



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO**

**Mestrado em Engenharia Elétrica**

**ABSORVEDORES METAMATERIAIS BASEADOS EM ÁGUA  
PARA APLICAÇÕES EM MICROONDAS**

**FLÁVIO SILVA SANTOS**

Autor

**VITALY FÉLIX RODRIGUEZ ESQUERRE**

Orientador

**SALVADOR**

**2021**

# **ABSORVEDORES METAMATERIAIS BASEADOS EM ÁGUA PARA APLICAÇÕES EM MICROONDAS**

Autor: Flávio Silva Santos  
Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia - UFBA, como pré-requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

SALVADOR  
2021

Silva Santos, Flávio

Absorvedores Metamateriais Baseados Em Água Para Aplicações Em Microondas / Flávio Silva Santos. -- Salvador, 2021. 79 f. : il

Orientador: Vitaly Felix Rodriguez Esquerre. Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2021.

1. Metamateriais. 2. Absorvedores. 3. Microondas. I. Felix Rodriguez Esquerre, Vitaly. II. Título.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO**

**Mestrado em Engenharia Elétrica**

**ABSORVEDORES METAMATERIAIS  
BASEADOS EM ÁGUA PARA APLICAÇÕES EM  
MICROONDAS**

**Dissertação de Mestrado**

Autor: Flávio Silva Santos

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez Esquerre

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Vitaly Félix Rodriguez Esquerre  
Orientador/UFBA

---

Prof. Dr. Juarez Caetano da Silva  
IFBA

---

Prof.ª. Dr.ª. Ana Julia Fernandes de Oliveira Barros  
UNIVASF

## Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, principalmente a Mainha Dona Jenice, que eu não estaria aqui se não fosse pelo incentivo ao estudo que ela me deu durante todo o meu percurso até o momento, e a quem terei eterna gratidão.

A minha noiva Dêva, que tem sido mais do que uma companheira, que sempre pude contar com a poio, incentivo, carinho, amor e principalmente paciência durante a jornada.

Ao meu Orientador Professor Dr. Vitaly Felix Rodrigues Esquerre, pela oportunidade de realizar um grande passo acadêmico importante em minha vida, por ter paciência, e auxiliado nesse processo com conhecimento, e no desenvolvimento de minhas habilidades na pesquisa.

Aos colegas de pesquisa, do Laboratório de pesquisa de Telecomunicações (Labetel), e em especial Israel Alves Oliveira que, me deu um enorme suporte durante meu processo de aprendizagem, e que tenho como irmão.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação que me deram suporte em suas contribuições durante as disciplinas ministradas.

E a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo apoio financeiro na concessão da bolsa durante o processo no Programa.

*Nothing to the nothing! "SIC  
MUNDUS CREATUS EST"*

## **RESUMO**

Nesta dissertação foram analisados numericamente o comportamento de modelos de metamateriais absorvedores puramente dielétricos baseados em água, em relação a determinados aspectos geométricos e diferentes materiais em sua composição, com a finalidade de compreender os aspectos físicos da absorção, para níveis de absorção acima de 90% em uma banda larga de frequência na faixa do micro-ondas. Os metamateriais absorvedores foram analisados em uma grande banda larga de frequência, entre 4,99 GHz – 29,99 GHz, utilizando as resinas encontradas na literatura atual. Para as mesmas, foram analisados modos Transversais Elétrico (TE) e Magnético (TM), em diferentes ângulos de incidência (15°, 30°, 45° e 60°) de feixes eletromagnéticos. Por fim, foi observado para alguma das estruturas proposta, absorção acima de 90% para grande banda larga de frequência e ultra banda larga de frequência, podendo observar o comportamento da água em diferentes temperaturas (27 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C). Tais estruturas são de fácil construção para serem fabricadas, apresentam baixo custo de produção e possibilidade para aplicação tecnológica em comunicações óticas.

**Palavras-chave:** Absorvedores. Metamateriais. Permissividade.

## **ABSTRACT**

In this dissertation, the behavior of purely dielectric absorber metamaterials models based on water in relation to certain geometric aspects and different materials in their composition were analyzed numerically, in order to understand the physical aspects of absorption, for absorption levels above 90% in a broadband frequency in the microwave range. The absorbent metamaterials were analyzed in a large frequency band, between 4.99 GHz - 29.99 GHz, using the resins found in the current literature. For them, Transversal Electric (TE) and Magnetic (TM) modes were analyzed at different angles of incidence (15°, 30°, 45° and 60°) of electromagnetic beams. Finally, it was observed for some of the proposed structures, absorption above 90% for large frequency broadband and ultra frequency broadband, being able to observe the behavior of water at different temperatures (27 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C and 100 °C). Such structures are easy to build to be manufactured, have a low production cost and the possibility for technological application in optical communications.

**Keywords:** Absorbers. Metamaterials. Permissiveness.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Ressonador Elétrico proposto por Landy [25].....	16
Figura 2 - Pico de absorção para diferentes camadas na estrutura apresentada em [25].....	17
Figura 3 - Estrutura do Metamaterial absorvedor à esquerda, e a direita o desempenho da absorção, transmitividade e reflexão das ondas incidentes na estrutura [25].....	17
Figura 4 - Estrutura confeccionada com tecnologia 3D por [27]. .....	18
Figura 5 - (a) Modelo de metamaterial absorvedor de solo arenoso úmido (PSA) simulado em [2]. (b) Célula unitária do PSA [2]. .....	19
Figura 6 - Metamaterial absorvedor de solo arenoso úmido (PSA) construído em [2].....	20
Figura 7 - Exemplo de discretização de um metamaterial absorvedor com base trapezoidal. ....	21
Figura 8 - Exemplo de duas malhas de elementos finitos. a) Quadrangulares e b) Triangulares. ....	21
Figura 9 - Discretização de uma região $\phi$ com elementos triangulares. ....	22
Figura 10- Gráfico da Permissividade real e imaginária da água em função da frequência [1]....	30
Figura 11 - Absorvedor puramente dielétrico analisado por [9] utilizando o princípio de Huygens. ....	31
Figura 12 - Modelo cilíndrico de ressonador dielétrico, com resultados das absorções para o modo TE [6]......	32
Figura 13 - Esquema do ressonador dielétrico proposto por [1], e o resultado para os quatro picos de frequência para as absorções para diferentes configurações [1].....	33
Figura 14 - Material construído e absorção da medida e simulada [1] (modificado). .....	34
Figura 15 - Célula unitária do PSA [2]. .....	35
Figura 16 - a) Modelo I proposto por [2] sem a base de cobre. b) Modelo II proposto por [2] com uma base de cobre.....	35
Figura 17 - Resultados dos dois modelos proposto por [2]. .....	36
Figura 18 - Absorção para diferentes configurações na geometria [2]. .....	36
Figura 19 - Resultados alcançados por [21] para a absorção para o intervalo de frequência de 4 GHz – 28 GHz .....	38
Figura 20 - Distribuições de vetores de (a) campos elétricos e (b) magnéticos em frequências de ressonância: 13,0 GHz (topo), 19,6 GHz (meio) e 27,3 GHz (baixo) [8]. .....	39

Figura 21 - Espectros de absortividade simulados e medidos do absorvedor de metamaterial de água. A inserção (a) mostra o absorvedor de metamaterial conforme preparado consistindo em subestruturas de $6 \times 6$ (isto é, $12 \times 12$ células unitárias) e (b) é uma subestrutura .....	40
Figura 22 - Estrutura do metamaterial absorvedor dielétrico/água/dielétrico .....	41
Figura 23 - Absorção no metamaterial para as diferentes resinas no intervalo de frequência 5.99 GHz à 29.99 GHz .....	42
Figura 24 - Absorção em função da frequência, para os ângulos de incidência de $15^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ do modo TE, para a) FR4-LPM [23], b) FR4 [24] e UV-PR [5] .....	43
Figura 25 - Absorção em função da frequência para o FR4 [24], nas temperaturas de $27^\circ\text{C}$ , $40^\circ\text{C}$ , $60^\circ\text{C}$ , $80^\circ\text{C}$ e $100^\circ\text{C}$ .....	44
Figura 26 - Distribuição do campo magnético no metamaterial: a) 20,75 GHz, b) 25,55 GHz e c) 29,87 GHz.....	44
Figura 27 - Metamaterial absorvedor proposto de base trapezoidal (Estrutura 1), configurado em resina/água/resina. ....	45
Figura 28 - Absorção para diferentes resinas a $27^\circ\text{C}$ para o modo TE.....	47
Figura 29 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de $27^\circ\text{C}$ em 27,008 GHz.....	47
Figura 30 - Absorção para o metamaterial com FR4/água/FR4, para as temperaturas de $40^\circ\text{C}$ , $60^\circ\text{C}$ , $80^\circ\text{C}$ e $100^\circ\text{C}$ , para o modo TE.....	48
Figura 31 - Absorção para o metamaterial com FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência de $15^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ , para o modo TE.....	49
Figura 32 - Absorção para o metamaterial com FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência de $15^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ e $60^\circ$ , para o modo TM. ....	50
Figura 33 - Metamaterial absorvedor proposto de topo triangular (Estrutura 2), configurado em resina/água/resina. ....	51
Figura 34 - Absorção na estrutura (2) para diferentes resinas a $27^\circ\text{C}$ para o modo TE. ....	51
Figura 35 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de $27^\circ\text{C}$ em 15,29 GHz.....	52
Figura 36 - Absorção para a estrutura (2) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para as temperaturas de $40^\circ\text{C}$ , $60^\circ\text{C}$ , $80^\circ\text{C}$ e $100^\circ\text{C}$ , para o modo TE. ....	53
Figura 37 - Absorção para a estrutura (2) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para	

os ângulos de incidência de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo TE.....	54
Figura 38 - Absorção para a estrutura (2) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo TM. ....	55
Figura 39 - Metamaterial absorvedor proposto de topo triangular invertida (Estrutura 3), configurado em resina/água/resina. ....	56
Figura 40 – Resultado da Absorção na estrutura (3) para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE. ....	56
Figura 41- Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 18,31 GHz, para FR4/água/FR4 .....	57
Figura 42 - Absorção para a estrutura (3) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100° C, para o modo TE. ....	57
Figura 43 - Absorção para a estrutura (3) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência oblíqua de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo TE.....	58
Figura 44 - Absorção para a estrutura (3) para os ângulos de incidência 0°, 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, no modo TM, para as resinas: a) Resina[1], b) Resina [21], c) PMMA [1], d) PMMA [4], e) Plexiglas [3], f) Photopolymer [9], g) UV-PR [5], h) VC810 [9], i) TPU [7], j) FR4[23], k) FR4 [24], l) FR4-LPM [6]. ....	59
Figura 45 - Metamaterial absorvedor proposto de topo em semicírculo de concavidade para baixo (Estrutura 4), configurado em resina/água/resina. ....	60
Figura 46 - Resultado da Absorção na estrutura (4) topo semicircular para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE. ....	61
Figura 47 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 23,14 GHz, para FR4/água/FR4. ....	61
Figura 48 - Absorção para a estrutura (4) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100° C, para o modo TE. ....	62
Figura 49 - Absorção para a estrutura (6) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência oblíqua de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo TE.....	63
Figura 50 - Absorção para a estrutura (6) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência oblíqua de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo TM.....	64
Figura 51 - Metamaterial absorvedor proposto de topo em semicírculo de concavidade para cima (Estrutura 5), configurado em resina/água/resina. ....	65

Figura 52 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 27,13 GHz, para FR4-LPM/água/FR4-LPM. ....	65
Figura 53 - Resultado da Absorção na estrutura (5) topo semicircular com concavidade para cima para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE. ....	66
Figura 54 - Absorção para a estrutura (4) metamaterial com a configuração FR4-LPM/água/FR4-LPM, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100° C, para o modo TE. ....	66
Figura 55 - Absorção para a estrutura (6) metamaterial com a configuração FR4-LPM/água/FR4-LPM, para os ângulos de incidência oblíqua de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo TE. ....	67
Figura 56 - Absorção para a estrutura (6) metamaterial com a configuração FR4-LPM/água/FR4-LPM, para os ângulos de incidência oblíqua de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo TM. ....	68
Figura 57 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros H1 e W1 na estrutura trapezoidal, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.....	69
Figura 58 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros H1 e W1 na estrutura triangular, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.....	70
Figura 59 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros H1 e W1 na estrutura triangular com topo invertido, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.....	70
Figura 60 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros H2 e W1 na estrutura circular com concavidade para baixo, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.....	71
Figura 61 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros H2 e W1 na estrutura circular com concavidade para o alto, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.....	71

