



JOSÉ GILBERTO SOBREIRA GOMES

**MÓDULOS ABSORVEDORES DE BAIXO CUSTO
PARA APLICAÇÕES EM AMBIENTES DE
LABORATÓRIOS DE MICRO-ONDAS**

**João Pessoa - PB
Junho de 2017**



JOSÉ GILBERTO SOBREIRA GOMES

**MÓDULOS ABSORVEDORES DE BAIXO CUSTO
PARA APLICAÇÕES EM AMBIENTES DE
LABORATÓRIOS DE MICRO-ONDAS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.
Orientador

Neilor Cesar dos Santos, Dr.
Coorientador

João Pessoa – PB, junho de 2017

©José Gilberto Sobreira Gomes – gilbertosobreira@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

G633m Gomes, José Gilberto Sobreira.
 Módulos absorvedores de baixo custo para aplicações em
 ambientes de laboratórios de micro-ondas / José Gilberto
 Sobreira Gomes. – 2017.
 52 f. : il.
 Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto
 Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba / Pro-
 grama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.
 Orientação : Prof. D.r Joabson Nogueira de Carvalho.
 Coorientador : Prof. D. r Neilor Cesar dos Santos.
 1. Eletromagnetismo – ondas. 2. Radiação eletromagné-
 tica – material absorvedor de radiação. 3. Interferência ele-
 tromagnética. 4. Laboratório de micro-ondas. I. Título.

CDU 537.8(043)

MÓDULOS ABSORVEDORES DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÕES EM AMBIENTES DE LABORATÓRIOS DE MICRO-ONDAS

Dissertação de Mestrado submetida
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito
necessário à obtenção do grau de Mestre em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica


Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em / / .

BANCA EXAMINADORA


Joabson Nogueira de Carvalho, Doutor IFPB
Orientador


Neilor Cesar dos Santos, Doutor IFPB
Coorientador


Waslon Terlizzie Araújo Lopes, Doutor UFPB
Examinador externo


Alfredo Gomes Neto, Doutor IFPB
Examinador interno

DEDICATÓRIA

A Deus.

Aos meus pais, Gilberto Gomes da Silva (in memoriam) e Lucimar Sobreira Gomes pelo sacrifício feitos por mim e os ensinamentos de vida.

AGRADECIMENTOS

Ao senhor Deus, por ser a luz que me guia e me fortalece todos os dias.

As minhas filhas Rebecca, Rafaela e Raissa pelo carinho e atenção nos meus dias de intenso estresse.

Aos meus pais e minhas irmãs e irmãos por todo apoio, estando comigo sempre mesmo não sendo presencial.

Ao Instituto Federal da Paraíba, pelo mestrado na mesma rede de ensino, a qual me proporcionou experiências incríveis na minha carreira, isso torna-se gratificante de que valeu a pena.

Aos meus professores orientadores Joabson Nogueira de Carvalho e Neilor Cesar dos Santos por ter acreditado no meu trabalho, pela disposição de sempre sanar as minhas dúvidas e pela paciência ao longo desse período.

Aos professores que me instruíram ao longo das disciplinas Professor Alfredo Gomes Neto, Silvana, Professor Ilton Barbacena e Professor Edgard Macedo obrigado pelo conhecimento repassado e pelas experiências compartilhadas.

Um agradecimento a todos aqueles que contribuíram direto e indiretamente para a realização deste trabalho, em especial a Paulo Fernandes, Maciel Oliveira, Andrécia, Lais, Gilliane, e Mauricio por toda a ajuda técnica e até por uma palavra de conforto, em um abraço, em um “vai dar tudo certo” tornando mais leve este caminho.

A todos, o meu muito obrigado.

EPÍGRAFE

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.

Ayrton Senna

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a caracterização de um módulo absorvedor de radiação eletromagnética de baixo custo para ser utilizado em medições nos ambientes dos laboratórios de micro-ondas, que é um espaço, muitas vezes, sujeito a interferências eletromagnéticas. Para construção do módulo absorvedor de baixo custo são analisados materiais acessíveis no comércio como, PVC, isopor, cola branca, e grafite em pó. Com estes materiais, construiu-se elementos absorvedores onde utilizou-se o grafite em pó como o núcleo. A eficiência do elemento absorvedor, utilizado no painel, foi medida através da técnica da Seção Transversal de Radar (RCS). A relação entre a perda de reflexão (dB) e a porcentagem da absorção do sinal de radiação foi obtida via medidas de refletividade, utilizando o método do Arco (RNL). Este método é considerado de fácil manuseio por permitir o ensaio com elementos absorvedores de diversos materiais com diversos tamanhos e geometrias. Observou-se que o painel absorvedor construído produziu uma atenuação superior a 25 dB para algumas frequências e que os ângulos de incidência mais rasantes produziram uma maior variação na atenuação resultante. De forma geral, o painel absorvedor produziu uma atenuação sempre maior que 10 dB, chegando a 25 dB em algumas faixas específicas de frequência.

Palavras-chave: Interferência, compatibilidade, absorvedores de radiação, materiais absorvedores de radiação eletromagnética.

Abstract

This work presents the development and characterization of a low-cost electromagnetic radiation absorber module to be used in measurements in the microwave laboratory environments, which is a space, often subject to electromagnetic interference. For the construction of the low cost absorber module, commercially available materials such as PVC, styrofoam, white glue and graphite powder are analyzed. With these materials, absorbing elements were constructed where powdered graphite was used as the core. The efficiency of the absorber element, used in the panel, was measured through the technique of Radar Cross Section (RCS). The relationship between the reflection loss (dB) and the percentage of the radiation signal absorption was obtained by means of the reflectivity measurements, using the Arco (RNL) method. This method is considered easy to handle because it allows testing with absorbent elements of various materials of various sizes and geometries. It was observed that the absorber panel constructed produced an attenuation greater than 25 dB for some frequencies and that the lower incidence angles produced a greater variation in the resulting attenuation. Generally, the absorber panel produced an attenuation always greater than 10 dB, reaching 25 dB in some specific frequency ranges.

Keywords: Interference, compatibility, radiation absorbers, electromagnetic radiation absorbing materials.

Lista de Figuras

Figura 1 - Setup de medição de refletividade de um painel absorvedor no laboratório de micro-ondas do IFPB.	17
Figura 2- Ilustração das reflexões que podem ocorrer dentro do espaço de medições.....	18
Figura 3 - Vista parcial do laboratório de medidas em Telecomunicações do Campus de João Pessoa-IFPB.	18
Figura 4 - Setup de medição de EMI no interior de uma câmara anecóica.	19
Figura 5 - Mitsubishi X-2 – Avião revestido com MARE.	20
Figura 6 - Marca-passo cardíaco atingido por ondas eletromagnéticas.....	20
Figura 7 - Equipamento sob ensaio no interior de uma câmara anecóica do Lab-MET/UFCG.	21
Figura 8 - Interior de uma câmara semi-anecóica.	28
Figura 9 - Reflexão das ondas num MARE piramidal.	29
Figura 10 - Conjunto de medição utilizando a sonda coaxial na medição da permissividade de um material.	32
Figura 11 – Processo de montagem das pirâmides com a colagem das faces.	33
Figura 12 – Processo de montagem do painel absorvedor: cortes e colagem das faces de plástico polivinila. Enchimento com grafite e selagem com cola branca.	34
Figura 13- Módulo absorvedor de radiação eletromagnética de baixo custo, destacando a janela de colocação das FSS´s.	34
Figura 14 – Ilustração do corte transversal de pirâmide do módulo absorvedor (a), Modelo de pirâmide pronta (b). Fonte: elaborada pelo autor.	35
Figura 15 – <i>Setup</i> de medição com a placa metálica, em cobre.	36
Figura 16 – <i>Setup</i> de testes para a caracterização do painel absorvedor.	37
Figura 17 - Geometria utilizada na simulação.....	39
Figura 18- Atenuação produzida pelos elementos absorvedores em função da frequência e altura dos elementos da Tabela 5.....	40
Figura 19 - Configuração para caracterização.....	41
Figura 20 – Ângulo de incidência e de reflexão sobre a superfície de absorvedores.....	41
Figura 21- (a) <i>Setup</i> de caracterização da placa metálica de referencia para medidas de refletividade. (b) <i>Setup</i> de caracterização do módulo absorvedor.....	42
Figura 22- Atenuação medida para o ângulo de incidência de 30°. Fonte: elaborada pelo próprio autor.....	43
Figura 23- Atenuação medida para o ângulo de incidência de 45°. Fonte: elaborada pelo próprio autor.....	43
Figura 24- Atenuação medida para o ângulo de incidência de 60°. Fonte: elaborada pelo próprio autor.....	44
Figura 25- Medida da FSS com módulo Absorvedor Comercial (UFRN).....	45
Figura 26- (b) Medida da FSS com módulo de baixo custo.....	45
Figura 27- Medidas efetuadas em vazio.....	46
Figura 28- Medidas efetuadas com a FSS tipo <i>Patch</i>	46

Figura 29- Medidas efetuadas com a FSS tipo *Slot*.....47

Lista de Tabelas

Tabela 1– Exemplos de utilização dos espectros eletromagnéticos e a respectiva faixa de frequências regulamentadas pela ANATEL. Fonte: ANATEL.....	15
Tabela 2– Características elétricas da grafita	30
Tabela 3 – Comparação dos métodos de medição das propriedades dielétricas de materiais.	31
Tabela 4 – Custos com materiais utilizados na confecção de uma pirâmide para o painel. Fonte: elaborada pelo autor.....	35
Tabela 5 – Dimensões do elemento absorvedor.	38
Tabela 6 – Relação entre Refletividade e percentual de energia absorvida.	42

Lista de Siglas

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
B_f	Largura de banda fracionária
BW	<i>Bandwidth</i> (largura de banda)
C	Capacidade máxima do canal
DEP	Densidade espectral de potência
EMC	(Compatibilidade Eletromagnética)
EMI	Interferência Eletromagnética
ESE	Equipamento Sob Ensaio
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> (Comissão Federal de Comunicações)
f_1	Frequência inferior
f_0	Frequência central
f_2	Frequência superior
f_r	Frequência de ressonância
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> (Sistema Global de Comunicação Móvel)
GPS	<i>Global Position System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
$G(x)$	Função gaussiana
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
N	Número de iterações
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OATS	<i>Open Area Test Sites</i>
P	Potência transmitida
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
PHY	<i>Physical Layer</i> (Camada Física)
RF	Radio frequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>

S/N	Relação sinal-ruído
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> (Frequência Ultra Alta)
UWB:	<i>Ultra-wideband</i> (Banda/frequência ultralarga)
VNA	<i>Vectorial Network Analyzer</i> (Analisador de redes Vetorial)
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ^*	Permissividade elétrica efetiva
σ_2	Variância
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> (Rede sem fio local)
VSWR	<i>Voltage State Wave Ratio</i> (Relação de onda estável de tensão)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	5
AGRADECIMENTOS	6
EPÍGRAFE	7
Resumo	8
Abstract	9
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	12
Lista de Siglas	13
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Formulação do Problema	16
1.2. Justificativa	22
1.3. Objetivos	23
1.3.1. Objetivo Geral	23
1.3.2. Objetivos Específicos	23
1.4. Organização do Trabalho	24
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1. Características Eletromagnéticas dos Materiais.....	25
2.2. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnéticas – (MARE).....	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1. Características dos Materiais	30
3.3. Desenvolvimento do módulo Absorvedor	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1. Estudo da Geometria das Pirâmides na Atenuação do Sinal	38
4.2. Módulo Absorvedor	40
4.3. Aplicações do Módulo absorvedor	44
5. Conclusões.....	48
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	48
5.2. Trabalhos Publicados	49
Bibliografia.....	50

1. INTRODUÇÃO

Os espaços físicos ocupados pelo homem moderno, tem sido motivo de preocupação a respeito das interferências eletromagnéticas (IEM) em todas as faixas de frequências, desde kHz até GHz. Desta forma, as ondas eletromagnéticas tem sido usadas no desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas da eletrônica, militar, da medicina e principalmente na de telecomunicações. No Brasil, a regulamentação desses serviços é feita pela agencia Nacional de Telecomunicações – ANATEL [1]. Alguns exemplos de utilização do espectro eletromagnético por faixa de frequências que são regulamentadas pela ANATEL, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1– Exemplos de utilização dos espectros eletromagnéticos e a respectiva faixa de frequências regulamentadas pela ANATEL. Fonte: ANATEL

FAIXA DE FREQUÊNCIA	UTILIZAÇÃO
130-160 kHz	Comunicação marítima
535-1625 kHz	Rádiodifusão
30 MHz – 300 MHz	Televisão, Rádiodifusão
400 MHz	Telefone sem fio doméstico
824 - 895 MHz	Telefonia celular
1,2 – 1,5 GHz	Sistema de Posicionamento Global (<i>GPS</i>)
2,45 GHz	Forno de microondas doméstico
2,7 – 2,9 GHz	Radares meteorológicos
3,0 – 3,5 GHz	Radares de aeroportos
2,4 – 5,0 GHz	Tecnologia sem fio " <i>Bluetooth</i> "
3,5 – 4,0 GHz	Internet por rádio
8,0 – 12 GHz	Radares militares de traqueamento aéreo
30 GHz	Radares de imageamento topográfico

A preocupação com as ondas eletromagnéticas tem despertado grande interesse dos pesquisadores da comunidade científica devida a crescente utilização do espectro

eletromagnético e emissão de ondas eletromagnéticas no meio ambiente, concluiu-se que deve haver estudos e criação de normas para compatibilidade e interferência eletromagnética para equipamentos eletrônicos (CEM – Compatibilidade eletromagnética e IEM – Interferência Eletromagnética). O controle dos níveis de radiação eletromagnéticas emitidas pelos equipamentos eletrônicos são também exigidos pela legislação governamental bem como a confiabilidade da sociedade por esses produtos. Nesse contexto estão inseridos os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) (ou RAM – *Radar Absorbing Material*) que são os responsáveis pela redução dos problemas na área de IEM/CEM. No Brasil, os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética são conhecidos como MARE.

