perdas totais (L)	2,4 dB (adotado)
-----------------------	------------------

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com o gráfico de irradiação, Figura 29, gerado com base nas informações obtidas a partir das medições realizadas com a antena do tipo corneta, bem como por meio das análises e comparativos de potência teórica e experimental, é possível depreender que o projeto apresenta desempenho funcional, atendendo aos requisitos planejados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal projetar, construir e validar experimentalmente uma câmara semianecoica retangular compacta para operação na banda X, com enfoque em baixo custo e aplicabilidade em medições de antenas. A motivação central partiu da necessidade de se desenvolver, em território nacional, soluções de infraestrutura capazes de viabilizar ensaios eletromagnéticos confiáveis sem depender exclusivamente de câmaras comerciais de alto custo, muitas vezes inacessíveis a instituições acadêmicas e laboratórios de pesquisa.

Para atingir esse objetivo, inicialmente foram definidos os parâmetros teóricos fundamentais de dimensionamento, incluindo número de comprimentos de onda internos, espessura dos absorvedores, comprimento de onda operacional, largura e comprimento internos da câmara, além do ângulo de incidência ótimo sobre os absorvedores. A escolha dos absorvedores piramidais levou em consideração tanto o desempenho em altas frequências quanto a disponibilidade comercial e o custo reduzido.

A montagem do protótipo foi executada no LaMP, e ensaios experimentais foram conduzidos utilizando um gerador de sinais MXG N5183A (100 kHz–20 GHz), antenas do tipo corneta transmissora e receptora, e um osciloscópio Tektronix TPS 2012. Os dados obtidos permitiram analisar a resposta do sistema por meio de medições de potência recebida e diagramas de irradiação. Os resultados experimentais indicaram um erro de aproximadamente 7 dBm em relação ao valor teórico previsto pela equação de Friis. Além disso, os padrões de radiação medidos apresentaram boa definição do lóbulo principal e comportamento coerente com o esperado para antenas corneta, confirmando que a câmara atendeu aos requisitos de operação em campo distante.

A principal contribuição deste trabalho está na comprovação de que é possível desenvolver, com recursos acessíveis e técnicas de engenharia aplicadas, uma câmara anecoica funcional para aplicações na banda X, atendendo a critérios técnicos relevantes e possibilitando medições. Tal iniciativa representa um avanço significativo para a infraestrutura de pesquisa nacional, especialmente no contexto de ensaios de antenas e de tecnologias relacionadas à guerra eletrônica, comunicações e radares.

Outro aspecto a ser destacado é o legado deixado pela montagem do protótipo realizada no LaMP. A câmara semianecoica construída permanece disponível no laboratório e vem sendo efetivamente utilizada por militares em suas atividades de pesquisa. A simplicidade do projeto também possibilita que ele seja replicado em diversas

Organizações Militares (OM) de cunho técnico da MB, ampliando ainda mais seu potencial de aplicação.

Dessa forma, conclui-se que o projeto desenvolvido estabelece uma base sólida para futuras iniciativas de pesquisa e desenvolvimento, contribuindo para a consolidação de soluções nacionais em infraestrutura de testes para antenas e sistemas de radar operando na frequência de 9 GHz.

5.1. Sugestões para futuros trabalhos

- Adoção de absorvedores híbridos (espuma piramidal + ferrite), visando ampliar a faixa de frequências atendida pela câmara, especialmente abaixo de 6 GHz.
- Realização de simulações numéricas em softwares de eletromagnetismo computacional, para otimizar a geometria interna e reduzir reflexões residuais.
- Integração de equipamentos de medição vetorial, com o objetivo de aumentar a precisão das caracterizações de parâmetros de espalhamento.
- Avaliação da ampliação física da estrutura, permitindo a realização de ensaios com antenas de maior porte.
- Implementação de mecanismos automatizados como goniômetros motorizados para medições angulares mais precisas.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of Electric Circuits**. 7. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2021.

ALFARO, Javier Andrés García. **Projeto de antena otimizada para a realização de testes de compatibilidade eletromagnética em automóveis**. 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 4. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. ISBN 978-1-118-64206-1.

BARBOSA, Livia Caroline dos Santos. **A matemática como uma linguagem base de todas as ciências naturais**. 2023. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Matemática) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ensino Superior do Seridó, Departamento de Ciências Exatas e Aplicadas, Caicó, 2023.

BRISCOM. **Banda KA e banda KU: as principais diferenças**. Disponível em: <https://www.briskcom.com.br/blog/banda-ka-e-banda-ku-as-principais-diferencas/>. Acesso em: 12 out. 2025.

CARVALHO, Adriana; COSTA, Roberto da. Guerra Eletrônica — **Passado, Presente e Futuro**. Revista da Marinha, Rio de Janeiro, n. 256, p. 26–31, out. 2018.

CHANGZHOU Haozhuo Electronic Co., Ltd. **Absorvedor de azulejos de ferrite de câmara semi-anecoica para teste EMC**. Disponível em: <https://portuguese.rfiemifilter.com/sale-13613169-semi-anechoic-chamber-ferrite-tile-absorber-for-emc-test.html>. Acesso em: 20 out. 2025.