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Tabela da permissividade real e imaginária dos dielétricos simulados [29]. .....	42
Tabela 2 - Tabela da permissividade real e imaginária dos dielétricos simulados na estrutura da figura (26) para o intervalo de frequência 4,99 GHz a 29,99 GHz .....	46

# SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	14
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Estado da arte.....	16
1.4 Organização do trabalho.....	18
Capítulo 2 .....	19
2.2.1 <i>Método dos Elementos finitos</i> .....	20
2.4 Metamateriais absorvedores com base em água.....	29
Capítulo 3 .....	41
3.2 Variação estrutural da geometria.....	45
3.2 Comportamento para variação de características geométricas.....	68
3.2.2 <i>Estrutura de triangular</i> .....	69
3.2.3 <i>Estrutura Triangular invertida</i> .....	70
3.4 Conclusões.....	72
3.4.1 <i>Trabalhos Futuros</i> .....	73
3.4.2 <i>Publicações associadas ao trabalho</i> .....	73
Referências .....	75

# *Capítulo 1*

## *1.1 INTRODUÇÃO*

Os metamateriais absorvedores têm se constituído como fonte de grande interesse de estudo nos campos das engenharias em telecomunicações e na Física, no estudo dos modos transversais Elétricos e Magnético, devido a sua capacidade de absorção de ondas eletromagnéticas e capacidade de redução de perda de potência óptica em sua superfície [1 – 8].

Tais estruturas tem-se tornado uma área de pesquisa emergente desde que o primeiro foi construído por Landy (2008) [1]. As mesmas, são geralmente constituídos por materiais dielétricos e metais, por apresentarem bons desempenhos para absorção de ondas eletromagnéticas.

Buscando encontrar materiais de baixo custo que contenham propriedades que possibilitem altos níveis de absorção, os estudos atuais têm apontado estruturas com base em água como opções viáveis, uma vez que apresentam grande perda dielétrica, que é a razão entre a permissividade real e imaginária do material, [1], [2], [5], [8], [10], [13], [15 - 20], além de ser um recurso encontrado em abundância na natureza.

Com o rápido desenvolvimento de metamateriais, progressos foram feitos em diversas aplicações, como eliminar radiação eletromagnética em eletrônicos de consumo [3], coleta de energia eletromagnética [17], quiralidade óptica artificial [4], absorvedor para furtividade eletromagnética, como para alvos marítimos [5], [9] e sensoriamento [6], aplicação para redução de espalhamento de banda larga, captação de energia eletromagnética e tecnologia Stealth (para fins militares) [1]. Uma aplicação particularmente importante de metamateriais é a criação de absorvedores perfeitos que podem absorver totalmente as ondas incidentes em determinadas frequências [1 – 7]. As pesquisas na área estão se voltando para as bandas largas de operação nas diferentes aplicações, seja em estruturas de multicamadas, seja em diferentes formatos de materiais, os quais apresentam distintos níveis de perda e uma grande variação de materiais para a construção dos dispositivos.

Atualmente, os estudos relacionados aos metamateriais têm analisado estruturas que possibilitem altos níveis de absorção para diferentes configurações, tanto da geometria da estrutura como dos diferentes materiais encontrados na natureza, que permitam a absorção nos metamateriais acima de 90% das ondas eletromagnéticas incidentes em sua superfície, com

elementos que apresentem altas perdas dielétricas e permissividade que possibilite um maior desempenho na capacidade de absorção para diferentes faixas de frequência [1].

Inicialmente, este trabalho apresentará a revisão bibliográfica, que deu suporte ao entendimento dos fenômenos e do comportamento das estruturas sob diferentes perspectivas, analisando metamateriais com base em água em suas diversas geometrias e suas respectivas capacidades de absorção. E com base em uma estrutura, validada computacionalmente, propondo mudanças geométricas, com o intuito de alcançar melhores resultados, comparando com diferentes materiais e características geométricas.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho projetou e analisou numericamente metamateriais absorvedores puramente dielétricos com base em água pura, do campo no modo transversal elétrico (TE) e Magnético (TM), por meio de análise de resultados de simulações computacionais, aperfeiçoando numericamente as características geométricas, comparando geometrias com diferentes aspectos, como seu formato trapezoidal, triangular e semiesférica, como visto na literatura atual nas estruturas dos metamateriais com base em água pura. A análise da absorção foi realizada na faixa do micro-ondas, entre o intervalo de 4,99 GHz à 29,99 GHz, tal que, suas configurações apresentem índices de absorção acima dos 90%, com possibilidade de fabricação a baixo custo, com dielétricos de fácil acesso, e com facilidade de construção, como por exemplo com o uso impressoras 3D, como é apresentado no referencial bibliográfico.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos foram: (sugerido)

- Compreensão o comportamento físico dos metamateriais;
- Compreensão de técnicas de simulação;
- Realizar uma revisão bibliográfica de estruturas de metamateriais com base em água;
- Propor configurações otimizadas de novas estruturas.

### 1.2.3 Metodologia

Para metodologia de análise da estrutura dos metamateriais absorvedores, o software licenciado COMSOL Multiphysics 5.2 para criar as estruturas, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise da malha nas estruturas, permitindo projetar as estruturas e definir os elementos que constitui as estruturas, o uso do software Microsoft Excel para tabelar os dados extraídos do Comsol, e tratamento final dos dados e geração de gráficos com o software OriginPro 8.5.

### 1.3 Estado da arte

Landy, apresentou uma estrutura construída com dois metamateriais ressonadores que separadamente acoplam os campos magnéticos e elétricos, tal que absorvessem as ondas incidentes irradiadas para uma única célula unitária [25].

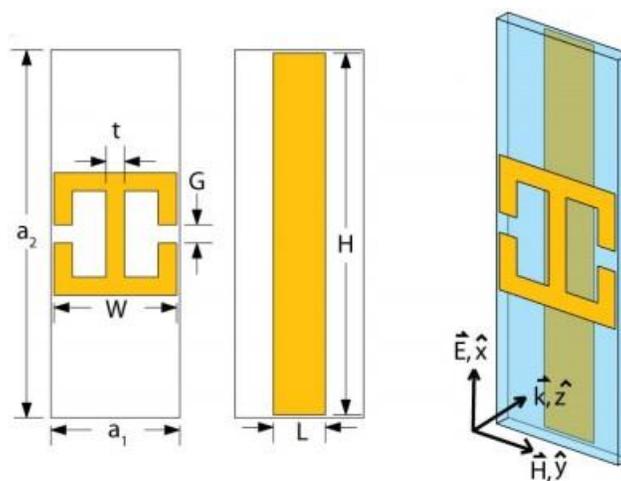


Figura 1 - Ressonador Elétrico proposto por Landy [25]

A mesma apresentou uma absorção próxima de 96% das ondas incidentes, para o intervalo de frequência de 8 GHz – 12 GHz, toda estrutura do metamaterial foi em metal, com o substrato FR4. O absorvedor se tornou uma grande referência, pois a estrutura mesmo com mudanças na geometria da estrutura ainda apresentou um bom desempenho. Os metamateriais absorvedores são ideais para investigação para interpretar fenômenos físico estudados atualmente como para futuras aplicações, um bom exemplo são estruturas apresentarem índice de refração negativa, podendo ser

considerado como mantos eletromagnético, pois apresentam um resultado favorável para a absorção das ondas eletromagnéticas, tanto para o modo TE como para o modo TM. No estudo também foi realizada a análise com diferentes camadas, onde quando adicionadas foi notado aumento da absorção acentualmente, em que a partir de duas camadas o absorvedor apresentava ~ 99,992%, [25].

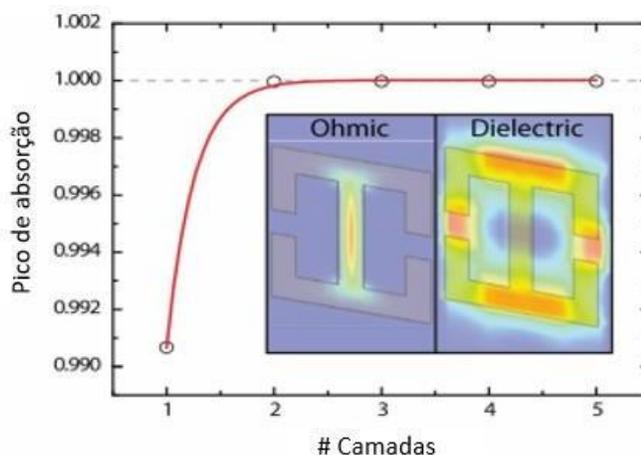


Figura 2 - Pico de absorção para diferentes camadas na estrutura apresentada em [25].

Partindo do trabalho de Landy, estruturas como em [25], construídas em conjunto com metal, vidro e alumínio apresentando com alta absorção, e transmitividade zero em todo intervalo de frequência.

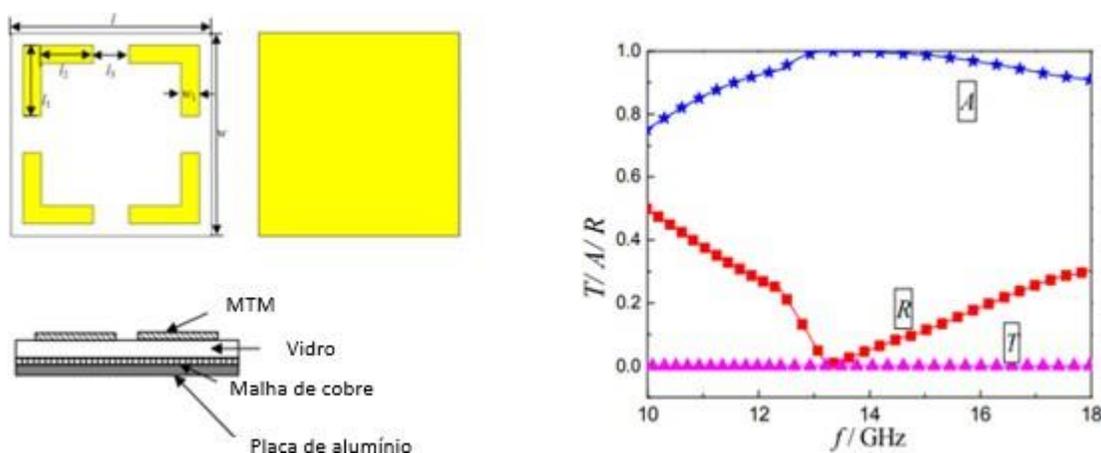
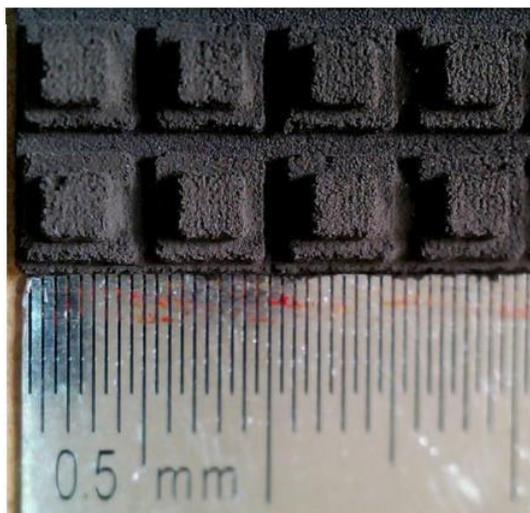


Figura 3 - Estrutura do Metamaterial absorvedor à esquerda, e a direita o desempenho da absorção, transmitividade e reflexão das ondas incidentes na estrutura [25].