As indústrias aeronáuticas, médicas, automobilísticas e de telecomunicações são setores que necessitam utilizar materiais absorvedores de radiação eletromagnéticas no desenvolvimento de suas atividades. Para isso, os ensaios são realizados no interior de câmaras anecóicas, que são espaços isolados dos meios externos através de paredes que são revestidas com MARE [2].

1.1. Formulação do Problema

Com a implantação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica no Campus João Pessoa do Instituto Federal da Paraíba, houve um aumento significativo no número de atividades desenvolvidas em seus laboratórios. Pelas suas características, o laboratório de Medidas de Telecomunicações é um dos que são utilizados em ensaios e medições de sinais desde a faixa de RF (Rádio Frequência) até micro-ondas, pois tem em sua estrutura equipamentos que não são comuns em outros laboratórios da região, como analisadores de espectro, analisadores de redes vetoriais (VNA – *Vectorial Network Analyzer*), geradores de sinais na faixa de microondas, transmissores e receptores numa ampla faixa de frequência, dentre outros. Ensaios em Superfícies Seletivas de Frequência (FSS – *Frequency Selective Surface*) ou em antenas de vários modelos, operando numa grande faixa de frequências, fazem parte da rotina do laboratório.

Em alguns ensaios envolvendo propagação de ondas eletromagnéticas, os móveis, pessoas e demais equipamentos existentes no interior do laboratório podem interferir no resultado de forma acentuada, devido à reflexão ou difração da onda nos diversos objetos [1]. Em geral, as medições são realizadas com o uso de duas antenas diretivas, de ganhos padrões como elementos de transmissão e recepção separadas pela distância de campo distante, conectados a um analisador de redes vetorial VNA [3].

Na Figura 1 é apresentada a configuração utilizada na medição dos coeficientes de reflexão e transmissão de um protótipo de painel absorvedor, construído em isopor e uma camada superficial de cola branca (PVA) e grafite, com antenas tipo corneta operando na faixa de 700 MHz a 10 GHz.

Em situações de simulação, onde as antenas estão separadas a uma distância além da região de campos próximos, se não existe obstrução entre as antenas e a altura das antenas é da mesma ordem da separação entre elas, de forma que o sinal proveniente da antena transmissora não seja refletido na superfície, a ligação se comporta como a propagação no espaço livre.

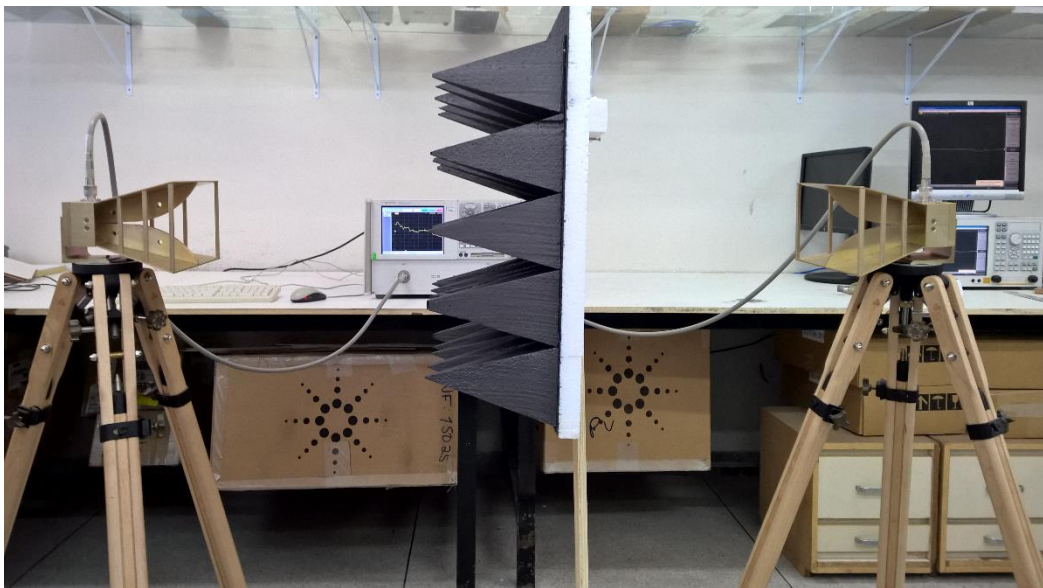


Figura 1 – Setup de medição de refletividade de um painel absorvedor no laboratório de micro-ondas do IFPB.

Neste *setup* (Figura 1) de medição, a ligação é considerada como sendo em espaço livre, devido à separação entre as antenas e não haver possibilidades de reflexões e multipercursos. Dessa maneira as transmissões de sinais irradiados, chegam até a receptora como se não houvesse nenhuma interferência. A antena corneta limita uma área de recepção devido à diretividade da mesma, ainda assim podem ocorrer diversas interferências de outros sinais oriundos de outras fontes ou por conta das reflexões provocadas pelos objetos que se encontram nos espaços de medições. Os diversos sinais que chegam à antena receptora se compõem, podendo resultar num desvanecimento (interferência destrutiva ou construtiva) do sinal recebido, alterando significativamente o resultado da medição [3]. A Figura 2 representa a situação das possíveis reflexões.

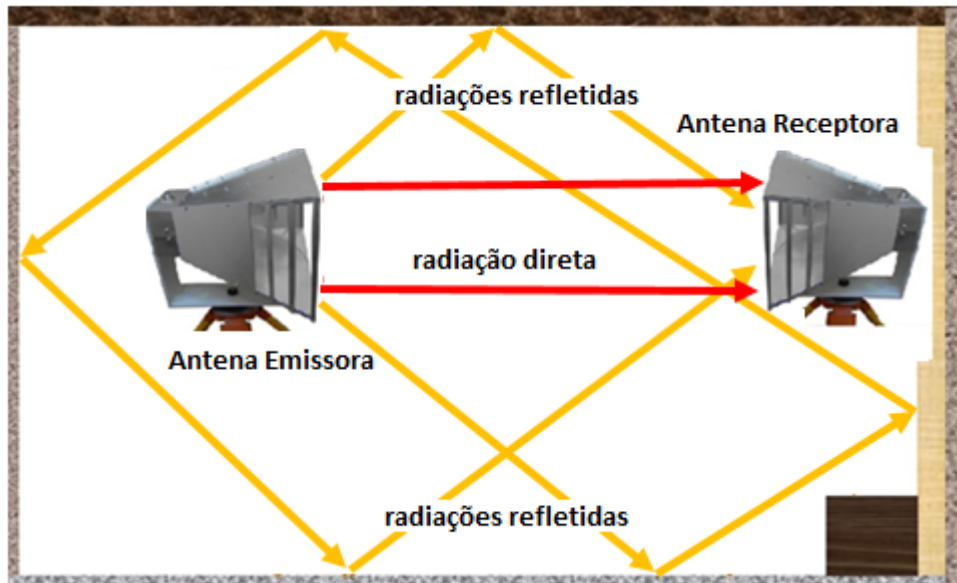


Figura 2– Ilustração das reflexões que podem ocorrer dentro do espaço de medições.

No laboratório de medidas em Telecomunicações do IFPB, o layout do mobiliário composto por bancadas, armários, mesas e carteiras que ocupam grande parte dos espaços, se caracterizando como uma grande fonte de reflexões e difrações, alterando as características do que se denomina de espaço para medição entre as antenas nas mais diversas frequências. A Figura 3 mostra uma vista parcial do laboratório de micro-ondas com parte do mobiliário e equipamentos que constituem o espaço de medições utilizado e que podem causar as interferências nas antenas.



Figura 3 – Vista parcial do laboratório de medidas em Telecomunicações do Campus de João Pessoa-IFPB.

As principais incompatibilidades para ensaios de emissão radiada estão relacionadas a fontes de sinais que possam induzir a falsas respostas e a objetos que provoquem a reflexão dos sinais pertinentes ao ensaio.

Uma das técnicas utilizadas para reduzir os efeitos das múltiplas reflexões das ondas eletromagnéticas nos diversos objetos é o confinamento do *setup* de medição com paredes absorvedoras, de modo a formar o que se conhece como parede infinita [4]. O *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques* (CISPR), na sua recomendação CISPR 22 orienta o uso de Áreas de Teste Abertas (OATS – *Open Area Test Site*), mas admite genericamente o uso de ambientes alternativos [5]. Ambientes com essas características, é conhecido como “Câmara Anecóica”, são extremamente onerosas e tem custo de instalação e manutenção elevados. Em geral, as câmaras anecóicas são utilizadas para ensaios de interferências eletromagnéticas (IEM).

As normas técnicas estabelecem limites para as interferências produzidas e/ou induzidas em diversos tipos de equipamentos eletrônicos. A Figura 4, mostra um ensaio realizado com uma fonte de tensão estabilizadas no interior de uma câmara anecóica.



Figura 4 – Setup de medição de EMI no interior de uma câmara anecóica.

As IEM são causadas pela existência de um gerador, um sistema vulnerável e o canal. [3]. A radiação eletromagnética indesejada é um dos motivos pelo crescente trabalho das pesquisas de materiais absorvedores de radiações eletromagnéticas. Os equipamentos que utilizam os MARE's estão em todos os setores da sociedade atual. Na área militar as aplicações

desses materiais, pode-se dizer que a energia espalhada por um alvo (eco radar), que seria utilizada para a sua detecção por meio de um radar, é atenuada e o objeto revestido com MARE torna-se mais difícil de ser detectado ou, como divulgado na literatura, “invisível” ao radar, como o modelo de uma aeronave “*Stealth*” (“furtivo”, em português), termo usado para designar os chamados aviões que não são detectados pelos radares da Figura 5.



Figura 5 – Mitsubishi X-2 – Avião revestido com MARE.

Fonte: <http://www.defesaaereanaval.com.br/tag/mitsubishi-atd-x-shinshin/>. Acessado em 16 de abril de 2016.

No setor de equipamentos da área médica, os marca-passos da Figura 6, são bons exemplos de estruturas protegidas por MARE, pois qualquer alteração na programação desse equipamento pode ocasionar taquicardia no portador, com risco iminente de morte, só por ele estar próximo a uma fonte eletromagnética, tal qual uma antena de celular [6].

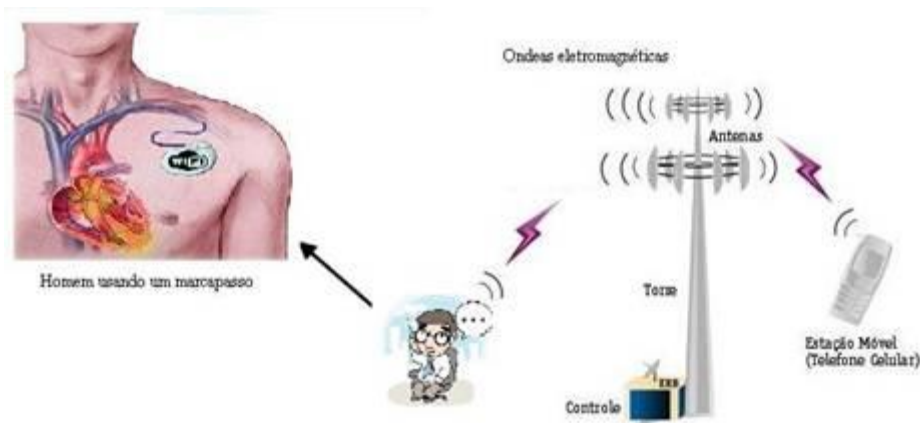


Figura 6 – Marca-passo cardíaco atingido por ondas eletromagnéticas.

Na eletrônica, utiliza-se MARE no revestimento de câmaras anecóicas que são utilizadas nos setores de controles industriais e de pesquisa científica, conforme ilustrado na Figura 7.

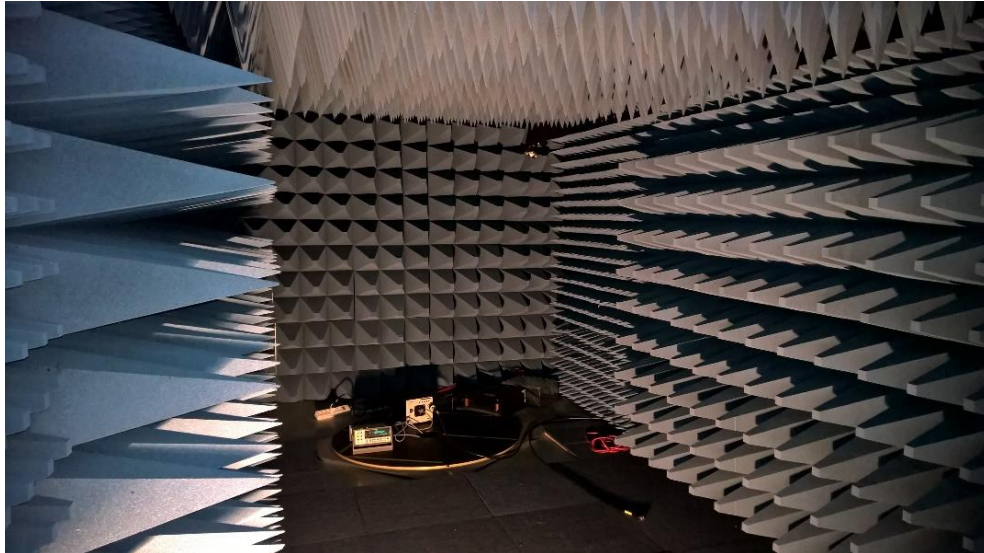


Figura 7 – Equipamento sob ensaio no interior de uma câmara anecóica do Lab-MET/UFCG.
Fonte: elaborada pelo autor.