CHUNG, B. K.; CHUAH, H. T. Design and construction of a multipurpose wideband anechoic chamber. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 45, n. 6, p. 41–57, dez. 2003. DOI: 10.1109/MAP.2003.1282181.

DE OLIVEIRA, Alexandre Maniçoba de; OLIVEIRA NETO, Antonio Mendes de; FIGUEREDO SOBRINHO, Raimundo Eider; JUSTO, João Francisco. **Eletromagnetismo Aplicado: Antenas Vivaldi Palm Tree para Imagens Médicas por Micro-ondas de Campo Próximo**. 2. ed. São Paulo: CDA, 2023. 310 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/371534742_Eletromagnetismo_Aplicado_-_2_Edicao. Acesso em: 13 out. 2025.

DIAS, Fausy Solino. **Estimativa de ocupação do espectro de radiofrequências no Distrito Federal**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília, 2007.

ELECTRO RENT. **Keysight Technologies N5183A – MXG Microwave Analog Signal Generator**. Disponível em: <https://www.electrorent.com/us/products/rf-and-microwave-signal-generators/rf-generators-%3E%3D40-ghz/keysight-technologies/n5183a/01t1O000004TgwpQAC>. Acesso em: 13 out. 2025.

EMC DIRECTORY. **What are the differences between anechoic and semi-anechoic chambers.** Disponível em: <https://www.emc-directory.com/community/what-are-the-differences-between-anechoic-and-semi-anechoic-chambers>. Acesso em: 15 out. 2025.

FISCHER, Brian; RODRIGUEZ, Vince. Basic rules for indoor anechoic chamber design. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 58, n. 6, p. 82–94, dez. 2016. DOI: 10.1109/MAP.2016.2598819.

GOMES, José Gilberto Sobreira. **Módulos absorvedores de baixo custo para aplicações em ambientes de laboratórios de micro-ondas.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2017.

GUO, Hua-Dong; ZHANG, Li; ZHU, Lan-Wei. Earth observation big data for climate change research. **Advances in Climate Change Research**, v. 6, p. 108–117, 2015. DOI: 10.1016/j.accre.2015.09.007.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna.** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 4.

HEMMING, Leland H. **Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide.** Piscataway, NJ: IEEE Press; New York: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 0-471-20810-8.

HOLLOWAY, C. L.; DeLYSER, R. R.; GERMAN, R. F.; McKENNA, P.; KANDA, M. **Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic and semi-anechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices.** IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 39, n. 1, p. 33–47, 1997. DOI: 10.1109/15.554693.

JANNUZZI, Pedro Lima Vaz. **Estudo de métodos de caracterização de antenas em ambiente anecoico.** Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – CETUC, 2022. Relatório técnico CTC-CETUC-Rel000028-002552-00-00.

JUNG, Carlos Fernando et al. Desenvolvimento de absorvedores de radiações eletromagnéticas a partir de resíduos de indústrias alimentícias e moveleiras. **Revista Espacios**, v. 37, n. 26, p. 22, 2016.

LEASAMETRIC. **Tektronix TPS2012 – Oscilloscope.** Disponível em: <https://www.leasametric.com/produit/tektronix-tps2012/>. Acesso em: 13 out. 2025.

LEONARDO DRS. **What are S- and X-band radar and how are they used today?** Leonardo DRS, 19 dez. 2022. Disponível em: <https://www.leonardodrs.com>. Acesso em: 1 out. 2025.

LIU, Fan et al. Seventy years of radar and communications: The road from separation to integration. **IEEE Signal Processing Magazine**, [s. l.], 2020.

MADE-IN-CHINA. **RF Absorbing Materials for Anechoic Chamber.** Disponível em: https://pt.made-in-china.com/co_semgecapacitor/product_RF-Absorbing-Materials-for-Anechoic-Chamber_rgyuniegg.html. Acesso em: 13 out. 2025.

MARINHA DO BRASIL. **GE-201-2 — Medidas de Guerra Eletrônica: Medidas de Ataque Eletrônico**. 2. ed. Niterói: Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha, 2023.

MATHWORKS. **MATLAB – The Language of Technical Computing: User Guide**. Natick, MA: MathWorks, 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 14 out. 2025.

MIACCI, Marcelo A. S.; MARTIN, Inácio M.; REZENDE, Mirabel C. **Estudo da implementação de um sistema de supressão de ruídos ativo em medidas de RCS na banda C**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) / Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), 2005.

MVG. **HyPyr-Loss™ Ultra Hybrid Absorbers**. Disponível em: <https://www.mvg-world.com/en/products/absorbers/specialty-absorbers/hypyr-lossmultltra-hybrid-absorbers-1>. Acesso em: 15 out. 2025

NERI, Filippo. **Introduction to Electronic Defense Systems**. 3. ed. Norwood, MA: Artech House, 2018. ISBN 978-1-63081-555-1.