Os estudos atuais, levam a necessidade de produção de metamateriais absorvedores com

maior facilidade de produção, podendo reduzir custos com estruturas que ainda com desempenho acima de 90% de absorção das ondas incidentes e com dielétricos substituindo os metamateriais absorvedores totalmente de metais, como é visto em [27], que apresentou uma estrutura utilizando tecnologia 3D na confecção da estrutura.



*Figura 4 - Estrutura confeccionada com tecnologia 3D por [27].*

No segundo capítulo será apresentado metamateriais absorvedores puramente dielétricos com base em água, que fundamentaram a pesquisa, com o intuito de apresentar uma estrutura otimizada com diferentes características geométricas.

#### **1.4 Organização do trabalho**

Esta Dissertação foi dividida em quatro capítulos, da seguinte maneira: O Capítulo 1, a introdução, com os aspectos gerais sobre os metamateriais absorvedores com base em água, junto com os objetivos gerais e específicos; o Capítulo 2, a seção que apresenta a fundamentação teórica que norteou o estudo desenvolvido. As discussões que estão sendo tecidas dizem respeito tanto ao princípio de funcionamento dos metamateriais absorvedores e as relações de absorção e transmitividade quanto às características da água como elemento utilizado como material nas estruturas, junto com a metodologia utilizada e a formulação matemática do estudo; o Capítulo 3, com a definição das estruturas e as características das geometrias simuladas; finalizando com a conclusão e as considerações sobre os resultados encontrados na pesquisa e as suas contribuições.

# Capítulo 2

## 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.1 Metamateriais

São consideradas metamateriais as estruturas artificiais que apresentam propriedades exóticas que não são encontradas comumente na natureza. As mesmas são consideradas matrizes de sub-comprimento de onda, como eficazes por meio da sua permissividade elétrica e permeabilidade magnética ( $\epsilon$  e  $\mu$ ) essas estruturas são promissoras para o estudo de novas tecnologias e para os absorvedores por trazerem propriedades eletromagnéticas, as quais motivam o estudo. Tais estruturas tem como ideia fundamental a projeção de células unitárias de comprimento de onda, com diferentes respostas elétricas e magnéticas para ondas eletromagnéticas que incide nas mesmas. Para uma célula unitária, de um metamaterial dielétrico, com dimensão menor que o comprimento de onda guiada, propagada na estrutura, considerados assim, como uma estrutura homogênea [11].

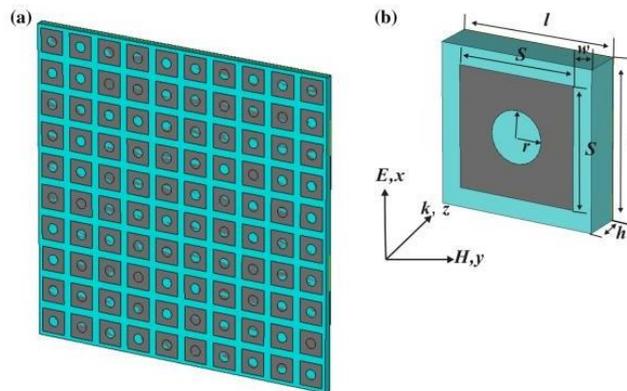
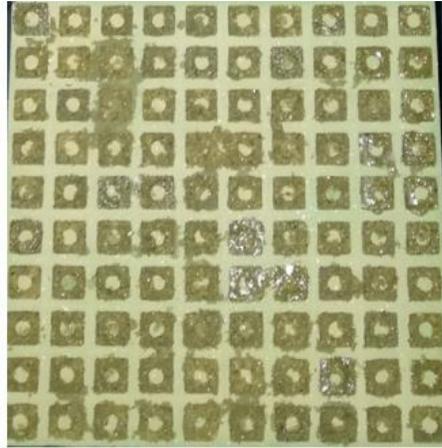


Figura 5 - (a) Modelo de metamaterial absorvedor de solo arenoso úmido (PSA) simulado em [2]. (b) Célula unitária do PSA [2].

Tais estruturas possibilitam a manipulação de suas características eletromagnéticas e da flexibilidade de construção, que variam de acordo com sua geometria [1], [11]. No início de seu estudo os metamateriais apresentavam características inadequadas em aplicações práticas por ter grande volume e ressonância magnética, além de ter largura de banda estreita. Foi somente a partir

de 2002, que começaram a surgir estudos promissores de estruturas absorvedoras na faixa do micro-ondas [11].



*Figura 6 - Metamaterial absorvedor de solo arenoso úmido (PSA) construído em [2].*

Veselago em 1968 postulou um fenômeno referente ao índice de refração negativo, algo que somente foi visto nos metamateriais, quando  $\epsilon$  e  $\mu$  apresentaram valores negativo simultaneamente  $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ , [27].

## ***2.2 Metodologia e Formulação Matemática***

### ***2.2.1 Método dos Elementos finitos***

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um recurso matemático que os programas computacionais utilizam para obter resposta de problemas eletromagnéticos de estruturas com diferentes materiais. Para isso o programa divide a estrutura em pequenos subdomínios, discretizando em elementos finitos. Tais elementos podem possuir diferentes formatos, como por exemplo: quadrado, triângulo para casos bidimensionais, prismas e quadriláteros para geometria tridimensional [27].

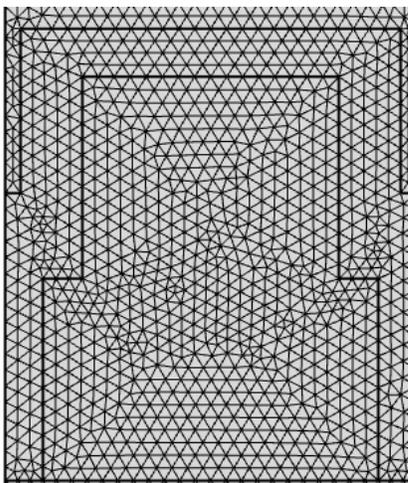


Figura 7 - Exemplo de discretização de um metamaterial absorvedor com base trapezoidal.

O MEF foi proposto pela primeira da vez em 1950, como uma ferramenta para soluções de problemas de equações diferenciais para geometrias com condições de contorno para regiões menores da geometria, por meio das equações diferenciais, possibilitando resultados mais aproximados [27].

Para problemas bidimensionais o elemento triangular é o mais utilizado por ter a capacidade de aproximar o contorno de estruturas com geometrias mais complexas [27].

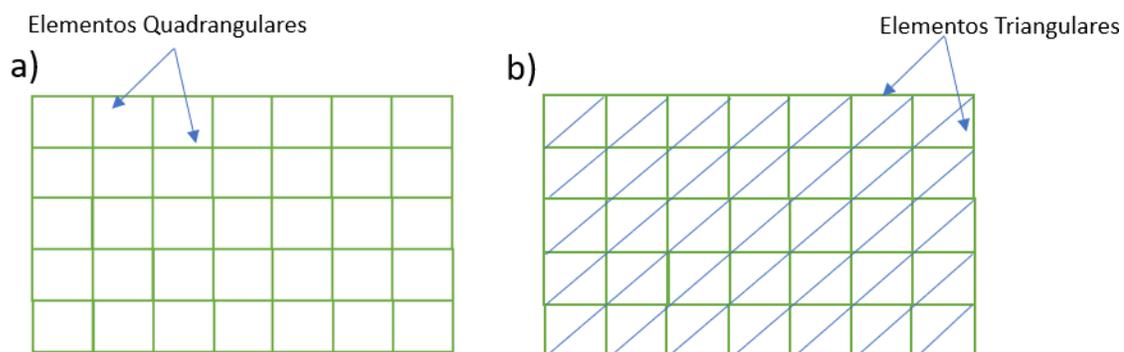


Figura 8 - Exemplo de duas malhas de elementos finitos. a) Quadrangulares e b) Triangulares.



Figura 9 - Discretização de uma região  $\phi$  com elementos triangulares.

### 2.2.2 Formulação matemática

A partir do princípio de Huygens e das equações de Maxwell em meios materiais podemos entender o comportamento dos metamateriais sob a ação de ondas eletromagnéticas planas, e como a interação do campo elétrico e magnético, com as devidas condições de fronteira e, assim, compreender como a permissividade dos materiais são responsáveis pela absorção, transmissão e reflexão das ondas incidentes nas estruturas pela teoria de absorção de ondas eletromagnéticas.

As dependências da absorção total de ondas planas normalmente incidentes por um conjunto infinito de camadas periódicas de uma estrutura, composto por elementos unitários com período de subconjunto de comprimento de onda  $\alpha$ , que induzem um momento de dipolo elétrico  $\mathbf{p}$  e dipolo magnético  $\mathbf{m}$ , a serem momentos ortogonais, alinhados as direções do campo elétrico e magnético [9].

Conforme princípio de Huygens, esses momentos podem criar ondas de plano secundário irradiadas simetricamente, tanto nas direções transmitidas como refletidas, podendo ser expressa da seguinte forma pela equação (1):

$$\begin{aligned}
 E_{z,t}(x) &= E_{z,inc}(x) + E_{z,s}(x) = \exp(-ik_0 x) + \frac{ik_0 \zeta_0}{2\alpha} (\mathbf{n}_y - c p_z) \exp(-ik_0 x) \\
 &= E_{z,inc} - \frac{1}{2} E_{z,inc} - \frac{1}{2} E_{z,inc} = 0 \quad (1) \\
 E_{z,t}(x) &= \frac{ik_0 \zeta_0}{2\alpha} (\mathbf{n}_y - c p_z) \exp(-ik_0 x) = -\frac{1}{2} E_{z,inc} + \frac{1}{2} E_{z,inc} = 0 \\
 c p_z &= -m_y = \frac{\alpha}{ik_0 \zeta_0}
 \end{aligned}$$

Em que  $c$ ,  $\zeta_0$  e  $k_0$ , são a velocidade da luz, a impedância das ondas e o número de ondas,

respectivamente, em que  $E_{z,t}(x)$  é o campo elétrico com incidência normal em  $x$ , polarizada em  $z$ , [9]. A interação de fase entre dipolos elétricos e magnéticos sobrepostos de igual amplitude gerados por estruturas exclusivamente dielétricas apresentam um paradigma intrigante na manipulação de energia eletromagnética [9].

É possível calcular a interferência para a análise das características magnéticas e elétricas do metamaterial, como também alcançar os valores de absorção de um metamaterial dielétrico, para a eletrodinâmica clássica esse arranjo é conhecido como par de Huygens, o que equivale a um material de impedância combinada, onde o componente de perdas pode ser escolhido, garantindo transmissão igual a zero [9].

A solução analítica das equações de Maxwell na forma diferencial pode ser vista nas equações (2), (3), (4) e (5), definidas como a Lei de Gauss da Eletrostática, Lei de Gauss Magnética, Lei de Ampère-Maxwell e Lei de Faraday-Lenz, respectivamente. Onde  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  são respectivamente a intensidade do campo elétrico e magnético,  $\vec{J}$  a densidade de corrente elétrica e  $\rho$  densidade de carga elétrica,  $\epsilon_0$  a permissividade elétrica no vácuo e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (5)$$

Os campos elétricos e magnéticos oscilam harmonicamente em função da frequência angular  $\omega$  descrita pela equação (6) em que  $f$  é a frequência da onda incidente.

$$\omega = 2\pi f \quad (6)$$

Pelas equações de Maxwell, sabemos que se variarmos o campo elétrico  $\vec{E}$ , geramos um campo magnético  $\vec{B}$ , e o campo magnético conseqüentemente sofre uma variação, que também gera um campo elétrico, assim, gerando uma onda eletromagnética causada pelas variações de campo elétrico e magnético. Sabendo disso, se usarmos a propriedade matemática dos rotacionais e dos divergentes (7) nas equações de Maxwell teremos as equações (8) e (9).

$$\nabla_x(\nabla_x F) = \nabla(\nabla F) - \nabla^2 F \quad (7)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \begin{matrix} \mu & \varepsilon \\ 0 & 0 \end{matrix} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \begin{matrix} \mu & \varepsilon \\ 0 & 0 \end{matrix} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (9)$$

Essa derivada da segunda é conhecida como Laplaciano (10), que é a derivada das componentes x, y e z da função.

$$\nabla^2 F = \left( \frac{\partial^2 F_x}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 F_y}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

Esse resultado remete a equação de onda em três dimensões (11), em que Maxwell demonstrou que  $\mu_0 \varepsilon_0 = 1/c^2$  em que  $c$  é a velocidade da luz.

$$\nabla^2 F = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \quad (11)$$

Para propagação de onda na superfície dos metamateriais é considerado comprimentos de onda na faixa de  $\lambda_0$ , em que a superfície tem uma rugosidade  $R_0$ , muito menor que  $\lambda_0$ ,  $R_0 \ll \lambda_0$ , ignorando os efeitos de espalhamento [27].