Nos eletrodomésticos em geral os MARE tem aplicação na blindagem eletromagnética e no controle de interferências naqueles que são mais susceptíveis aos efeitos de sinais espúrios [7]. Dessa forma sabe-se que a cada dia aumentam as exigências de controle das interferências sobre esses tipos de equipamentos, tornando as normas mais rígidas e maior rigor nos processos de medições. Com esse tipo de estrutura, os diversos ambientes de medições podem ter seus problemas com as interferências reduzidos ou simplificados se em torno da área houver a presença de escudos de RF, como aqueles presentes nas câmaras anecóicas ou em painéis absorvedores de radiação eletromagnética [8].

Outros métodos têm sido estudados como alternativa para câmaras anecóicas, principalmente para uso no ambiente acadêmico, com menor disponibilidade de recursos para investimento. Nesta dissertação, apresenta-se uma solução de baixo custo para construção de painéis absorvedores na faixa de micro-ondas, considerando as necessidades do laboratório de medidas em telecomunicações do IFPB.

1.2. Justificativa

As atividades mais comuns realizadas no Laboratório de Medidas em Telecomunicações envolvem a medição de sinais irradiados e recebidos por uma antena. Para ensaiar uma FSS, por exemplo, utiliza-se um par de antenas conectadas a um VNA. Nesse tipo de medição, o Equipamento Sob Ensaio (ESE), no caso, a FSS é colocada no espaço entre as antenas. Para evitar erros na medição produzidos por reflexões ou difrações da onda eletromagnética no ESE, foram desenvolvidas normas regulamentares que definem as características permitidas do ESE, seus procedimentos de ensaio, a calibração dos equipamentos de testes, as instalações de ensaio e prescrevem o uso das Áreas de Teste Abertas (OATS) padrão na medição de radiação das emissões eletromagnéticas. A interação de equipamentos/componentes eletrônicos com as ondas eletromagnéticas fez surgir a necessidade de se pesquisar e estabelecer normas de Compatibilidade (CEM) e Interferência Eletromagnética (IEM) [9].

Os avanços tecnológicos que os materiais absorvedores de radiação eletromagnética podem proporcionar às áreas de eletroeletrônica, espacial e aeronáutica, têm impulsionado a realização de vários trabalhos de pesquisa e desenvolvimento na obtenção desses materiais [10]. A produção de material absorvedor foi o desafio apresentado para instalação de câmaras anecóicas durante a década de 1970, o laboratório de pesquisa central da Siemens em Regensburg desenvolveu um absorvedor de CEM no início dos anos sessenta. Porém, o primeiro desenvolvimento começou em 1954 [11]. No início da década de noventa um absorvedor de CEM foi desenvolvido para uma gama de frequências a partir de 30 MHz até 40 GHz. O projeto foi de um absorvedor piramidal oco com uma pequena camada dielétrica. Hoje em dia existem os chamados absorvedores híbridos que consistem em absorvedores de ferrite e piramidais. Os absorvedores híbridos foram desenvolvidos e estavam disponíveis em meados de 1994 [11]. Hoje já existe uma produção de novos materiais absorvedores no mercado.

Vários trabalhos com absorvedores piramidais foram desenvolvidos por outros pesquisadores por exemplo, fazendo uso de bagaço de cana-de-açúcar, que pode ser utilizado em uma faixa de frequências entre 0,1 GHz a 20 GHz e os resultados mostraram que se obteve uma perda por reflexão melhor que - 30 dB em determinadas frequências [12]. Outras pesquisas realizadas com cascas de arroz mostraram uma perda por reflexão melhor que - 30 dB em uma faixa de frequências de 1,89 a 20 GHz e com folhas de bananeiras foi melhor do que - 97,59 dB em uma faixa de 0,504 a 14,933 GHz [13]. Portanto, justifica-se este trabalho pela existência de uma demanda tecnológica, assim como pela necessidade dos trabalhos de pesquisa

realizados no laboratório de medidas em Telecomunicações do IFPB utilizado pelo Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado – GTEMA.

No presente trabalho realizou-se estudos para o desenvolvimento de estruturas absorvedoras de radiação eletromagnéticas de baixo custo, otimizado para a banda de frequência entre 1 e 10 GHz, comumente utilizadas nas medições realizadas em laboratórios didáticos. Foram investigadas as características dielétricas do material escolhido, de forma a cumprir requisitos de um MARE. Simulações foram feitas com o objetivo de otimizar a geometria no sentido de reduzir a refletância da estrutura, cujos resultados levaram ao desenvolvimento de um protótipo para ensaios e medições dos parâmetros de reflexão e transmissão. Com isso, uma estrutura para ensaios de FSS foi proposta para o laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Caracterizar experimentalmente e numericamente o comportamento de estruturas piramidais de absorção de ondas eletromagnéticas de baixo custo.

1.3.2. Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Revisar a literatura referente aos materiais e estruturas de absorção, destacando suas principais características, tais como geometria e dimensões, resposta em frequência e aplicações;
- b) Construir elementos absorvedores piramidais com características de baixo custo, com grafite em pó, isopor e estrutura de PVC para absorção de radiações eletromagnéticas.
- c) Caracterizar o painel construído a partir dos elementos absorvedores;
- d) Construir o painel absorvedor para ensaio de superfície seletivas de frequência a partir dos absorvedores piramidais.
- e) Documentar os trabalhos realizados através da publicação de artigos e da defesa de dissertação.

1.4. Organização do Trabalho

Este trabalho organiza-se em 5 capítulos , que são detalhados a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo, é introduzida a temática em estudo, a formulação do problema, a justificativa, a motivação e os objetivos geral e específicos pretendidos para a realização do trabalho.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: apresenta-se um breve estado da arte acerca do tema, incluindo as fontes que foram consultadas, como bancos de dados de periódicos, artigos científicos, jornais, livros e apostilas, empregados para fomentar a discussão e consequentemente a validação do estudo.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: neste capítulo, descreve-se as propriedades dos materiais utilizados considerados de baixo custo, além do detalhamento do método utilizado na caracterização e fabricação das pirâmides e do painel absorvedor.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: neste capítulo, são exibidas as simulações realizadas para determinar os parâmetros do projeto, é detalhado o *setup* experimental, os resultados obtidos, uma discussão acerca desses resultados e dos problemas encontrados durante os procedimentos no decorrer das simulações e dos testes experimentais.

Capítulo 5 – Conclusão: Este capítulo descreve as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Características Eletromagnéticas dos Materiais

As características elétricas e magnéticas do meio são determinadas pela permissividade elétrica do meio (ϵ), pela permeabilidade magnética do meio (μ) e pela condutividade elétrica do meio (σ). A permissividade elétrica de um meio indica o quanto esse meio afeta e é afetado por um campo elétrico. A permeabilidade magnética de um meio indica o quanto esse meio afeta e é afetado por um campo magnético. No caso da condutividade é definida como a capacidade dos materiais de conduzirem ou transmitirem uma corrente elétrica [14].

Para um meio qualquer, define-se a sua impedância característica como sendo a relação entre as intensidades dos campos elétrico e magnético. Em termos dos parâmetros eletromagnéticos do meio, a sua impedância é dada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

Para uma onda eletromagnética com frequência f , propagando num meio de impedância η o comprimento de onda λ está relacionado com a velocidade de propagação:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi v_p}{\omega} = \frac{v_p}{f} \quad (2)$$

Na qual v_p representa a velocidade de propagação da onda, ω a frequência da onda, a velocidade de propagação da onda para um meio qualquer, obedece à relação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}, [\text{m/s}] \quad (3)$$

Assim, para o espaço livre, a velocidade de propagação da onda eletromagnética é dada por:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (4)$$

Na Equação 4, onde: $\mu_0 = 4,7 \times 10^{-7} H/m$ e $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$

Quando consideramos um meio com perdas, ou seja $\sigma \neq 0$, a permissividade e a permeabilidade do meio se tornam quantidades complexas. Estas características têm influência na reflexão das ondas (em fronteiras) e na atenuação das ondas no interior dos materiais [15]. No domínio da frequência, a permissividade do material assume um valor complexo, seu valor é apresentado relativamente ao valor da permissividade do vácuo, e vale:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (5)$$

A parte real, conhecida como “constante dielétrica relativa”, representa a capacidade do material, armazenar energia, em resposta a um campo elétrico aplicado. Por outro lado, a parte imaginária, conhecida como “fator de perda dielétrica”, refere-se à energia dissipada em forma de calor [16].

A Equação (5) sugere que as quantidades ϵ_r' e ϵ_r'' estão defasadas entre si. O ângulo representa esta defasagem, conhecido como “tangente de perdas” ($\tan \delta$) é um importante estimador das características dielétricas do meio. A tangente de perdas representa a razão entre a energia perdida e a energia armazenada por ciclo do campo externo aplicado. Em termos numéricos, a tangente de perdas é representada por:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (6)$$

A propagação de uma onda eletromagnética é controlada pelas propriedades elétricas e magnéticas de um meio de propagação e também da frequência do campo aplicado. Essas propriedades são afetadas por outros fatores, como a composição do material, temperatura, forma e a frequência de oscilação do campo eletromagnético.

Quando uma onda eletromagnética se propaga e encontra algum objeto com propriedades dielétricas distintas do meio de propagação, ondas secundárias são produzidas. Estas decorrem do campo de reação dos dipolos magnéticos e elétricos constituintes do objeto ao campo incidente, o que culmina com ondas refletidas de volta para o meio de ondas transmitidas para o interior do objeto. Dependendo da forma geométrica do obstáculo, de sua dimensão relativamente ao comprimento de onda e da região ocupada pelo

feixe de radiação incidente, bem como da composição e homogeneidade do objeto, pode ocorrer ou não espalhamento difuso, ou seja, reflexão e transmissão ao longo de várias direções. Isso causará alterações nos sinais captados por uma antena receptora, por exemplo. Há situações, no entanto, em que o obstáculo pode ser modelado como uma interface simples que se conforma de forma aproximada à superfície de fase da onda incidente. Todos esses elementos constituem fontes de interferências e de reflexões introduzindo uma quantidade enorme de erros nas medições realizadas em ambientes fechados [17] [18].

De acordo com o exposto e devido aos elevados custos e dificuldades de se encontrar locais que satisfaçam as condições ideais para se realizar essas medições, surge a necessidade de se criar estruturas de absorção de radiações eletromagnéticas de baixo custo, que sejam capazes de minimizar as reflexões dentro dos ambientes dos laboratórios e que estas possam ter menos interferências em seus resultados, como os ambientes existentes em câmaras anecóicas.

2.2. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnéticas – (MARE)

No mercado de hoje, as câmaras anecóicas tem valores de instalações elevados, incentivando o uso cada vez maior de painéis absorvedores individuais, que podem minimizar os efeitos da interferência. Dessa forma, a busca por materiais absorvedores fez surgir uma demanda de interesse muito grande na área das telecomunicações e da engenharia dos materiais [19].

Basicamente, uma câmara anecóica é composta por uma estrutura fechada, revestida de MARE. Esses materiais se caracterizam estruturalmente pela elevada perda dielétrica na faixa de frequência de interesse. Assim, uma considerável parcela da energia das ondas que atingem as paredes da câmara é convertida em calor, minimizando os sinais refletidos em direção ao ESE. A Figura 8 mostra uma câmara anecóica industrial revestida por MARE.



Figura 8 – Interior de uma câmara semi-aneecóica.

Em geral, os MARE's são produzidos a partir de materiais a base de carbono [20], que apresenta alta perda dielétrica, óxidos cerâmicos do tipo ferrita com elevada perda magnética e polímeros condutores, com baixa condutividade e, portanto, alta perda na frequência de interesse. Boa parte dos materiais utilizados é objeto de segredo industrial ou militar, devido aos altos valores investidos no seu desenvolvimento.

Para reduzir os efeitos do sinal ao atingir o MARE, utiliza-se o formato piramidal para construir absorvedores [20]. Assim, ao atingir a estrutura, parte da energia é refratada para o interior do MARE, sendo convertida em calor, enquanto a quantidade que é refletida é projetada na outra face do mesmo material, repetindo o processo até atingir o final da estrutura, reduzindo o nível do sinal refletido na direção do sinal incidente. Esta característica é mostrada na Figura 9.

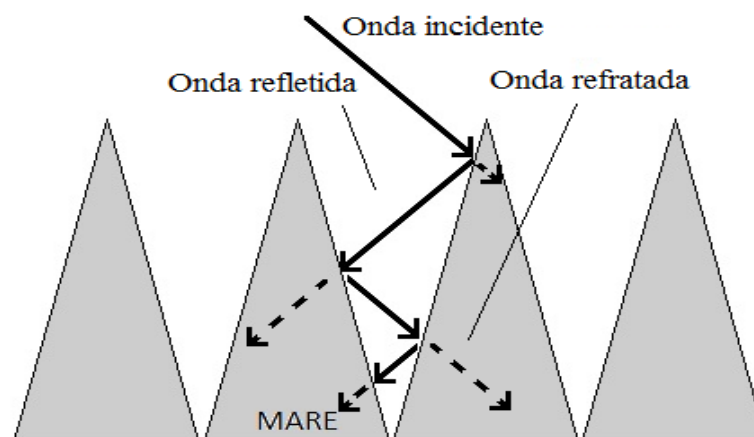


Figura 9 – Reflexão das ondas num MARE piramidal.