PAVÃO, Augusto C.; MATHIAS, Márcio A.; IDALMIR JÚNIOR, S. Q. **Atenuação de modos e modificação dos campos em uma câmara blindada por material resistivo: análise comparativa entre placas e bloco centralizado**. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA); São Bernardo do Campo: Fundação Inaciana de Ensino (FEI), 2008.

PEREIRA, Adriana Soares; SHITSUKA, Dorlivete Moreira; PARREIRA, Fábio José; SHITSUKA, Ricardo. **Metodologia da Pesquisa Científica**. 1. ed. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, NTE, 2018. E-book. ISBN 978-85-8341-204-5.

PLATAFORMA NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE PESQUISA (PNIPE). **Laboratório de Micro-ondas de Potência e Fotônica (LaMP)**. Disponível em: <https://pnipe.mcti.gov.br/laboratory/10952>. Acesso em: 13 out. 2025.

PINHO, Pedro; SANTOS, Hugo; SALGADO, Henrique. Design of an anechoic chamber for W-band and mmWave. **Electronics**, v. 9, n. 5, p. 804, 2020. DOI: 10.3390/electronics9050804.

SAUNDERS, Simon R.; ARAGÓN-ZAVALA, Alejandro. **Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.

SANTOS, Leonardo Alvarenga Lopes. **Análise Experimental do Ensaio Veicular de Imunidade a Campos Eletromagnéticos Radiados em Câmara Semi-Anecoica de Pequeno Porte**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SKOLNIK, Merrill I. (Ed.). **Radar Handbook**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-148547-0.

TENÓRIO, Plínio Ivo Gama. **Obtenção e caracterização de cerâmicas $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ e avaliação de suas propriedades para aplicação como material absorvedor de radiação eletromagnética**. 2023. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia

Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2023.

THE EMC SHOP. **PU-RAM-P: PU Foam Based Pyramidal Absorber – product specification.** Roseville, CA: The EMC Shop, [s.d.]. Disponível em: <https://theemcshop.com/content/downloads/PU-RAM-P.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

WOODS, Andrew. **Development and Characterisation of an Anechoic Chamber.** University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2006. Dissertation (Bachelor of Engineering in Electrical and Electronic; Bachelor of Business in Logistics and Operations Management).

APÊNDICE A

Tabela de Registro da Variação Angular por Amplitude de Sinal Recebido

θ (°)	R_x (mV)	R_{x_Norm}	Log_{Rx} (dBm)
55	2,48	0,41	-39,1
56	2,48	0,41	-39,1
57	2,56	0,43	-38,82
58	2,64	0,44	-38,56
59	2,64	0,44	-38,56
60	2,8	0,47	-38,05
61	2,88	0,51	-37,33
62	3,04	0,51	-37,33
63	2,96	0,51	-37,33
64	3,04	0,52	-37,11
65	3,04	0,51	-37,33
66	3,12	0,52	-37,11
67	3,28	0,55	-36,67
68	3,36	0,56	-36,46
69	3,36	0,56	-36,46
70	3,52	0,59	-36,06
71	3,68	0,61	-35,67
72	3,76	0,63	-35,49
73	3,92	0,64	-35,3
74	4,08	0,68	-34,78
75	4,16	0,69	-34,61
76	4,32	0,72	-34,28
77	4,56	0,76	-33,81
78	4,96	0,83	-33,08
79	5,04	0,84	-32,94
80	5,12	0,85	-32,8
81	5,12	0,85	-32,8
82	5,2	0,87	-32,67
83	5,28	0,88	-32,54
84	5,44	0,91	-32,28
85	5,44	0,91	-32,28
86	5,6	0,93	-32,03
87	5,68	0,95	-31,9
88	5,84	0,97	-31,66
89	6	1	-31,43

90	6	1	-31,43
91	5,92	0,99	-31,54
92	5,84	0,97	-31,66
93	5,68	0,95	-31,9
94	5,44	0,91	-32,28
95	5,44	0,91	-32,28
96	5,44	0,91	-32,28
97	5,44	0,91	-32,28
98	5,36	0,89	-32,41
99	5,12	0,85	-32,8
100	4,8	0,8	-33,36
101	4,72	0,79	-33,51
102	4,72	0,79	-33,51
103	4,56	0,76	-33,81
104	4,24	0,71	-34,44
105	4,16	0,69	-34,61
106	4,08	0,68	-34,78
107	4,08	0,68	-34,78
108	3,92	0,65	-35,12
109	3,84	0,64	-35,3
110	3,76	0,63	-35,49
111	3,6	0,6	-35,86
112	3,52	0,59	-36,06
113	3,44	0,57	-36,26
114	3,28	0,55	-36,67
115	3,12	0,52	-37,11
116	3,04	0,51	-37,33
117	2,96	0,49	-37,56
118	2,88	0,48	-37,8
119	2,72	0,45	-38,3
120	2,64	0,44	-38,56
121	2,56	0,43	-38,82
122	2,48	0,41	-39,1
123	2,4	0,4	-39,39
124	2,4	0,4	-39,39
125	2,32	0,39	-39,68