Ondas eletromagnéticas em uma superfície podem ser exploradas descrevendo o comprimento de propagação como  $L_p = \frac{1}{k_2}$ , em que  $k_2$ , é a parte imaginária do vetor de onda complexa, e levamos em consideração que o vetor de onda está paralelo a superfície, podendo concluir que  $L_p$  é a distância característica. Essa característica se apoia aos plasmons de superfície, porém, não é de interesse para o nosso estudo. Para isso temos que considerar que as ondas de superfície se espalhem novamente antes de serem absorvidas, podendo ser efetivamente transmitidas ou refletidas [27]. A onda eletromagnética que incidente acopla a uma onda de superfície, quando a energia  $E = \hbar\omega$ , em que  $\hbar$  é a constante de Plank, e que o momento angular  $p = \hbar k_1$ , em que  $k_1$  é a parte real do vetor de onda no meio, se conservem. Devemos também ter

$k_1 = k_0$ , e  $\omega_0 = 2\pi \frac{c}{\lambda_0}$ . A equação (12), mostra como o vetor de onda incidente coincide com a dispersão da superfície  $k_1$  considerando  $k_2$  a superfície de propagação da onda eletromagnética de superfície [27].

$$W_p = \frac{1}{2} \frac{k_2}{|k_1 - k_0|^2 + k_2^2} \quad (12)$$

Se  $k_1 = k_0$ ,  $W_p$  se reduz à  $L_p$ , agora se  $k_2$  for muito grande as ondas eletromagnéticas de superfície podem ser vistas como forma de perda, mas a onda pode re-irradiar, como no caso de uma estrutura curva [27]. Sendo assim, ao analisar uma estrutura plana de modo que as ondas eletromagnéticas morram antes de espalhar novamente, podemos obter a equação (13) que será fundamental para ter os valores das relações entre absorção, transmissão e reflexão das ondas incidentes.

A capacidade de absorção eletromagnética pode ser calculada diretamente a partir do coeficiente de reflexão do metamaterial pela equação (12) [2], [3] e [27]:

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) \quad (13)$$

Para chegar à expressão utilizada para os metamateriais absorvedores perfeitos é necessário observar dois casos específicos para placas de um meio magneto-dielétrico, pelas equações de Fresnel.

Para um primeiro caso, em uma placa de espessura  $d$  de meio magneto-dielétrico, que pode ser descrito pela permeabilidade magnética  $\tilde{\mu}(\omega) = \mu_0 \tilde{\mu}(\omega)$  e a permissividade elétrica  $\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r(\omega)$ , levando em consideração que a placa está apoiada em um plano metálico opaco altamente condutor e aterrado, já o segundo caso uma placa com a mesma espessura  $d$  em um meio magnético-dielétrico, porém embutido no vácuo. Nesse caso  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  são a permissividade elétrica no vácuo e a permeabilidade magnética do espaço livre, com  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ ,  $\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \text{Fm}^{-1}$ .

Para o primeiro caso foi considerado inicialmente o coeficiente de reflexão  $r$  e a refletividade  $R$  de uma interface para os modos transversais elétricos (TE) e magnéticos (TM), dada

pelas equações (14) e (15).

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2 = \left| \frac{\cos \theta - \mu_r^{-1} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \mu_r^{-1} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2 \quad (14)$$

$$R_{TM} = |r_{TM}|^2 = \left| \frac{s_r \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{s_r \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2 \quad (15)$$

Em que  $\theta$  é o ângulo de incidência, ressaltando que o índice de refração é  $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$  do meio magneto-dielétrico. Se analisarmos as ondas eletromagnéticas para incidência normal, teremos que  $\theta = 0^\circ$ , assim reduz as equações (14) e (15) para a equação (16).

$$R = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 \quad (16)$$

Em que  $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$  é a impedância do material magneto-dielétrico e  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  é a impedância no espaço livre. Para o caso do plano metálico aterrado, nos fornece transmitividade zero, assim, temos que a capacidade de absorção eletromagnética dos materiais pode ser descrita pela equação (17).

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 \quad (17)$$

### 2.3 Permissividade dielétrica dos materiais

A permissividade dos materiais é considerada uma propriedade da matéria que reflete o acoplamento entre um campo eletromagnético considerado fraco e uma determinada substância do material, em que seu valor vai depender da frequência do campo e das características da constituição molecular da substância, da temperatura e pressão sob o mesmo [13]. Para os metamateriais constituídos de multicamadas para análise de ondas incidentes temos a equação (18).

$$\epsilon_{\perp} = \frac{s_m s_d}{\rho s_d + (1 - \rho) s_m} \quad (18)$$

### 2.3.1 Permissividade dielétrica da água

Para compreensão do trabalho, se faz necessário o estudo da permissividade da água pura, pelo modelo Debye, pois a capacidade de absorção eletromagnética pode ser calculada diretamente a partir do coeficiente de reflexão, enquanto a permissividade da água pode ser analisada pelo modelo de Debye para radiofrequência dada por:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty}}{1 - i\omega\tau} \quad (19)$$

Com  $\varepsilon_{\infty}$  sendo permissividade de alta frequência,  $\varepsilon_s$  a permissividade estática,  $\omega$  a frequência angular, e  $\tau$  tempo de relaxação rotacional [8].

É visto em [12] que a permissividade da água sofre alterações de acordo com a variação da temperatura para frequências na faixa do THz. Isso pode ser descrito pelo modelo Debye, pelo modelo clássico [12], ou pela função mostrada a seguir:

$$\varepsilon(\nu, t) = \varepsilon'(\nu, t) + i\varepsilon''(\nu, t) = \varepsilon_{\infty}(t) + \frac{\Delta(t)}{1 - i2\pi\nu\tau(t)} \quad (20)$$

Com  $\tau$  sendo o tempo de relaxação rotacional,  $\nu$  a frequência trabalhada e  $\varepsilon'$  e  $\varepsilon''$ , são as permissividades estimadas pelos autores em [12].

Normalmente, materiais com constante dielétrica alta com base na ressonância de Mie [12] e [28] são utilizados para alcançar a absorção quase perfeita com uma única ou dupla operação de banda ajustável. A absorção eletromagnética da estrutura é proporcional ao coeficiente de reflexão, que é dependente da permissividade da água que pode ser analisada pelo modelo de Debye para radiofrequência dada pela equação (20), em que  $\varepsilon_{\infty}$  sendo permissividade de alta frequência,  $\varepsilon_s$  a permissividade estática,  $t$  a temperatura, e  $\tau$  tempo de relaxação rotacional [8], em que  $\varepsilon_{\infty} = 3.1$ ,  $\varepsilon_s = 78,4$  e  $\tau = 8,17 \times 10^{-12}$ .

Entretanto para altas frequências a permissividade da água pelo modelo Debye é diretamente dependente da temperatura [3 – 8],

$$\varepsilon_0(T) = a_1 - b_1T + c_1T^2 - c_1T^3, \quad (21)$$

$$\varepsilon_{\infty}(T) = \varepsilon_0T - a_2e^{-b_2T}, \quad (22)$$

$$r(T) = -c_2 e^{\frac{-d_2}{T+T_0}}, \quad (23)$$

com os parâmetros  $a_1 = 87.9$ ,  $b_1 = 0.404 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $c_1 = 9.59 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $c_1 = 1.33 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$ ,  $a_2 = 80.7$ ,  $b_2 = 4.42 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $c_2 = 1.37 \times 10^{-13} \text{ s}$ ,  $d_2 = 651 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 133 \text{ } ^\circ\text{C}$ , e  $T$  a temperatura da água em  $^\circ\text{C}$ .

A ressonância de Mie, parte do ponto de vista da teoria do espalhamento, para que todos os objetos de espalhamento sejam representados por densidades de polaridade elétrica e magnética efetiva. Tal espalhamento considera a luz como partícula que é solução exata de Mie do problema de difração na eletrodinâmica clássica. Observando uma esfera dielétrica isolada de raio  $r$ , e índice de refração efetivo  $n$ , é possível decompor em uma série multipolo com termo  $2^m$ , com campo elétrico espalhado proporcional a equação (24) e (25) respectivamente.

$$E_m = \frac{n\psi_m(nx)\psi_m^F(x) - \psi_m(x)\psi_m^F(nx)}{n\psi_m(nx)\psi_m^F(x) - \psi_m(x)\psi_m^F(nx)} \quad (24)$$

$$B_m = \frac{n\psi_m(nx)\psi_m^F(x) - n\psi_m(x)\psi_m^F(nx)}{n\psi_m(nx)\psi_m^F(x) - n\psi_m(x)\psi_m^F(nx)}, \quad (25)$$

em que  $x = k_0 r_0$ ,  $k_0$  é o número de onda no espaço livre,  $\psi_m(x)$  e  $\xi_m(x)$  são funções de Riccati-Bessel, em que os valores ímpares de  $m$ , indicam derivação aos argumentos.

A teoria de Mie, possibilita calcular os coeficientes de dipolo elétrico e magnético, e a partir da teoria do meio efetivo, pode ser visto que esses coeficientes são termos multipolares, contribuindo para a permissividade e permeabilidade efetiva dos materiais. Contudo, para uma partícula não magnética, teremos uma fraca resposta magnética [28].

As ressonâncias dos dipolos elétricos e magnéticos, vão agir como “átomos” artificiais, assim, apresentando características de um novo material óptico, desse modo, as respostas de espalhamento, agem como um material com valores arbitrários de permissividade e permeabilidade efetiva. Portanto, a partir da teoria de Mie temos que a permissividade efetiva e a permeabilidade efetiva, podem ser descritas pelas equações (26) e (27).

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 \left( 1 + \frac{3v_f}{\frac{F(\theta) + 2b_e}{F(\theta) - b_e} - v_f} \right) \quad (26)$$

$$\mu_{eff} = \mu_1 \left( 1 + \frac{3v_f}{\frac{F(\theta)+2b_m}{F(\theta)-b_m} - v_f} \right) \quad (27)$$

onde:

$$F(\theta) = \frac{2(\sin \theta - \theta \cos \theta)}{(\theta^2 - 1)\sin \theta + \theta \cos \theta} \quad (28)$$

com  $b_e = \frac{s_1}{s_2}$  e  $b_m = \frac{\mu_1}{\mu_2}$ , a variação de volume  $v_f = \frac{4\pi(r_0)^3}{3p}$ , e  $\theta = k r_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ , com  $r_0$  e  $p$ , sendo o raio da partícula e constante de rede respectivamente. Como  $F(\theta)$  é uma função ressonante, torna-se negativa com a ressonância em uma faixa de  $\theta$ , apresentando permissividade e permeabilidade negativa para valores negativos de  $F(\theta)$ .

## 2.4 Metamateriais absorvedores com base em água

Nesta seção será apresentando algumas estruturas que nortearam a pesquisa e o embasamento para o comportamento das estruturas, para análise dos resultados extraídos nas simulações da pesquisa.

### 2.4.1 Características da água para um metamaterial absorvedor

A água é um elemento que apresenta propriedades dielétricas que favorecem o estudo e sua aplicação em metamateriais. Apresenta uma grande perda dielétrica, pois a sua permissividade muda apresentando uma alta capacidade de absorção de ondas eletromagnéticas incidentes. Outra vantagem é a sua disponibilidade na natureza, o que favorece ainda em sua relação de custo, facilitando a construção de metamateriais dielétricos sintonizáveis.