Para se construir absorvedores de banda larga, que possam trabalhar na banda de frequências de 30 MHz até as faixas de dezenas de GHz, não é tarefa fácil. Os absorvedores devem ter perda de retorno mínima para garantir que a conformidade de absorção do espaço esteja de acordo com as normas pertinentes. O desafio maior para o absorvedor é dar o seu melhor desempenho já a partir de 30 MHz e daí em diante. Projetos de absorção muito bem conhecidos são os absorvedores de espuma piramidal.

Basicamente, existem três técnicas de projeto de obtenção de absorvedores de radiação eletromagnética, baseadas em: cancelamento de fases da onda eletromagnética incidente, espalhamento da onda eletromagnética incidente em direções diferentes da antena receptora, e utilização de materiais com perdas magnéticas e dielétricas intrínsecas, dentro da faixa de frequências de interesse [21].

A técnica de cancelamento de fases da onda eletromagnética procura ajustar a espessura do absorvedor, de forma a provocar o cancelamento de fases da onda incidente com as da onda emergente do absorvedor, na interface do material absorvedor com o ar. Esta técnica é amplamente utilizada na produção de absorvedores conhecidos como ressonantes. Absorvedores ressonantes representam a maior parte do mercado. Esses absorvedores apresentam desempenho relativamente bons, porém são efetivos somente em faixas de frequências muito estreitas [22]. A técnica de espalhamento da onda eletromagnética é a mais utilizada, quando o principal interesse é de reduzir o eco-radar pelo efeito físico de espalhamento da onda refletida em direções diferentes da antena receptora. Absorvedores com geometria piramidal utilizam esta técnica, entre outros possíveis fenômenos de perdas, como reflexões múltiplas nos poros do absorvedor e perdas ôhmicas promovidas pelo negro de fumo impregnado nesse tipo de absorvedor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Características dos Materiais

O material utilizado para perda dielétrica foi o grafite ou grafita, que é uma das formas cristalinas do carbono que ocorre naturalmente. Devido a sua anisotropia, ele se torna um mineral de propriedades únicas, sendo responsável por características elétricas como descritas na Tabela 2 [23] [24].

Tabela 2– Características elétricas da grafite.

Características	Valores (mm)
Resistividade ρ	$1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$
Permissividade relativa ϵ_r'	2,540
Constante de perdas ϵ_r''	0,021507

O grafite, é um semicondutor no sentido perpendicular ao plano das estruturas cristalinas hexagonais e um condutor metálico no sentido paralelo ao mesmo plano. O mineral pode ser classificado em três tipos comerciais: grafita em flocos, em veio cristalino e amorfa, por fim, subdividido em várias grades baseando-se no teor de carbono, tamanho da partícula e tipos de impurezas. É utilizada em diversas aplicações industriais sendo as principais: tijolos e peças refratárias, cátodos de baterias alcalinas, aditivo na re-carburação do ferro e do aço, lubrificantes ou a base de óleo e água, escovas de motores elétricos, minas de lápis e lapiseiras, gaxetas de vedação [25].

Como é um material de baixa rigidez mecânica, o grafite é bastante utilizado como lubrificante seco em diversas aplicações. Dessa forma, a grafita em pó é facilmente encontrada em lojas de materiais de construção e também de materiais agropecuários, pois o mesmo é utilizado em algumas semeadeiras. Além da facilidade de obtenção, ressalta-se o baixo custo do mesmo e a adequação às características dos absorvedores, pois a literatura destaca que a grafita possui elevada perda dielétrica.

3.2. Caracterização Eletromagnética dos Materiais

As características eletromagnéticas de um material determinam o comportamento das ondas eletromagnéticas que incidem no mesmo [26]. Dessa forma, o conhecimento da

permissividade relativa (ϵ_r'), permeabilidade magnética relativa (μ_r'), a condutividade (σ) e fator de perdas dielétrica (ϵ_r''), são essenciais para se determinar o coeficiente de reflexão (Γ_L), dado por

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (7)$$

Na qual Z_L é a impedância da linha e Z_C é a impedância da carga. A literatura especializada relaciona diversas técnicas para medição das propriedades dielétricas de materiais, como o método do espaço livre, método da sonda coaxial em aberto, método da perturbação da cavidade, dentre outros. A Tabela 3 resume as características e o emprego dos principais métodos [27].

Tabela 3 – Comparação dos métodos de medição das propriedades dielétricas de materiais.

Técnica	Parâmetros comparados			
	Material	Faixa	Vantagem	Desvantagem
Placas paralelas	Vários tipos de materiais, exceto gás	< 100 MHz	Barato e de grande precisão	Faixa de frequência pequena e amostras normalmente muito finas
Linha de transmissão	Líquido e Semissólido	1 MHz a 20 GHz	Fácil de usar, não destrutível e não requer preparação da amostra.	Precisão limitada, baixa resolução e requer um Analisador Vetorial.
Perturbação de cavidade	Líquidos, Sólidos e Semissólido	Depende da cavidade projetada	Simplicidade, facilidade de obtenção dos parâmetros, capacidade de medir em altas temperaturas	Requer um Analisador Vetorial.
Espaço livre	Sólidos	> 1 GHz	Ensaio não destrutível. Alta temperatura da amostra pode ser usada.	Deve ser usada uma grande placa plana e fina entre as antenas. Uma calibração especial é requerida.

O método da sonda coaxial em aberto foi utilizado neste trabalho, pelas vantagens de seu fácil manuseio e principalmente pela faixa de frequência em que pode ser aplicado. A sua aplicação é usada para medir a permissividade elétrica relativa e o fator de perdas dielétricas do material. Neste método, o material é colocado na extremidade em aberto de uma sonda coaxial. Um sinal na frequência de interesse é aplicado na sonda. As características dielétricas do material, no caso, a constante dielétrica e a perda dielétrica determinam a quantidade de energia refletida [11]. Um software é empregado para determinar os valores finais das medições.

Esta técnica é capaz de medir as propriedades dielétricas numa vasta gama de frequências. O conjunto de medição de parâmetros dielétricos, formado por um analisador de redes vetorial, modelo 85070E, fabricado pela *Keysight*, utiliza esta técnica para determinar a permissividade elétrica relativa e o fator de perdas dielétricas de materiais líquidos e semissólidos. O conjunto de medição deve ser utilizado com um analisador de redes vetorial que responda a faixa de frequência de interesse é visto na Figura 10. O software que acompanha o conjunto de medição é responsável pelo cálculo dos parâmetros de saída.

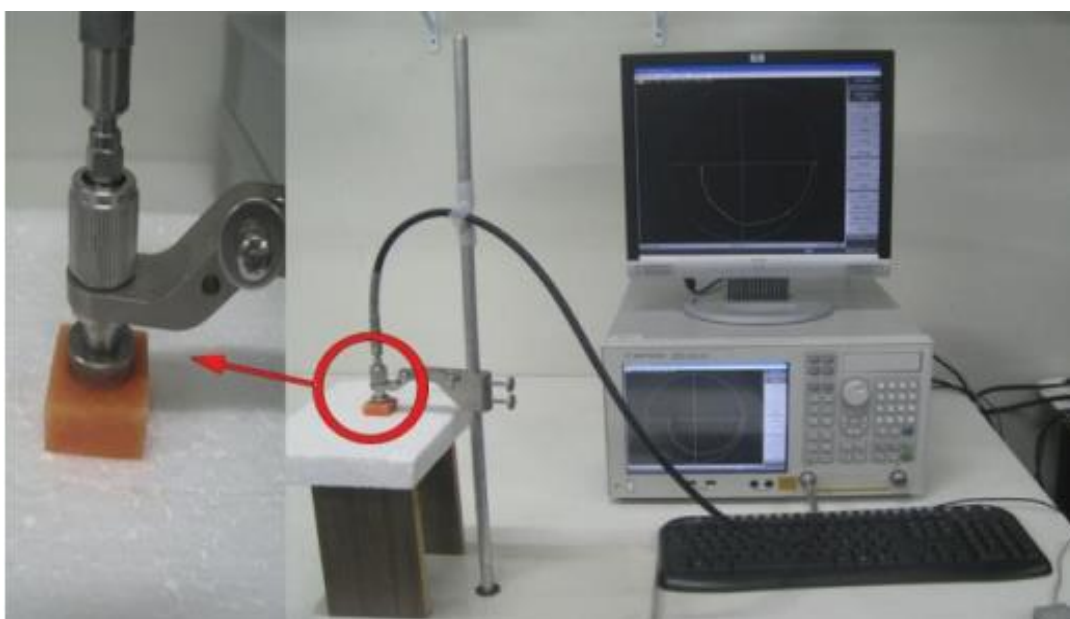


Figura 10 – Conjunto de medição utilizando a sonda coaxial na medição da permissividade de um material.

Para empregar o método da sonda coaxial em certos materiais, deve ser observada a recomendação do fabricante de usar amostras espessas e planas, de modo a não formar intervalos de ar entre a amostra e a superfície da sonda de medição, que deve ser colocada diretamente na superfície do material. Materiais muito porosos não podem ser medidos

diretamente com essa técnica, pois os espaços vazios do material que não entram em contato com a sonda de medição produzem erros no resultado final.

3.3. Desenvolvimento do módulo Absorvedor

Inicialmente foi realizada uma simulação numérica da estrutura proposta, com software HFSS (High Frequency Structure Simulator), que utiliza o Método dos Elementos Finitos. A simulação teve por objetivo verificar o efeito da dimensão e formato da estrutura na perda produzida. Em seguida, foi medida a refletividade da estrutura construída, utilizando a técnica RCS. Finalmente a estrutura foi aplicada na medição de FSS disponível no laboratório, comprovando sua eficiência para este tipo de medição.

A construção do módulo absorvedor de radiação eletromagnética de baixo custo, foi dividida nas seguintes etapas (Figura 11, Figura 12 e Figura 13):

- a) Corte das faces das pirâmides com plástico PVC rígido leitoso de 1 mm de espessura com base quadrada de 75 mm de lado e altura 150 mm, de acordo com a simulação feita para corroborar com as dimensões.



Figura 11 – Processo de montagem das pirâmides com a colagem das faces.

- b) Preencher o interior da pirâmide com 60 g de grafite em pó. Introduzir outra pirâmide junto a camada de grafite, fabricada em isopor, de dimensões 70mm x 140 mm e selar com cola branca.

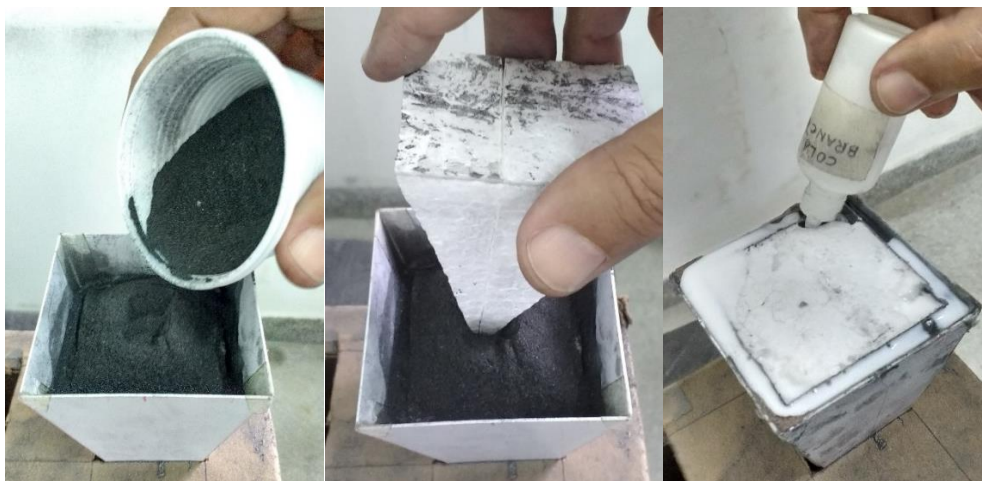


Figura 12 – Processo de montagem do painel absorvedor: cortes e colagem das faces de plástico polivinila. Enchimento com grafite e selagem com cola branca.

- c) Depois da secagem natural da cola, as pirâmides (elementos absorvedores) são coladas em uma placa de madeirite revestida com uma chapa de cobre (Figura13).

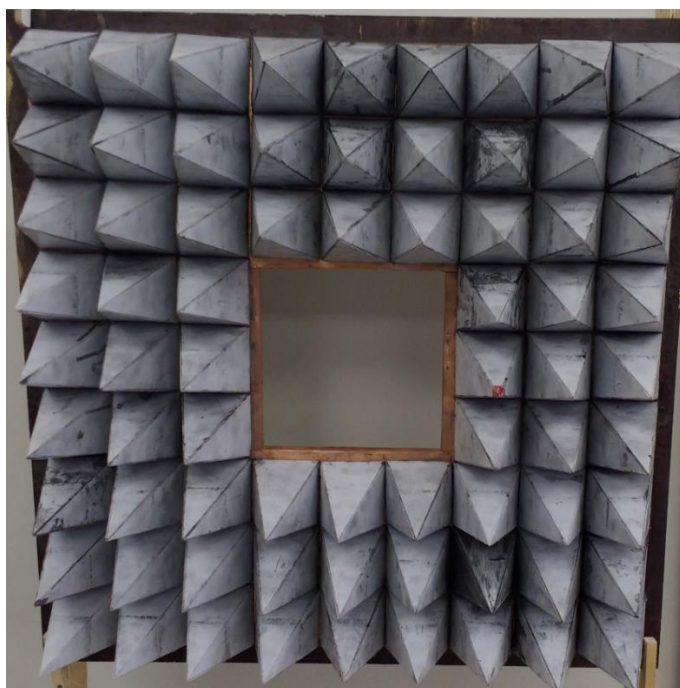


Figura 13– Módulo absorvedor de radiação eletromagnética de baixo custo, destacando a janela de colocação das FSS's.