A água diferente de outros dielétricos que possibilitam trabalhar na faixa do microondas tem a parte imaginária da permissividade grande para o microondas, o que faz com que apresente uma alta perda dielétrica, adequando-se a um metamaterial absorvedor, assim, a mesma torna-se uma escolha natural que fornece a funcionalidade necessária, enquanto preserva o volume. É termicamente ajustável, opticamente transparente, abundante, biocompatível e comutável.

A permissividade real da água é alta e altamente depende da frequência, possibilitando que componentes operem em largura ultra-ampla [1], com isso, surge certa limitação que se refere à incompatibilidade de impedância entre a interface ar/água, impedindo a propagação da onda eletromagnética na água. O gráfico da figura (10) mostra a relação entre a permissividade real e imaginária da água para diferentes intervalos de banda (5,58 a 24,21 GHz) como apresentado pelos autores [1].

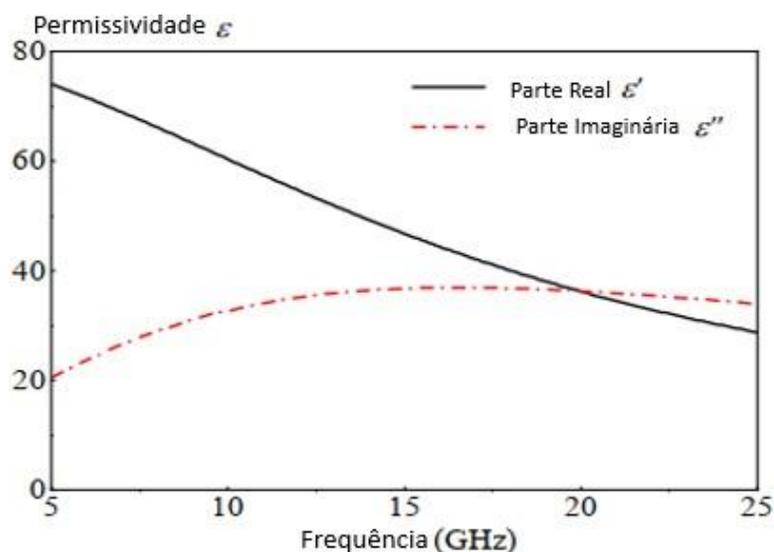


Figura 10- Gráfico da Permissividade real e imaginária da água em função da frequência [1].

A parte real da permissividade dielétrica da água apresenta uma tendência a diminuir com o aumento da frequência e a parte imaginária apresenta um alto nível, que indica uma perda dielétrica elevada, que pode ser expressa pela tangente de perdas e a razão entre a parte imaginária/parte real da permissividade, portanto essa perda aumenta com a diminuição da parte real, assim, uma boa absorção para a faixa do microondas.

Os absorvedores de microondas têm sido amplamente utilizados em aplicações civis e militares há décadas, na redução da seção transversal do radar (RCS) na formação de feixe de antena ou na redução de interferência eletromagnética (EMI) [1–3].

É interessante também levar em consideração o comportamento da permissividade da água quando alterada a salinidade, Gadani e Deepak et al [22], em trabalho analisando a permissividade complexa da água para uma determinada salinidade com concentrações de NaCl entre 5000 a 35000 ppm, para frequências entre 200 MHz a 1,4 GHz, observou que a constante dielétrica da água diminuía com o aumento da frequência. É possível analisar essa variação da permissividade da

água salinizada a partir das equações de Storgryn, representada em normalidade e temperatura da água salina, como também as equações de Klein e Swift [23]. Essas alterações também interferem nas propriedades dielétricas em frequências no microondas [23].

É discutido que a constante dielétrica da água em determinada faixa de frequência no microondas, diminui com o aumento da salinidade da mesma, para frequências acima de 1 GHz a 10 GHz [23]. Também foi verificado que conforme a frequência diminui a perda dielétrica diminui e que a perda dielétrica aumenta com o aumento da salinidade da água, e essa perda é explicada por conta da dependência da frequência da condutividade iônica, que descreve o movimento dos íons em uma solução [23].

#### 2.4.2 Absorvedor puramente dielétrico criado com tecnologia 3D

Fortalecida pelo princípio de Huygens foi analisada por [9] uma estrutura que fornece potenciais soluções para o design de metamateriais eficientes de camada única, em banda larga perfeita para um absorvedor. O princípio subentendido é que, se uma partícula exibir uma combinação crítica de sobreposição espectral de ressonâncias dipolares magnéticas e elétricas puras de igual força e impedância combinada é possível escolher os componentes de perdas, para garantir transmitividade igual a zero, assim, com controle arbitrário sobre o campo de dispersão, que é garantido pela incidência de ondas planas [9].

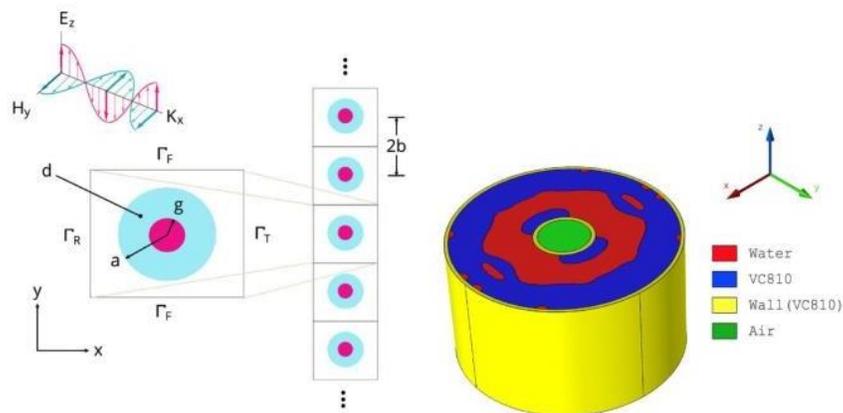


Figura 11 - Absorvedor puramente dielétrico analisado por [9] utilizando o princípio de Huygens.

Os momentos de dipolo são mutuamente ortogonais com seus componentes correspondentes alinhados ao longo das direções do campo elétrico e magnético da onda incidente.

Assim, pelo princípio de Huygens, o conjunto de momentos cria ondas de plano secundário irradiando simetricamente amplitude nas direções transmitida e refletida. Na eletrodinâmica clássica este arranjo de dipolos elétricos e magnéticos equilibrados é conhecido como um par de Huygens [9].

### 2.4.3 Ressonador puramente dielétrico

A partir da investigação dos modos ressonantes e do acoplamento entre a água e os dielétricos Hu, Dawei et al [6] são encontradas ressonâncias na estrutura do metamaterial que alcançou absorção de microondas acima de 90% na faixa de 7,5 a 15 GHz, com design de gotículas de água, e um índice de absorção de quase 90% com design de tubo d'água na faixa de 5 a 15 GHz [6]. Hu, Dawei et al [6] acreditam na possibilidade de aplicação em tecnologia furtiva de microondas e compatibilidade eletromagnética.

Os autores ainda construíram outras duas estruturas com base em água, em que uma delas era colocada em uma plataforma com cilindros paralelos e a outra em uma plataforma com cilindros em formato espiral. A estrutura com cilíndricos paralelos pode ser vista na figura abaixo, junto ao comportamento da absorção, com diferentes medidas do diâmetro dos cilindros.

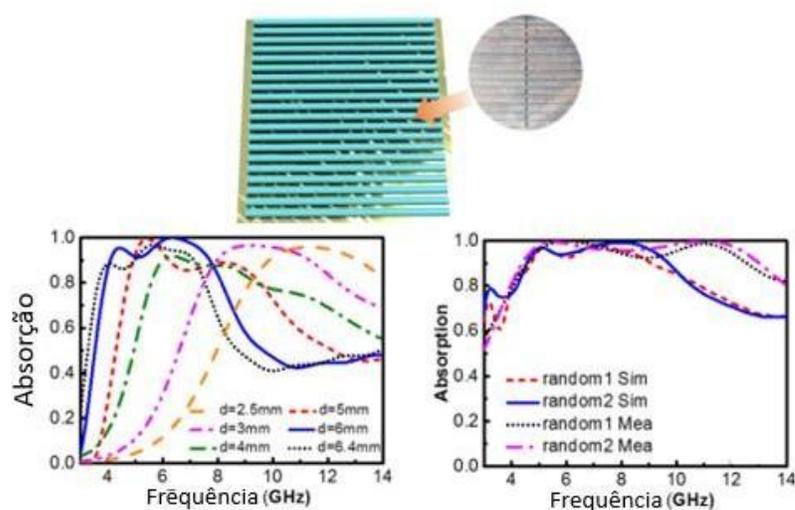


Figura 12 - Modelo cilíndrico de ressonador dielétrico, com resultados das absorções para o modo TE [6].

A figura (12) apresenta o resultado das absorções para o modo TE das ondas incidentes na estrutura. Observa-se também que atingiu resultados acima de 90% de absorvidade na faixa de 4,5 a 8 GHz e que ao variar o diâmetro aleatoriamente da estrutura foi possível alcançar mais de 90% de absorvidade numa faixa entre 5 a 15 GHz.

Um aspecto importante a ser levado em consideração em relação à absorção de ondas para diferentes bandas largas de frequência em estruturas com base em água é a permissividade da água [1], [8].

#### 2.4.4 Ressonador Cilíndrico em ultra banda larga de absorção

Jian Ren e Jia Yuan Yin em [1] propuseram um absorvedor com base em água confinada, o qual utiliza um ressonador dielétrico (DR) e um modo Spoof SPP (Superfície de Plasmons Polariton), com o intuito de alcançar uma capacidade de absorção acima de 90%, operando no intervalo de banda entre 5,58 a 24.21 GHz. O absorvedor alcançou bons resultados com certa dependência com a temperatura da água [1] como pode ser visto na figura (3):

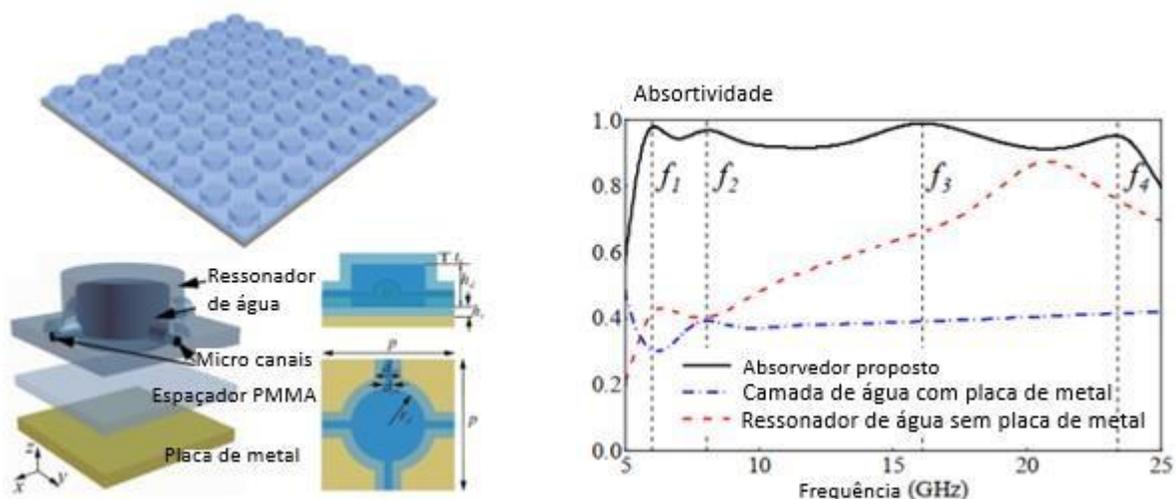


Figura 13 - Esquema do ressonador dielétrico proposto por [1], e o resultado para os quatro picos de frequência para as absorções para diferentes configurações [1].

A estrutura ilustrada pela figura (13) é formada por uma camada de resina em formato cilíndrico, por um ressonador de água com microcanais que controla a passagem da água, por uma camada de Metacrilato de polimetil (PMMA) e por uma placa metálica (cobre) que evita a transmitividade, além de ajudar na melhora do desempenho de absorção [1].

Foi encontrado quatro picos de absorção no absorvedor com diferentes montagens, em comparação com a estrutura proposta simulada com a estrutura medida, visto que os quatro picos de absorção foram para as faixas 6,07 GHz, 8,10 GHz, 16,19 GHz e 23,45GHz, para as respectivas absorções, 99,15%, 96,95%, 98,89% e 94,77%.

O metamaterial proposto foi construído com o uso da tecnologia 3D, com configuração de

15x15 células unitárias com tamanho de 181x181mm<sup>2</sup>. Ao comparar os resultados experimentais do simulado verificou-se uma baixa diferença entre os níveis de absorção, como pode ser visto na figura (14):

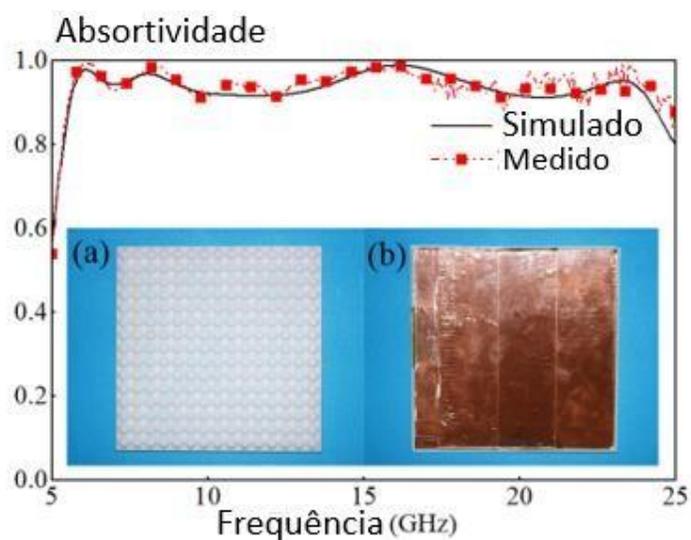


Figura 14 - Material construído e absorção da medida e simulada [1] (modificado).

Além disso, foram realizados testes para diferentes ângulos (entre 0° e 45°) de incidência na estrutura, para entender o desempenho do metamaterial, tanto para o modo TE como para o TM, comparando os valores experimentais e os simulados. Outra vez, verificou-se uma diferença pequena entre os resultados nas bandas de frequência operadas.

#### 2.4.5 Absorvedor puramente dielétrico

A água e o solo são considerados como dois bons candidatos para banda larga absorção devido à alta perda dielétrica na região do microondas [2]. Huang et al [2] investigou numericamente e experimentalmente, também na banda larga do microondas, um absorvedor sintonizável baseado na matriz de estrutura periódica de (PSA) de solo arenoso úmido (WSS) [2].

A estrutura do absorvedor de PSA é composta do "átomo" do WSS incorporado em uma espuma de suporte (polimetacrilimida: PMI) revestida com uma placa metálica, conforme mostrado na figura (15). A espuma PMI com a permissividade relativa é aproximadamente igual a 1.

Os resultados simulados e medidos mostram que o simples absorvedor de PSA com 30%

de teor de água atinge mais de 90% de absorção na banda larga centrada em 10,92 GHz, variando de 6,24 GHz a 17,12 GHz. O design da célula unitária da estrutura investigada de solo arenoso úmido (PSA) simulado pode ser visto na figura (15).

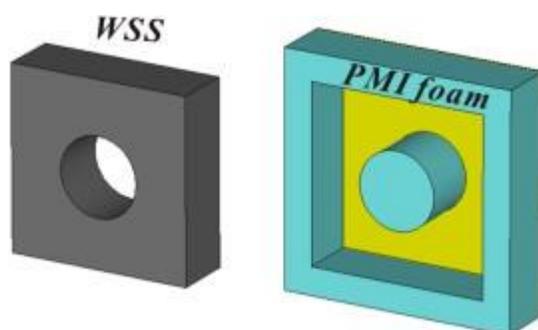


Figura 15 - Célula unitária do PSA [2].

Os resultados simulados revelaram que o desempenho da absorção pode ser ajustado mudando larguras, espessuras e concentração de água no WSS. Outra questão que se pôde verificar a partir desses resultados é que o alto nível de absorção pode permanecer inalterado quando o ângulo de incidência para os modos magnético e elétrico variarem de  $0^\circ$  até  $60^\circ$ .

Uma estratégia que pode ser utilizada para melhorar o desempenho de absorção é aumentar a espessura das camadas dielétricas do metamaterial [2]. Nesse caso, um longo processo de fabricação e custos mais elevados é inevitável, o que torna limitada a aplicação prática para os metamateriais absorvedores. Assim, é desejável uma estrutura simples para absorção de alta eficiência [2].

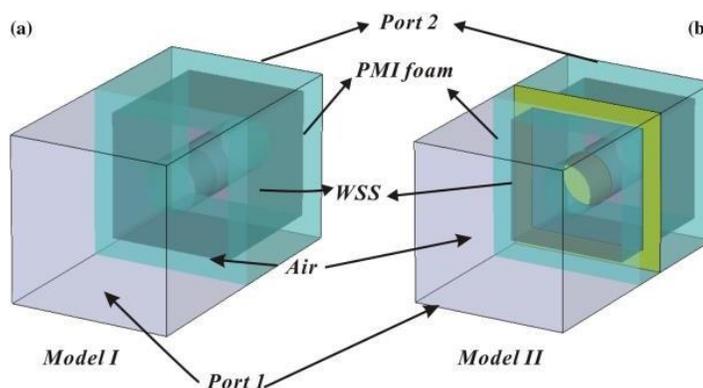


Figura 16 - a) Modelo I proposto por [2] sem a base de cobre. b) Modelo II proposto por [2] com uma base de cobre.

Os autores [2] apresentaram também um segundo modelo da mesma estrutura utilizando uma base metálica de cobre de 5 mm, visto na figura (16). O absorvedor de PSA atingiu uma absorção superior a 90% na banda larga do microondas, entre 5,76 GHz e 17,12 GHz, quando o teor volumétrico de água do WSS foi de 30%, apresentando dois picos de absorção perfeitos de 9,12 GHz (99,72%) e 16,64 GHz (99,81%), visto a comparação dos dois modelos na figura (17).

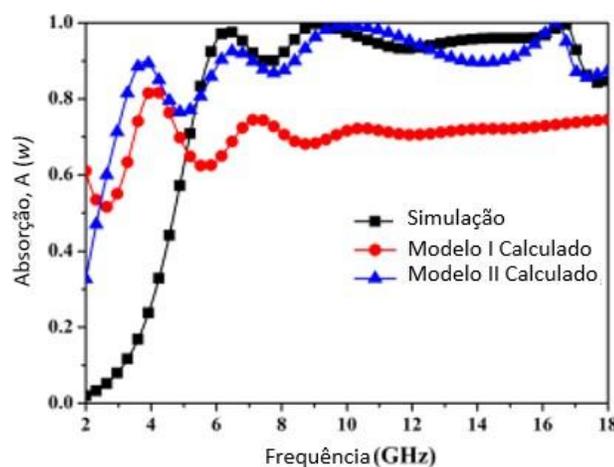


Figura 17 - Resultados dos dois modelos proposto por [2].

É possível ajustar as dimensões do absorvedor para mudar a banda de absorção da estrutura em PSA alterando a largura e a espessura do substrato enquanto se mantém todos os outros parâmetros fixos. Assim, pode-se obter um valor ideal para a geometria da estrutura [2]. Os resultados indicaram que a largura ( $s$ ) e a espessura ( $H$ ) determinam diretamente o desempenho de absorção do absorvedor projetado, conforme pode ser visto na figura (17):

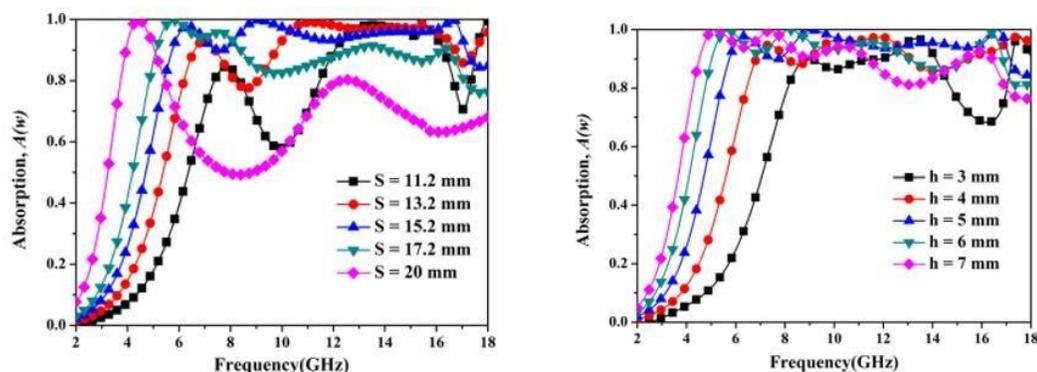


Figura 18 - Absorção para diferentes configurações na geometria [2].

#### ***2.4.6 Metamaterial Totalmente dielétrico com base em água sem terra***

J. Xie et al [21] construíram um absorvedor metamaterial perfeito (PMA) totalmente dielétrico com base em água (e Resina), o qual apresentou absorção perfeita para as frequências de microondas de 7,74GHz e 23,56GHz, com estabilidade térmica para os intervalos de 0° a 100° e grandes ângulos de incidência oblíqua [21].

O desempenho da estrutura do PMA tem baixa dependência da variação da temperatura, diferente quando analisado separadamente a água, considerado de fácil construção, o recipiente em plástico com o uso de tecnologia 3D, para a banda larga trabalhada. A estrutura feita de uma concha de resina superior oca e uma concha de resina inferior que formam o recipiente para a água do ressonador [21].

Observou-se que a impedância correspondente ao fundo da estrutura (Ar), com pequeno coeficiente de reflexão, pois a estrutura foi projetada com impedância correspondente com o ar e, assim, com a perda dielétrica da água na banda larga estreita de absorção de interesse [21].

O que interfere na absorção do metamaterial é a permissividade, pois suporta várias ressonâncias de espalhamento. Também foi possível observar perdas dielétricas razoavelmente altas e, portanto, se mostrou um metamaterial promissor para absorção perfeita [21]. A resposta dielétrica da água mostrou-se dependente da temperatura, o que permite que esse recurso seja usado como substrato para projetar absorvedores de metamateriais sintonizáveis termicamente.

A mesma estrutura apresentou três picos de absorção 5,29 GHz, 9,97 GHz e 17,68 GHz, sendo as absorvências nessas três frequências de 78,7%, 99,8% e 97,7%, respectivamente.

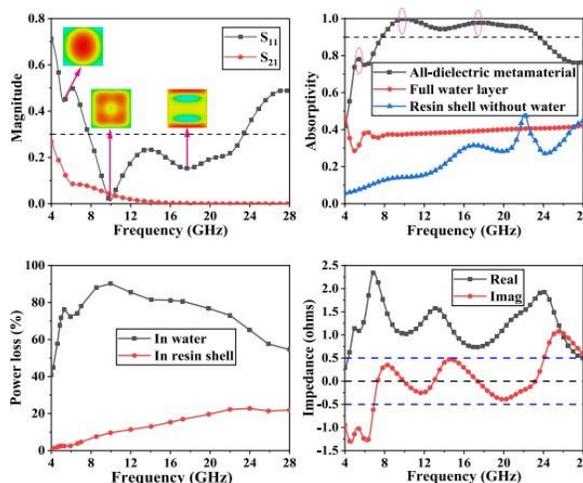


Figura 19 - Resultados alcançados por [21] para a absorção para o intervalo de frequência de 4 GHz – 28 GHz.