A janela do painel é removível conforme a necessidade de uso do mesmo. Dessa forma, construiu-se 81 pirâmides para todo painel e 9 pirâmides para a janela.

As pirâmides de plástico e o recheio de grafite são melhores observadas na ilustração da Figura 12 (a) e 12 (b).

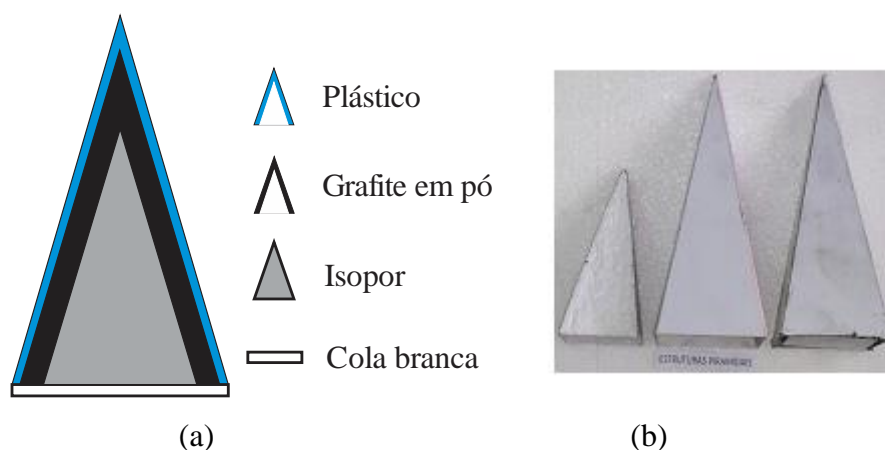


Figura 14 – Ilustração do corte transversal de pirâmide do módulo absorvedor (a), Modelo de pirâmide pronta (b). Fonte: elaborada pelo autor.

Utilizando materiais de baixo custo adquiridos no comércio local da cidade de João Pessoa, o gasto com a confecção do painel, tem os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Custos com materiais utilizados na confecção de uma pirâmide para o painel.

Absorvedor Piramidal (Unidade)	Cola Branca	0,20
	Plástico	0,46
	Isopor	0,25
	Grafite	0,75
Subtotal (R\$)		1,66
Módulo(R\$)	Base de Madeirite	60,00
Total(R\$)	Módulo com 81 pirâmides	209,00

Para montagem do painel (Figura 13) composto por nove colunas e nove linhas de pirâmides (elementos absorvedores) foi necessário a confecção de uma base de madeirite recoberta com uma chapa de cobre que ficou em torno de R\$60,00, de modo que o custo do protótipo ficou no valor de R\$209,00 que, em equivalente em moeda estrangeira atuais US\$63,45. No mercado internacional uma estrutura com pirâmides de poliuretano com interior de carbono e com uma área equivalente a do painel de baixo custo, tem preço entre US\$200,00 e US\$500,00, de acordo com os índices FOB [28].

Foram realizados uma série de ensaios para análise e determinação da perda por refletividade, eficiência de absorção dos absorvedores piramidais em relação a uma superfície refletora de metal. Esta superfície consistia de uma chapa de metal (cobre) com dimensões de 70 x 70 cm. A primeira série de testes teve por finalidade determinar a perda por reflexão obtida considerando a radiação aplicada à chapa de metal (cobre) posicionada no centro e a respectiva recepção conforme Figura 14.

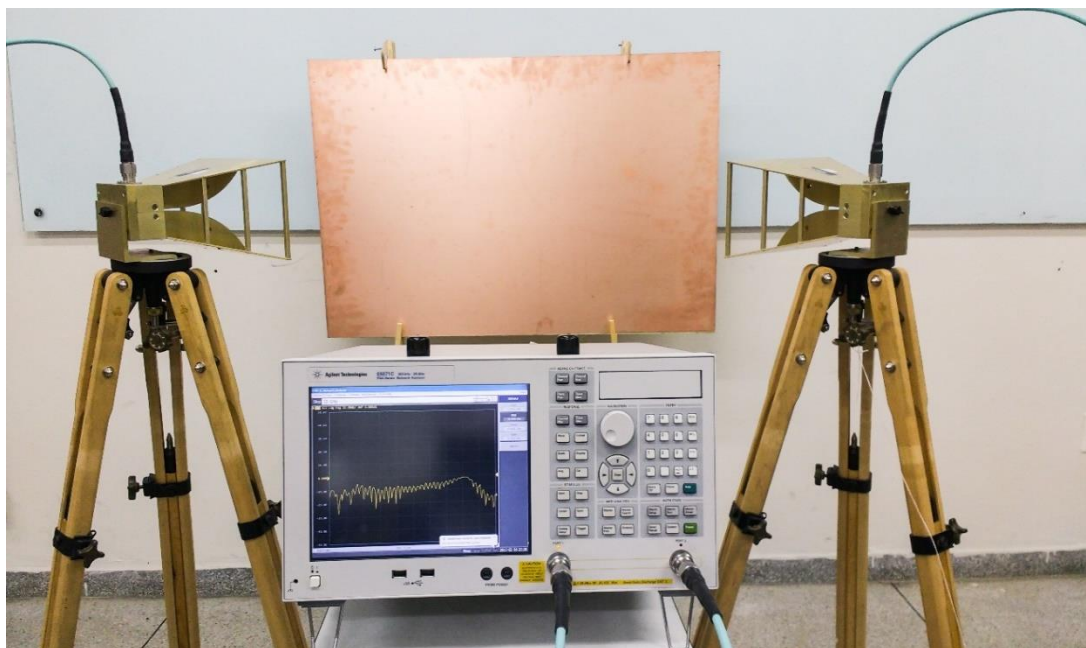


Figura 15 – *Setup* de medição com a placa metálica, em cobre.

A segunda série teve a finalidade, mas agora com o módulo de absorvedores posicionados no centro da área de reflexão, como mostra a Figura 15.

Nas duas séries variou-se o ângulo de incidência das antenas para quatro valores distintos: 0° , 30° , 45° e 60° .

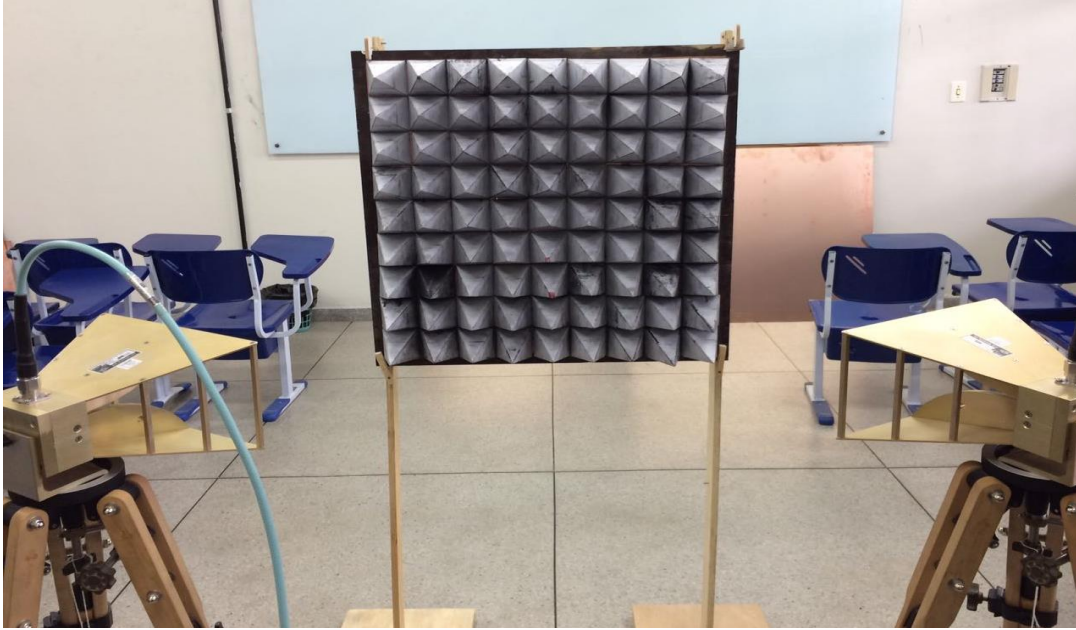


Figura 16 – *Setup* de testes para a caracterização do painel absorvedor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudo da Geometria das Pirâmides na Atenuação do Sinal

O dimensionamento da estrutura utilizada no absorvedor não é função apenas do material utilizado na sua construção. A geometria da estrutura também influencia na atenuação total do sinal refletido ou transmitido. A estrutura piramidal tem se mostrado mais eficiente na construção dos elementos absorvedores [5] devido a possibilidade de múltiplas reflexões do sinal incidente, sendo absorvido pelo material, reduzindo a possibilidade de reflexão, como já mostrado anteriormente na Figura 9.

Para verificar o efeito do tamanho/dimensão dos elementos absorvedores na refletividade da estrutura, foi realizada uma simulação numérica, utilizando o software HFSS, que usa o Método dos Elementos Finitos, na faixa de frequência entre 7 e 10 GHz. A geometria considerada é mostrada na Figura 16. As antenas e plano refletor foram construídos no interior de uma caixa de ar, de dimensões 1200 x 400 x 80mm, com paredes magnéticas nas laterais para considerar a simetria da estrutura segundo o plano z-y e reduzir o esforço computacional. As antenas foram posicionadas a 30° da superfície de um plano condutor de cobre.

Na simulação foram posicionadas cinco estruturas piramidais, com base quadrada, de dimensão 70 x 70 mm que representa o elemento absorvedor. Na simulação foram consideradas três dimensões de altura, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões do elemento absorvedor.

Denominação	Medida da altura (mm)	Relação altura/lado da base
Pirâmide 1	75	1,07
Pirâmide 2	100	1,43
Pirâmide 3	150	2,14

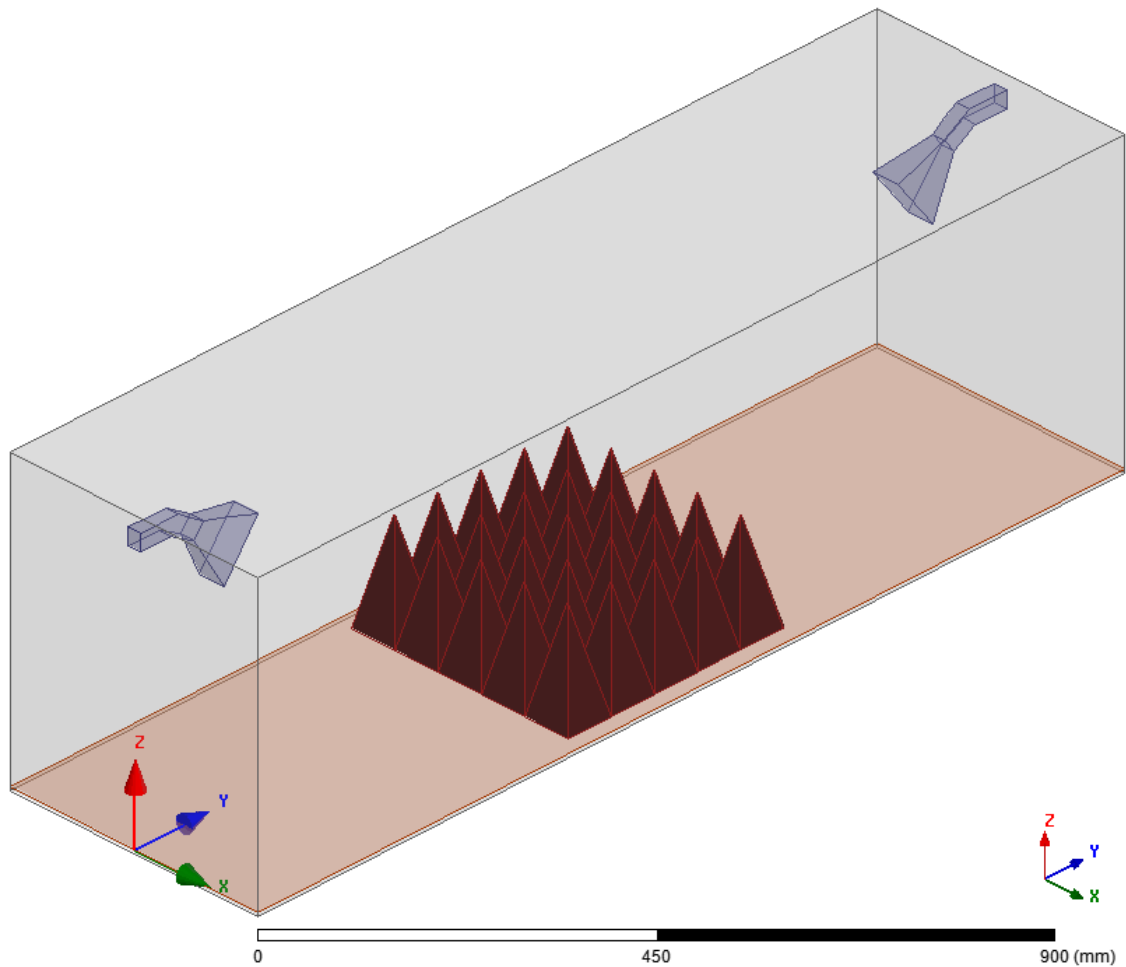


Figura 17 – Geometria utilizada na simulação.