Para a primeira ressonância, em 5,25 GHz a densidade de corrente concentra-se principalmente no centro. Em 9,97 GHz a densidade de corrente mostra uma distribuição em forma de anel nulo no centro e em 17,68 GHz ocorre uma densidade de corrente mais forte nas duas extremidades do ressonador de água [21].

Foi notado fraca transmitância para a faixa de 8GHz e quase desapareceram frequências superiores a 12 GHz. A casca de resina contribuiu com uma absorção máxima de 22,8% a 24 GHz.

Os autores sugeriram que adicionar íons na água e dissolver materiais como o sal, permitiria a condutividade em água, oferecendo meios mais frutíferos na criação de soluções de metadispositivos [21].

#### 2.4.7 Banda larga de absorção com grande capacidade de incidência angular

Xie, jian wen et al [8] demonstrou experimentalmente um metamaterial com base em água, com sub comprimento de onda, para a ultra banda larga de microondas. Os resultados encontrados nesse trabalho mostraram uma absorção superior a 90% para quase toda banda larga que foi analisada (12 - 29,6 GHz), apresentando ainda uma ótima estabilidade térmica entre 0° a 100° C.

Uma vantagem com relação a uma estrutura de gotícula de água é que a capacidade de absorção eletromagnética pode ser calculada diretamente a partir do coeficiente de reflexão. A permissividade da água em radiofrequências foi analisada pelos autores pela equação (4), [8], com  $\epsilon_{\infty} = 3.1$ , (Permissividade de alta frequência),  $\epsilon_S = 78,4$  (Permissividade estática) e  $r = 8,17 \times 10^{-12}$  (Tempo de relaxação rotacional).

No trabalho houve 3 picos de alta absorção, nas faixas 13,0 GHz, 19,6 GHz e 27,3 GHz sendo de 97,4%, 98,3% e 97,8%, respectivamente. Como a água tem alta capacidade de absorção para faixa do microondas, torna-se interessante saber se essa absorção ocorre predominantemente por conta da perda intrínseca da água [8].

Mesmo com o aumento do ângulo de incidência, o espectro de absorção do modo TM se mantém em bons níveis, pois o absorvedor é menos sensível a intensidade do campo elétrico, que diminui com o aumento do ângulo de incidência. Já no modo TE, o campo magnético diminui de forma significativa com o aumento do ângulo de incidência [8].

A despeito desse enfraquecimento, a ressonância magnética continua forte o suficiente para acoplar a ressonância elétrica fraca, o que permite a obtenção de correspondência de impedâncias, estando com ângulo de incidência abaixo de  $60^\circ$ . O comportamento dos modos TE e TM podem ser observados a partir da figura (20):

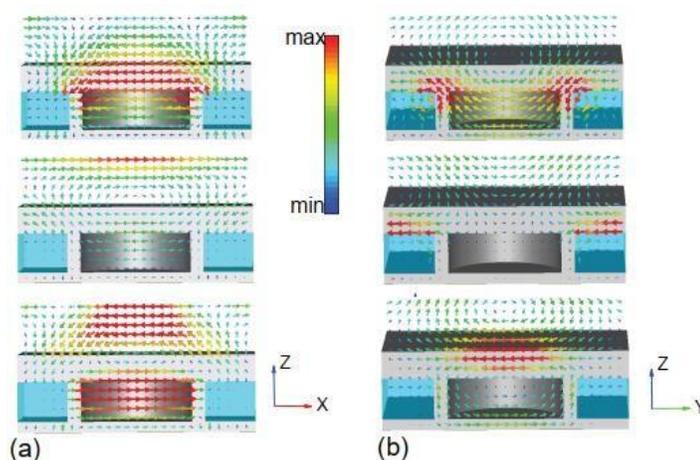


Figura 20 - Distribuições de vetores de (a) campos elétricos e (b) magnéticos em frequências de ressonância: 13,0 GHz (topo), 19,6 GHz (meio) e 27,3 GHz (baixo) [8].

Na figura em (a) temos os modos TE e em (b) os modos TM para os picos de absorção encontrados na análise. Observa-se que, para 13,0 GHz, o campo elétrico se concentra na casca de resina acima da cavidade e o campo magnético concentra-se no local em que a água entra em contato com a casca da cavidade da resina. Para 19,6 GHz, o campo magnético que se concentra nos dois lados do invólucro superior da resina, e o campo elétrico é significativamente mais fraco, dado que demonstra a existência de uma forte ressonância magnética. Já para a faixa de 27,3 GHz, o campo elétrico concentra-se acima da cavidade da resina, enquanto o magnético está centralizado, concentrando-se principalmente na camada superior da resina, tendo assim, fortes ressonâncias elétricas e magnéticas, mostrando que há diferentes modos ressonantes para os 3 picos.

As dimensões para fabricação da estrutura foram limitadas em 6x6 com o uso de tecnologia 3D e cada estrutura foi dividida em uma matriz 2x2 das células unitárias, além de ser aderida ainda a uma placa de cobre ao fundo. Um orifício com diâmetro de 3 mm foi aberto na camada externa de cada subestrutura de resina para água, como pode ser visto na figura (21):

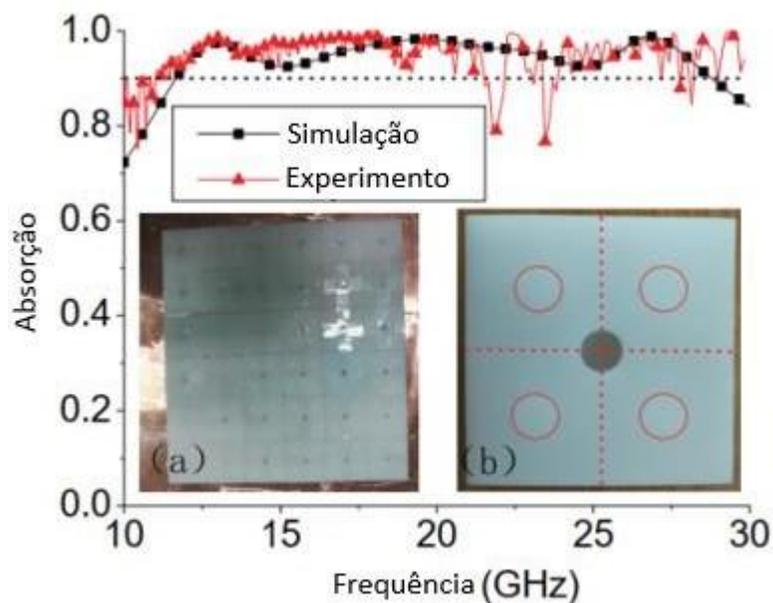


Figura 21 - Espectros de absorvidade simulados e medidos do absorvedor de metamaterial de água. A inserção (a) mostra o absorvedor de metamaterial conforme preparado consistindo em subestruturas de  $6 \times 6$  (isto é,  $12 \times 12$  células unitárias) e (b) é uma subestrutura.

Ao comparar os resultados da análise experimental da simulada foi possível encontrar uma compatibilidade nos resultados. A estrutura estudada mostrou:

- Comprimento de onda inferior (ultra banda larga de frequência de rádio);
- Absorção superior a 90%, entre a banda de 12 a 29,6 GHz;
- As energias das ondas incidentes são consumidas principalmente na camada de água estruturada;
- Mesmo que haja dependência da temperatura para resposta dielétrica da água, consegue-se boa estabilidade térmica;
- A tolerância angular demonstrou alta absorção, sendo mantida para um ângulo de incidência abaixo de  $45^\circ$  e acima de  $60^\circ$  para a incidência oblíqua de TE (TM).

# Capítulo 3

## 3.1 Resultados e Discussões

Neste capítulo será discutido os resultados da absorção do modelo validado numericamente inicialmente, e posteriormente outras quatro variações geométricas da estrutura, com diferentes resinas, observando a absorção para o modo transversal elétrico (TE) e magnético (TM), analisando diferentes temperaturas para o modo TE, e diferentes ângulos de incidência.

### 3.1.2 Estrutura inicialmente proposta

Para validação do estudo foi simulado inicialmente um absorvedor puramente dielétrico que se configura da forma resina/água/resina com altura máxima de 14,2 mm e largura máxima de 12 mm como mostra na figura (22) [29].

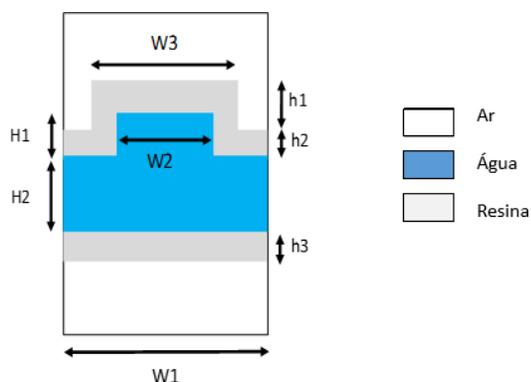


Figura 22 - Estrutura do metamaterial absorvedor dielétrico/água/dielétrico.

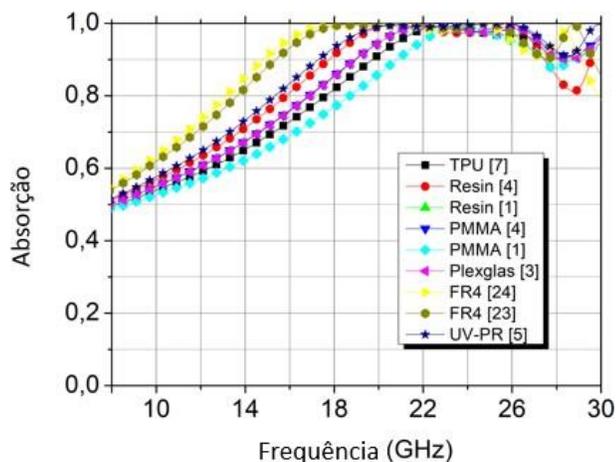
A sua configuração 2D baseada na estrutura de [21], inicialmente a estrutura com superfície trapezoidal, com as medidas geométricas modificadas, diferentes de [21], da estrutura original, com as seguintes dimensões:  $h1 = 4.8$  mm,  $H1 = 5.9$  mm,  $h2 = 2.5$  mm,  $H2 = 5.9$ ,  $h3 = 1$  mm,  $W1 = 12$  mm,  $W2 = 7.5$ ,  $W3 = 11$  mm. Posteriormente realizado mudanças na superfície da estrutura, para critérios de possibilidade de fabricação variando entre formatos semicircular e triangular. As simulações foram realizadas, através do software comercial COMSOL Multiphysics.5.2.1.220, considerando a estrutura do metamaterial absorvedor com base em água, com largura de banda de

absorção entre 5,99 GHz a 29,99 GHz. Os dielétricos utilizados para as simulações foram os Resina [1], PMMA [1], Plexiglas [3], PMMA, [4], UV-PR [5], TPU [7], Resina [21], FR4 [23] e sua variação FR4 [24]. Na tabela (1) mostra as características dielétricas dos materiais:

<i>Resinas</i>	$\epsilon'$	$\epsilon''$
<i>Tpu [7]</i>	2,8	0,0028
<i>Resina [1]</i>	2,55	0,0025
<i>Resina [21]</i>	3,4	0,2
<i>Pmma [1]</i>	3	0,03
<i>Pmma [4]</i>	3	0,003
<i>Plexiglas [3]</i>	3	0,031
<i>Uv-pr [5]</i>	3,5	0,0035
<i>Fr4 [23]</i>	4,6	0,092
<i>Fr4 [24]</i>	4,3	0,1075

*Tabela 1 - Tabela da permissividade real e imaginária dos dielétricos simulados [29].*

As simulações iniciais mostraram que para as diferentes resinas sob temperatura de 27° C, que pode ser visto na figura (23), exibe a absorção na estrutura quando usado diferentes dielétricos mantendo as mesmas dimensões geométricas, sob temperatura de 27°C:



*Figura 23 - Absorção no metamaterial para as diferentes resinas no intervalo de frequência 5,99 GHz à 29,99 GHz.*