Os elementos absorvedores piramidais foram considerados como sendo elementos sólidos de grafite. O HFSS possui este elemento na sua tabela de materiais, com quantidades $\epsilon_r' = 1,0$ e $\epsilon_r'' = 1,0$, $\mu_r = 1,0$ e $\sigma = 70000 \text{ Siemens/m}$. A primeira simulação considerou apenas a reflexão no plano condutor. Em seguida, foram considerados os elementos absorvedores para cada uma das dimensões acima. Considerando o tamanho da estrutura e grande número de elementos da malha do método, a simulação exige um grande esforço computacional e capacidade de memória para executar as simulações, de forma que o cálculo do parâmetro S_{21} de um ponto chega a demorar cerca de 10 horas de processamento. O resultado simulado para a atenuação, considerando cada altura do elemento absorvedor é mostrado na Figura 17.

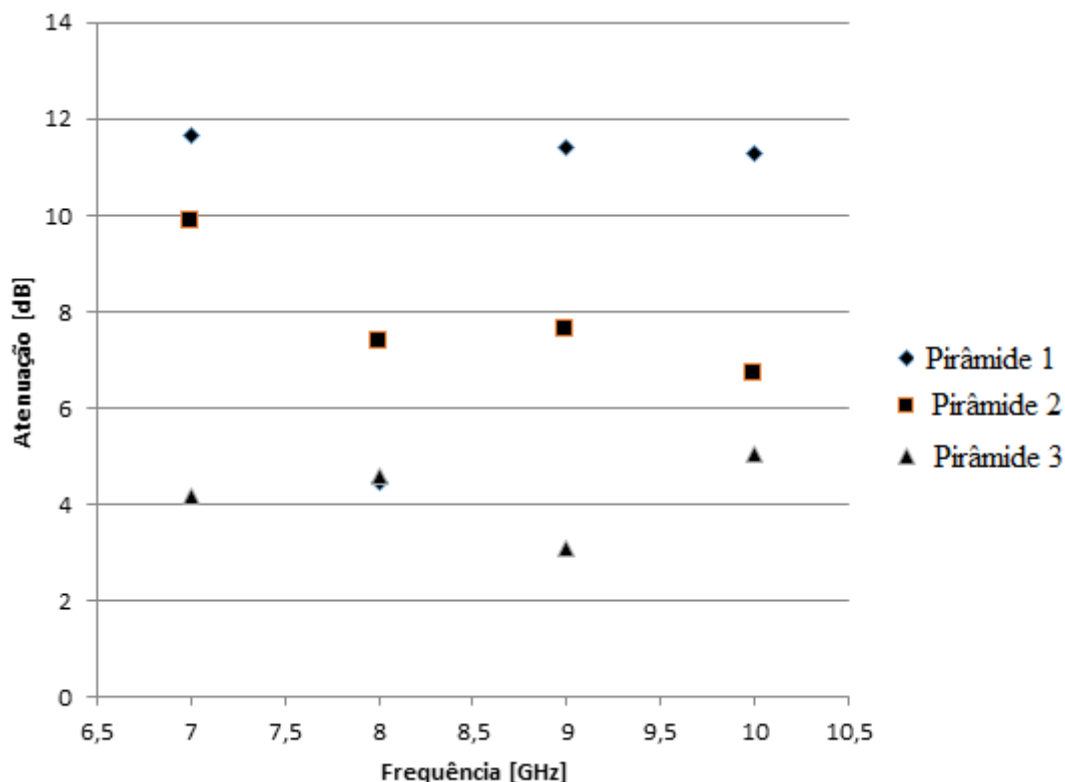


Figura 18– Atenuação produzida pelos elementos absorvedores em função da frequência e altura dos elementos da Tabela 5.

O resultado apresenta uma grande variação da refletividade da estrutura com a dimensão do elemento absorvedor. O melhor resultado, para a faixa de frequência considerada foi obtido com a altura de 75 mm, com relação base/lado da pirâmide de aproximadamente 1,0. Para este elemento, foi observada uma atenuação de 11,65 dB. Também foi observado que este valor aumenta com o aumento do número de elementos absorvedores.

4.2. Módulo Absorvedor

A configuração para caracterização experimental dos absorvedores, consistiu em utilizar duas antenas diretivas ligadas a um Analisador de Redes, apontadas para um ponto no centro do plano metálico refletor a uma distancia de 1,0 m, conforme apresentado na Figura 18. Inicialmente é determinado o sinal transmitido (S_{21}) apenas com o plano refletor, servindo como referência para as demais medições.

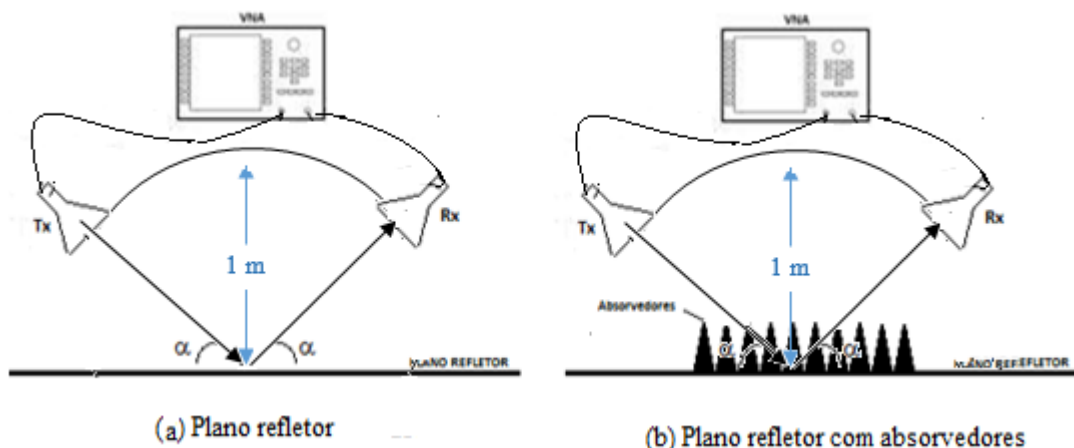


Figura 19 – Configuração para caracterização.

Os absorvedores foram instalados sobre a superfície refletora e a medição foi repetida para cada valor do ângulo de incidência, conforme Figura 18.

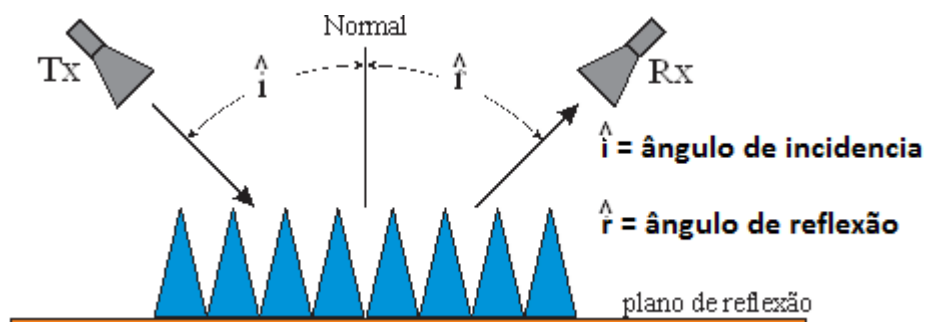


Figura 20 – Ângulo de incidência e de reflexão sobre a superfície de absorvedores.

Para as medições de caracterização dos painéis utilizou-se a técnica RCS, que consiste de uma medida estática, onde o painel que está sendo caracterizado permanece fixo em uma posição, enquanto as ondas incidem na superfície de referência, sendo em seguida refletidas e medidas na antena receptora. Finalizada a caracterização do painel refletor (referência), esse é substituído pelo painel revestido com a estrutura piramidal, posicionando-a exatamente no mesmo local do painel de referência. Em seguida, este painel é iluminado pela radiação emitida pela antena transmissora e o sinal refletido é medido na antena receptora. O posicionamento do painel é feito em um suporte situado a uma distância pré-fixada, atendendo à condição de campo distante [6], das antenas de transmissão e recepção, como mostrado na Figura 20 (a) e (b).



Figura 21– (a) Setup de caracterização da placa metálica de referência para medidas de refletividade. (b) Setup de caracterização do módulo absorvedor.

A refletividade é a relação entre a energia eletromagnética refletida e a energia incidente no material. A atenuação da refletividade, medida em dB. Assim, de acordo com a Enciclopédia Internacional de Compósitos (1991), essa relação entre a atenuação e a energia absorvida por um material pode ser vista na Tabela 6 [9].

Tabela 6 – Relação entre Refletividade e percentual de energia absorvida.

ATENUAÇÃO DA REFLETIVIDADE, dB	% DE ENERGIA ABSORVIDA
0	0
-3	50
-10	90
-15	96,9
-20	99,0
-30	99,90
-40	99,99

Dessa forma, uma atenuação em -10 dB, está associado ao VSWR (*Voltage state wave ratio* – relação de onda estável de tensão) é < 2 e indica que 90% da energia está sendo absorvida pelo módulo, na faixa de frequência indicada.

Para determinar a atenuação produzida pelo painel fabricado, foi utilizado um VNA (Analisador Vetorial de redes), ligado a antenas corneta diretivas de banda larga. Inicialmente foi posicionada uma placa metálica e medido a refletância para três diferentes ângulos de incidência, 30° , 45° e 60° e usados como referência. No mesmo local da placa metálica foi posicionado o painel absorvedor e medido a reflexão produzida para cada ângulo de incidência. Os resultados são mostrados nas Figuras 21 a 23.

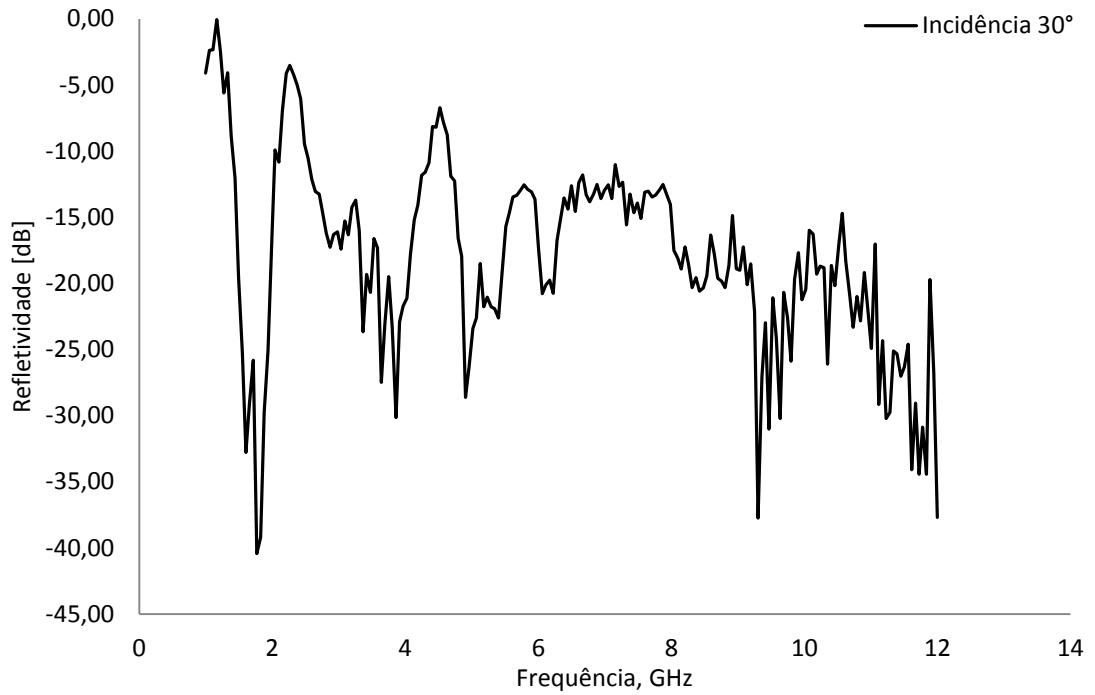


Figura 22– Atenuação medida para o ângulo de incidência de 30°. Fonte: elaborada pelo próprio autor

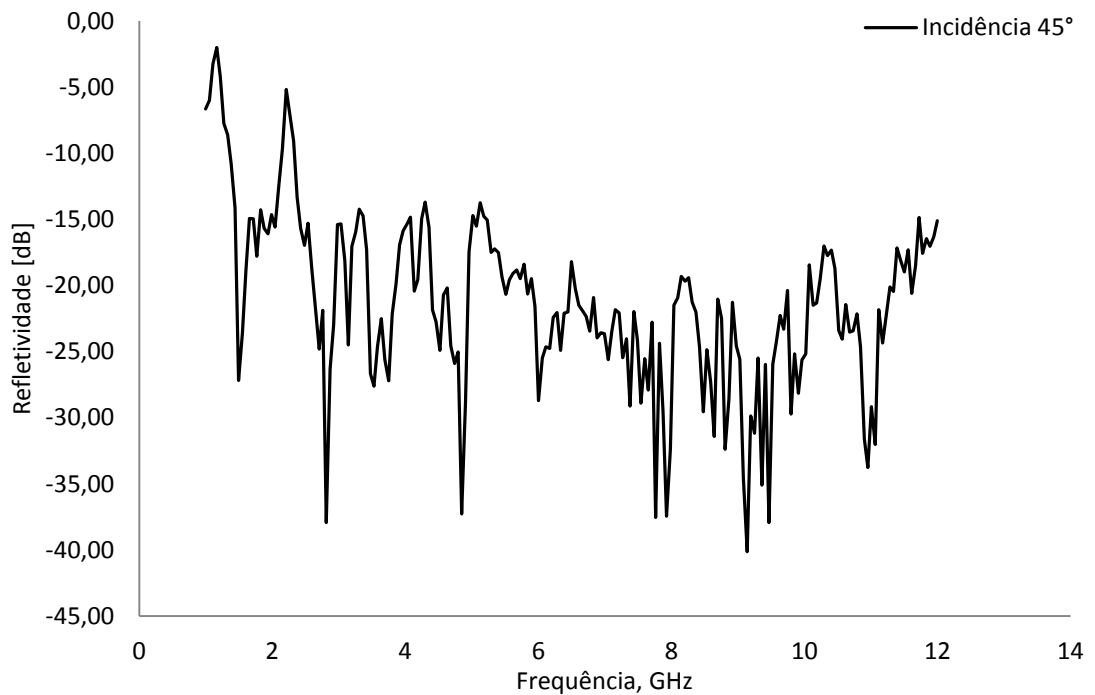


Figura 23– Atenuação medida para o ângulo de incidência de 45°. Fonte: elaborada pelo próprio autor

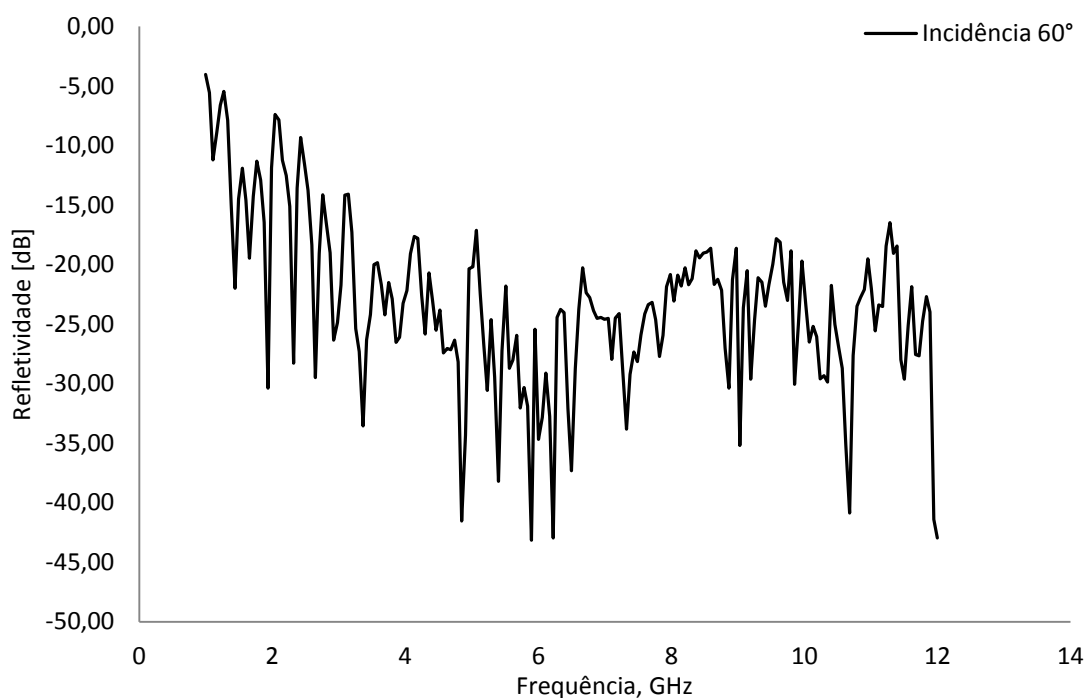


Figura 24— Atenuação medida para o ângulo de incidência de 60°. Fonte: elaborada pelo próprio autor

Para todos os ângulos de incidência, o painel construído apresentou diferentes desempenhos em função da frequência, que é um valor esperado, tendo em vista a dimensão da pirâmide em relação ao comprimento de onda. No início da faixa considerada (1 GHz), a razão altura x base de cada pirâmide absorvedora corresponde a aproximadamente $0,7 \lambda$ enquanto que no final da faixa 12 GHz ($\lambda = 2,5 \text{ m}$), a razão corresponde a $8,5 \lambda$.

Para uma incidência de 30°, o painel apresentou uma refletividade entre -7 e -23 dB na faixa de frequências entre 1 GHz e 7 GHz. Acima desta faixa, a refletividade aumenta com a frequência numa taxa de aproximadamente -11 dB/oitava, com valores maiores que -20dB. Para uma incidência de 45°, o painel apresentou refletividade entre -15 dB e -30 dB, sendo os valores maiores na faixa de frequências acima de 7 GHz. Finalmente, para uma incidência de 60°, o painel apresentou uma refletividade crescente entre 1 e 7 GHz, com uma taxa de -14 dB/oitava, enquanto que na faixa entre 7 e 12 GHz a refletividade variou entre -20 e -30 dB.

4.3. Aplicações do Módulo absorvedor

Depois de feita a caracterização, o painel absorvedor foi utilizado no laboratório de micro-ondas, em dois ensaios com FSS, um com FSS do tipo *Patch* e outro com FSS do tipo *Slot*. Duas antenas cornetas, que trabalham na banda X (8 a 12 GHz), foram colocadas a uma distancia de 90 cm uma da outra e entre elas, no ponto médio posicionou-se o painel com a sua janela central aberta. Este processo foi repetido para duas situações: (a) Utilizando como

referência, um painel construído pela UFRN com absorvedores comerciais, (Figura 24-a) e (b) Utilizando o painel construído e proposto no presente trabalho (Figura 24-b). Os valores são comparados com valores teóricos, obtidos com a utilização do ANSOFT, que é um software que analisa com rapidez e precisão a integridade do sinal, problemas de integridade de energia e EMI de um único ambiente de esquema e layout.

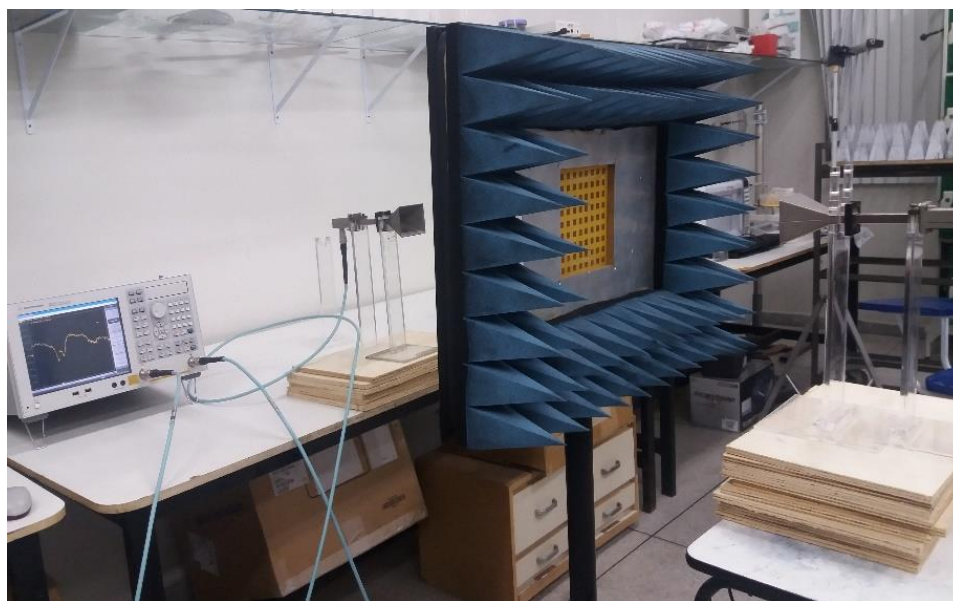


Figura 25– Medida da FSS com módulo Absorvedor Comercial (UFRN).

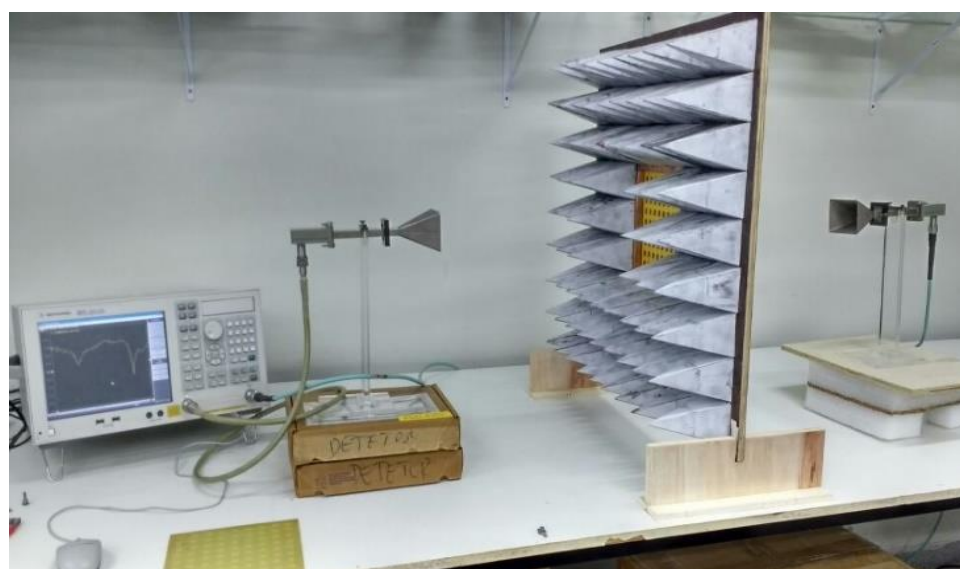


Figura 26– (b) Medida da FSS com módulo de baixo custo

Para obtenção dos primeiros resultados foi montado um *setup* sem o uso dos dispositivos sob teste isto é, sem as FSS nas janelas. O ensaio foi feito comparando-se apenas a medição do espaço livre e os painéis absorvedores proposto e o de referencia. Os valores são mostrados na Figura 25.

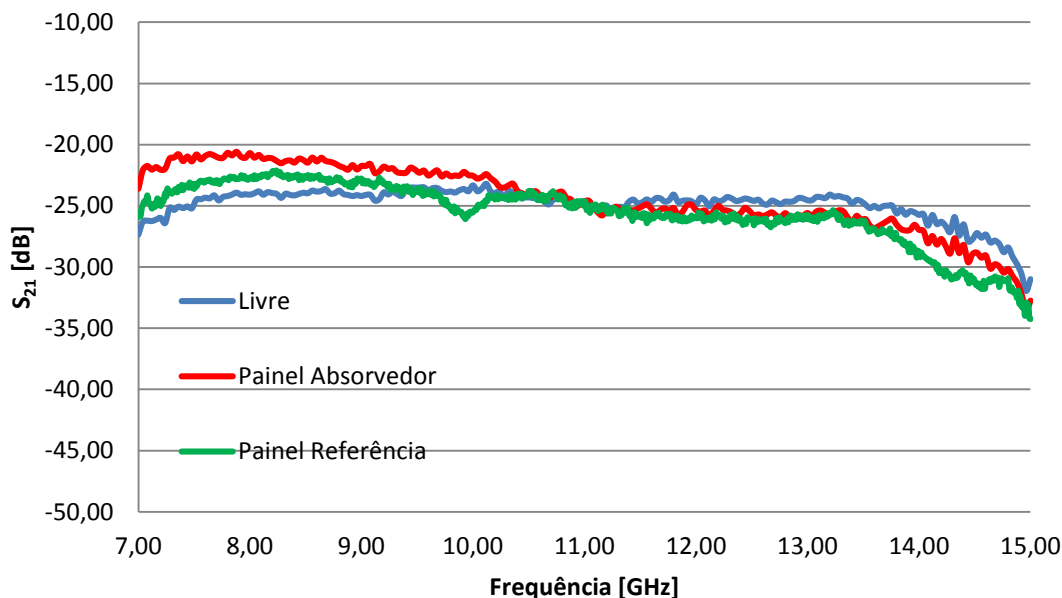


Figura 27– Medidas efetuadas em vazio.

Ressalte-se que as janelas de medição, deixaram passar a maior parte do sinal na sua abertura.

O segundo passo, foram as medições usando as FSS nas janelas dos painéis. Os valores obtidos para a FSS tipo *patch* é mostrado na Figura 26 e do tipo *slot* é mostrado na Figura 27.

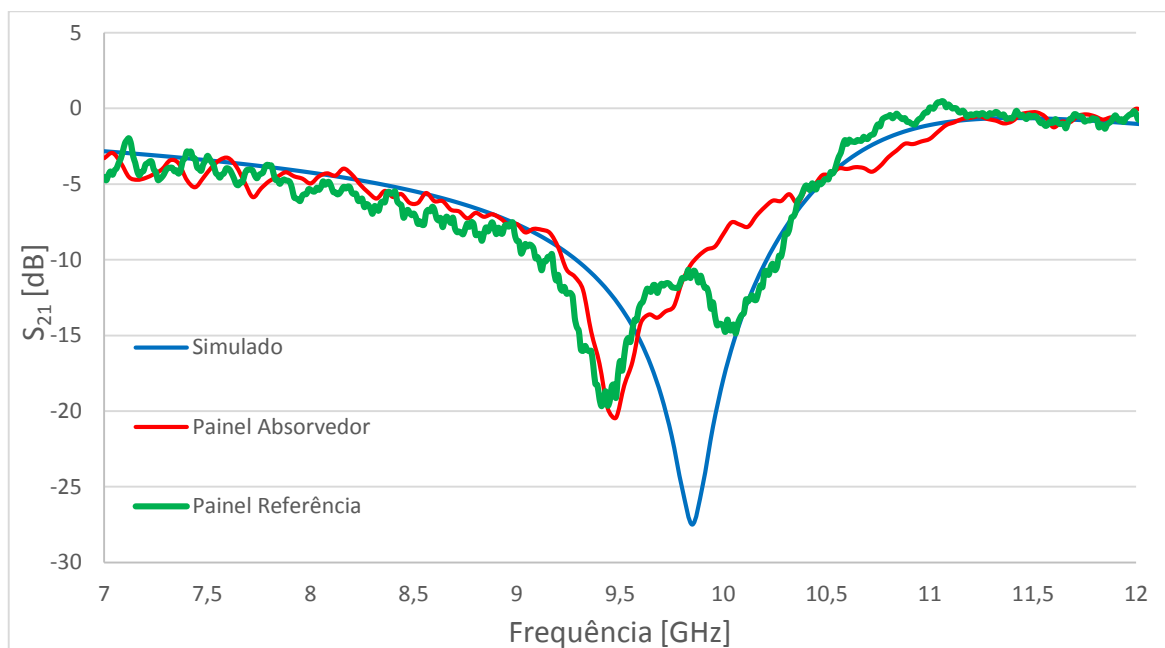
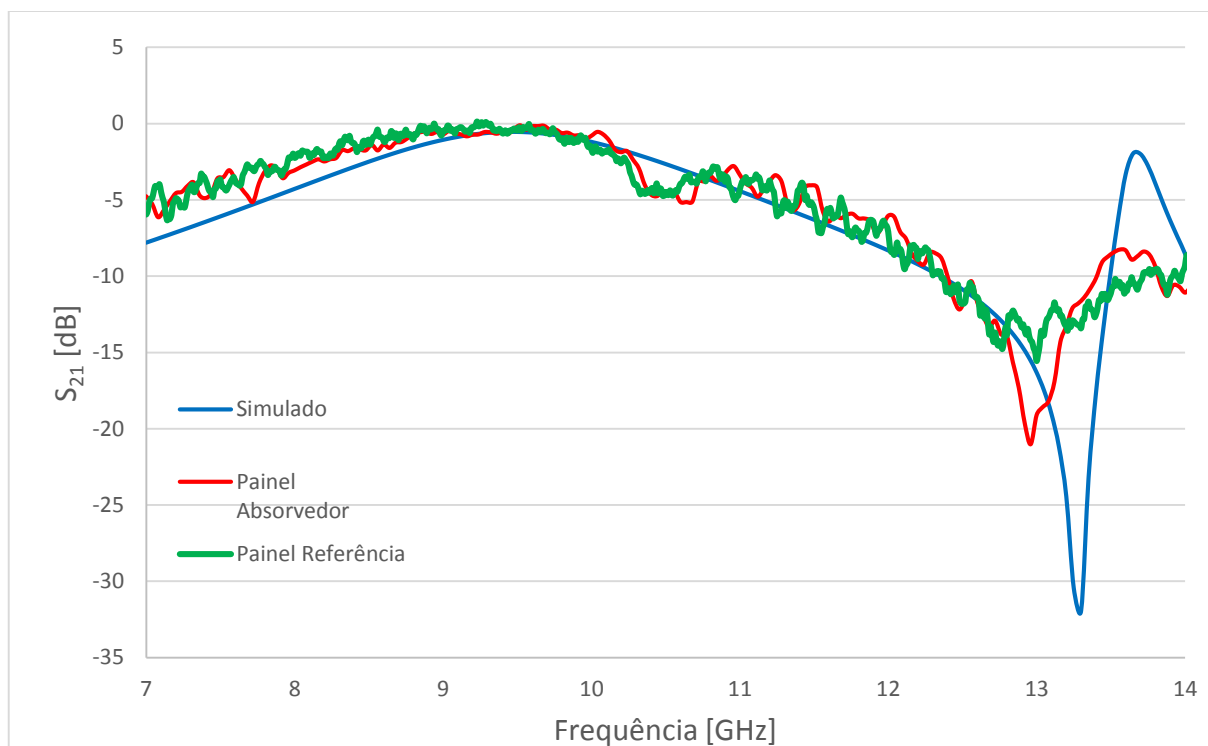


Figura 28– Medidas efetuadas com a FSS tipo *Patch*.

Figura 29– Medidas efetuadas com a FSS tipo *Slot*.

Com o uso dos painéis, o resultado ficou bastante semelhante entre eles e comparáveis ao valor teórico, o que comprova a eficiência da estrutura proposta, na faixa de frequência das antenas. Os resultados mostram que o painel atenua fortemente os sinais espalhados pelo *setup* de medição, reduzindo as fontes de erro de multipercursos. Para todos os casos, a ressonância observada tem um desvio em relação ao valor teórico, portanto não foi distorcida pela presença dos painéis. Os resultados mostrados nas Figuras 26 e 27 mostram que o painel é eficaz naquilo que foi proposto .

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados dos estudos realizados com a construção e caracterização de um painel absorvedor de radiação eletromagnética de baixo custo para aplicações em ambientes de Laboratório de micro-ondas.

Os materiais utilizados na construção do módulo absorvedor é considerado de baixo custo e foram selecionados materiais acessíveis no comércio como: PVC, isopor, cola branca, e grafite em pó.

Construiu-se elementos absorvedores considerado de grafite em pó. A eficiência do elemento absorvedor, utilizado no painel, foi medida através da técnica da Seção Transversal de Radar (RCS). A relação entre a perda de reflexão (dB) e a porcentagem da absorção do sinal de radiação foi obtida via medidas de refletividade, utilizando o método do Arco (RNL).

As metodologias utilizadas para as medições são consideradas de fácil manuseio por permitir o ensaio com elementos absorvedores de diversos materiais com diversos tamanhos e geometrias.

Foram realizadas medições com três ângulos de incidência de radiação sobre uma superfície refletora metálica que serviu como parâmetro para as mesmas três medições com o uso do painel absorvedor, numa gama de frequência de 1 GHz até 12 GHz.

Observou-se que a o painel absorvedor construído, produziu uma atenuação superior a 25 dB para algumas frequências e que os ângulos de incidência mais rasantes produziram uma maior variação na atenuação resultante. De forma geral, o painel absorvedor produziu uma atenuação sempre maior que 10 dB, chegando a 25 dB em algumas faixas específicas.

Os resultados obtidos no presente trabalho encorajam o prosseguimento em novos estudos, com a identificação de características de outros materiais, que tenha facilidade de acesso e possa ter efeitos significativos nos ambientes dos laboratórios, quando se tratar de determinação de valores experimentais mais próximos dos reais.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

1. Investigar os efeitos da densidade do grafite em pó nos valores das medidas da refletividade;

2. Investigar os valores da espessura das paredes da camada de grafite dentro da pirâmide com relação a constante de perdas;
3. Realizar simulações numéricas, com software HFSS, que utiliza o Método dos Elementos Finitos, para ampliar os estudos sobre a influência das características geométricas da estrutura na perda produzida (dimensão, forma, quantidade etc.);
4. Construir um banco de dados com características dielétricas de materiais absorvedores;
5. Estudar a influência das reflexões no painel, fazendo ensaios dentro de uma câmara anecóica.

5.2. Trabalhos Publicados

A. P., Costa; J. G. S., Gomes; J. N., Carvalho; M. A., Oliveira; J. G. O., Mariano. Caracterização das Propriedades Dielétricas do Mamão Papaia. MOMAG_2016. Porto Alegre, 2016.

Artigos em submissão

A. P., Costa; J. G. S., Gomes; J. N., Carvalho; M. A., Oliveira; N. C., Santos; G., Fontgalland; G. G. S., Fortes. Low-cost Electromagnetic Radiation Absorbing Modules. IMOC 2017. Águas de Lindoia – São Paulo, 2017. Artigo em submissão.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. S. Assis, "Introdução à propagação das ondas eletromagnéticas," em *Encontro anual em comunicações, redes e criptografia – ENCOM 2012*, Campina Grande, 2012.
- [2] E. Lindgren, "emctest," [Online]. Available: <http://www.emctest.com>. [Acesso em novembro 2016].
- [3] J. D. Krauss e D. A. Fleish, *Electromagnetic with Applications*, Singapore: CB/McGraw-Hill, 1999.
- [4] J. C. Dias, "Refletividade de Fótons Micro-ondas por tintas poliuretânicas aditadas com ferritas de NiZn," *Revista Fisica aplicada e Instrumentação*, 2005.
- [5] M. H. C. Dias, D. S. Silva, E. F. Silva e C. A. K. Queiros, "Considerações sobre a interferência eletromagnética irradiada em equipamentos eletromédicos XXIII: 67-76, 2006," *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, pp. 67-76, 2006.
- [6] V. A. Silva, J. J. Pereira, E. L. Nohara, e R. M. Cerqueira., "Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La," *Journal of Aerospace Technology and Management*, pp. 255-256, 2 Dezembro 2009.
- [7] American National Standard Dictionary of Electromagnetic Compatibility, New York: American National Standards Institute , 2009.
- [8] F. J. Keller, W. E. Gettys e S. M. J. Física I, São Paulo: Makron Books, 1999.
- [9] S. M. Lee, *International Encyclopedia of Composites*, New York: VHC Publishers, 1991.
- [10] F. W. Trautnitz, "EMC Absorbers through the Years with Respect to the New Site VSWR Validation Procedure in the Frequency Range from 1 to 18 GHz - a Practical Approach," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-6, Honolulu, HI, 2007.
- [11] Z. Liyana, , F. Malek, , H. Nornikman, N. A. Mohd Affendi, L. Mohamed, N. Saudin & A. A. Ali,"Investigation of Sugar Cane Bagasse as Alternative Material for Pyramidal Microwave Absorber," em *IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*, Bandung, Indonesia, 2012.
- [12] Z. S. Farhany, F. Malek, H. Nornikman, N. A. Mohd, L. Affendi, , N. Moamed & A. A. Ali Saudin,"Potential of Dried Banana Leaves for Pyramidal Microwave Absorber Design.," em *IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications*, Bandung, Indonésia, 2012.
- [13] S. -S. Kim, M. -G. Cheong e B. -I. Yoon, "Ferrite-Epoxy Absorber on Carbon Fiber Composite Substrate," *Journal de Physique IV Colloque*, vol. 07, n° C1, pp. 425-426, março 1997.
- [14] N. C. Currie, *Radar Reflectivity Measurement: Techniques and Applications*. Artech house, Norwood, 1 ed., 1989., Norwood: Artech House, 1989.

- [15] Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, “Journal de Physique III,” *Ferrite-Epoxy Absorber on Carbon Fiber Composite Substrate*, pp. 360-763, mars 1997.
- [16] J. M. Ferrara, *Avionics: A Practical User’s and Buyer’s Guide to Avionics – Volume 1*. EUA: ., 1989. 275p., EUA: Air and Space Co, 1989.
- [17] A. B. Djurišić, E. H. Li , “Optical properties of graphite,” *J. Appl. Phys*, pp. 7404-7410, 1999.
- [18] F. İçier e T. Baysal, “Dielectrical Properties of Food Materials”1: Factors Affecting and Industrial Uses,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. vol. 44, pp. 465-471,, 2004.
- [19] Fapesp, “Drible no radar,” *Revista Pesquisa Fapesp*, vol. 93, p. 72, 2003.
- [20] F. Malek, E. M. Cheng, O. Nadiyah, H. Nornikman, M. Ahmed, M. Z. A Abd Aziz, P. J. Soh, A.A. H. Azrem, A. Hasnain, e M. N. Taib, “Rubber Tire Dust-Rice Husk Pyramidal Microwave Absorber,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 117, pp. 449-477, 2011.
- [21] Z. D. J. a. P. Cohn, “Ceramic Transactions,” em *Advanced Ferrite Materials for Anechoic Chambers*, 1995, p. 269 – 284.
- [22] E. L. Nohara, “Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos,” ITA, São José dos Campos, 2016.
- [23] A. B. D. and e E. H. Li., “Optical properties of graphite,” *J. Appl. Phys.* 85, pp. 7404-7410, 1999.
- [24] S. B. Cho, D. H. Kang e J. H. Oh, “Relationship between magnetics properties and microwave absorbing characteristics of NiZnCo ferrites composites.,” *Journal of Materials Science*, pp. 4719-4722, 1996.
- [25] F. Padilha, *Materiais de Engenharia; Microestrutura e Propriedades.*, Curitiba: Hemus, 2000.
- [26] M. A. Duarte, *Sumário Mineral.*, Belo Horizonte: DNPM/MG, 2004.
- [27] M. S. Venkatesh e G. S. V. Raghavan, “An overview of dielectric properties measuring techniques,” *Candian Biosystems Engineering*, vol. 47, pp. 18-27, 2005.
- [28] Alibaba.com, “<https://www.alibaba.com/?spm=a2700.8239084.header.6.0Fu3X0>,” Alibaba.com, 02 maio 2017. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/EMCPIONEER-Pyramidal-Microwave-Absorbers-for-Anechoic_60607325465.html. [Acesso em 02 05 2017].
- [29] L. C. Folgueras, *Obtenção e caracterização de materiais absorvedores de micro-ondas flexíveis impregnados com polianilina. Tese (Doutorado) -*, São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2005.