Usando os diferentes dielétricos mantendo as mesmas dimensões geométricas, sob temperatura de 27°C, foi observado que os dielétricos UV-PR [5], FR4 [23] e FR4 [24], apresentaram absorção acima dos 90% no intervalo de banda de 14,86 GHz a 29,53 GHz para FR4 [23] e 15,44 GHz a 22,99 GHz [24], e para UV-PR [5] de 17,31 GHz a 29,97 GHz, com três picos

de absorção cada, 20,77 GHz (99,37%), 25,38 (99,98%) e 29,99 GHz (99,72%) para o UV-PR [5], FR4 [23] 18,59 GHz (99,5%), 21,26 GHz (99,9%) e 28,77 GHz (99,75%), e FR4 [24] 18,735 GHz (99,33%), 20,53 GHz (99,98%) e 24,41 GHz (99,91%). É importante ressaltar que todas as resinas são de fácil modelagem, assim facilitando a possibilidade de fabricação. A partir desses substratos, analisamos a absorção desses materiais para diferentes ângulos de incidência 15°, 30°, 45° e 60°, que pode ser visto na figura (24):

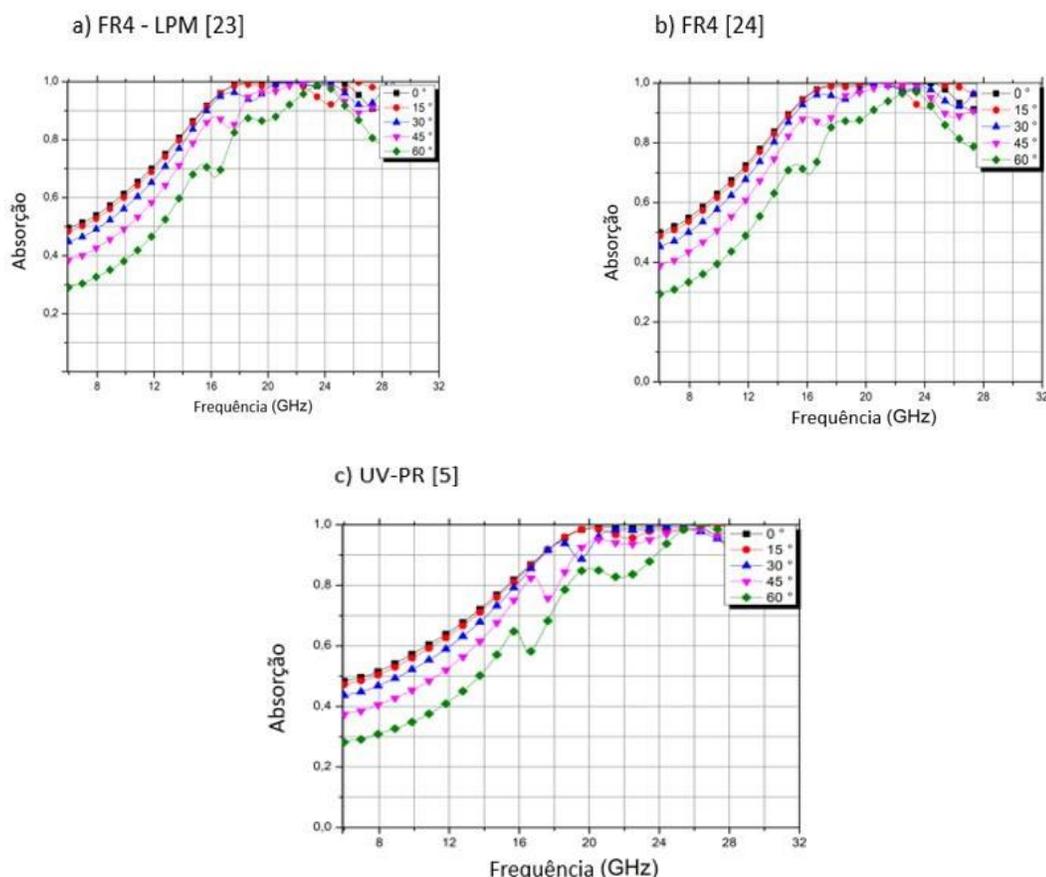


Figura 24 - Absorção em função da frequência, para os ângulos de incidência de 15°, 30°, 45° e 60° do modo TE, para a) FR4-LPM [23], b) FR4 [24] e UV-PR [5].

Ao comparar o espectro de absorção para os diferentes ângulos é visto que há uma pequena variação na absorção até o ângulo de 30°, aos ângulos de 45° e 60° há uma redução da absorção da estrutura, como previsto em [1 – 10], [15 – 21], por conta do espalhamento das ondas incidentes, mantendo uma absorção acima de 90% entre 14,95 GHz à 29,74 GHz entre as resinas FR4 [23], FR4 [24] e UV-PR [5], para o ângulo de 30°. Já para o dielétrico FR4 [24], a absorção apresentou-se acima de 90% entre 14,95 GHz a 29,02 GHz, assim o FR4 [24] apresentou um melhor

desempenho na absorção com relação aos demais dielétricos. A partir disso, simulações para o FR4 [24], para diferentes temperaturas, como visto na figura (25):

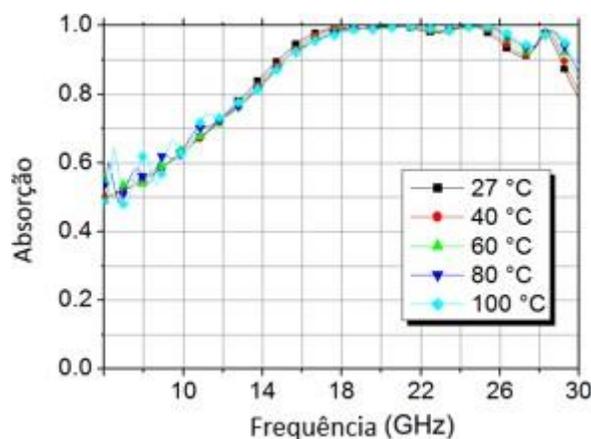


Figura 25 - Absorção em função da frequência para o FR4 [24], nas temperaturas de 27 °, 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C.

Para o FR4 [24], variando a temperatura do metamaterial, nas temperaturas de 27 °C, 40 °C, 60 °C e 80 °C, manteve uma absorção acima de 90% entre a faixa de frequência de 15,44 GHz a 29,02 GHz, já sob temperatura de 80 °C e 100 °C, o intervalo de frequência foi um pouco maior, entre 15,44 GHz a 29,50 GHz.

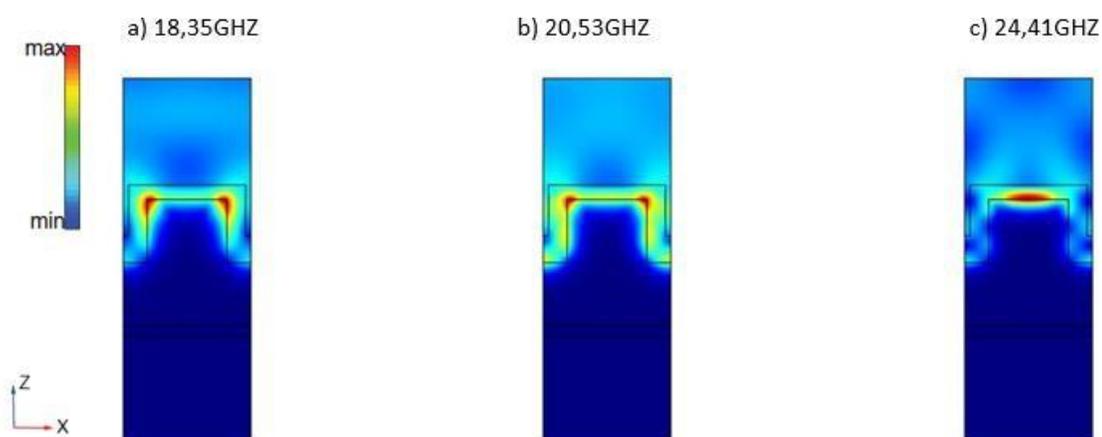


Figura 26 - Distribuição do campo magnético no metamaterial: a) 20,75 GHz, b) 25,55 GHz e c) 29,87 GHz.

A partir da distribuição do campo magnético no metamaterial apresentado na figura (26),



$h_2 = 2.5$  mm,  $h_1 = 4.8$  mm,  $H_1 = 5.9$  mm e  $H_2 = 5.9$  mm. Da mesma forma para a validação foi utilizado diferentes resinas na configuração da estrutura, visando o comportamento da estrutura sob a incidência de ondas no intervalo de banda entre 4,99 GHz a 29,99 GHz, para as resinas apresentadas na tabela (2), com as permissividade real e imaginária das mesmas, note que diferente da tabela (1) foi acrescentado outras três resinas ao estudo, a Photopolymer visto em [9], VC810 [9] e FR4-LPM [6].

<b>Resinas</b>	$\epsilon'$	$\epsilon''$
<i>Tpu</i> [7]	2,8	0,0028
<i>Resina</i> [1]	2,55	0,0025
<i>Resina</i> [21]	3,4	0,2
<i>Pmma</i> [1]	3	0,03
<i>Pmma</i> [4]	3	0,003
<i>Plexiglas</i> [3]	3	0,031
<i>Photopolymer</i> [9]	2,661	0,0071
<i>Uv-pr</i> [5]	3,5	0,0035
<i>Vc810</i> [9]	2,67	0,0075
<i>Fr4</i> [23]	4,6	0,092
<i>Fr4</i> [24]	4,3	0,1075
<i>Fr4-lpm</i> [6]	4,3	0,107

Tabela 2 - Tabela da permissividade real e imaginária dos dielétricos simulados na estrutura da figura (26) para o intervalo de frequência 4,99 GHz à 29,99 GHz

Sob temperatura de 27 °C, utilizando as resinas da tabela (2), foi observado que a estrutura apresentou absorção acima de 90 % em todas as resinas, em que as resinas FR4 [23], FR4 [24] e UV-PR [6] apresentaram melhor desempenho na estrutura, como pode ser visto na figura (28).

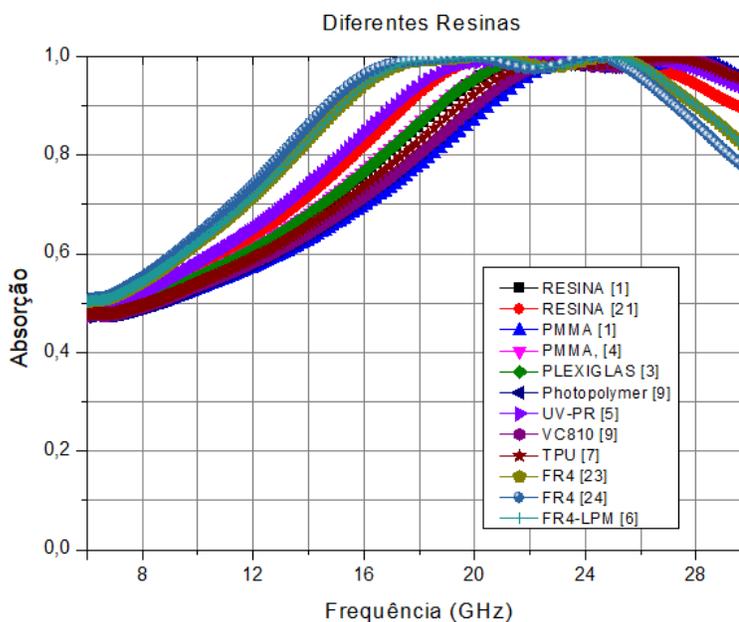


Figura 28 - Absorção para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE.

É visto que para a nova configuração na geometria a resina FR4 [24] apresentou uma maior banda larga de absorção acima de 90%, com 12,59 GHz, seguido das resinas FR4 [23] e UV-PR [5], em que para a resina FR4 [24] o maior pico de absorção da estrutura foi em 27,008 GHz. A figura (29) mostra a concentração do campo magnético na superfície da estrutura para o modo TE, para simulação no intervalo de banda de 4,99 GHz a 29,99 GHz.

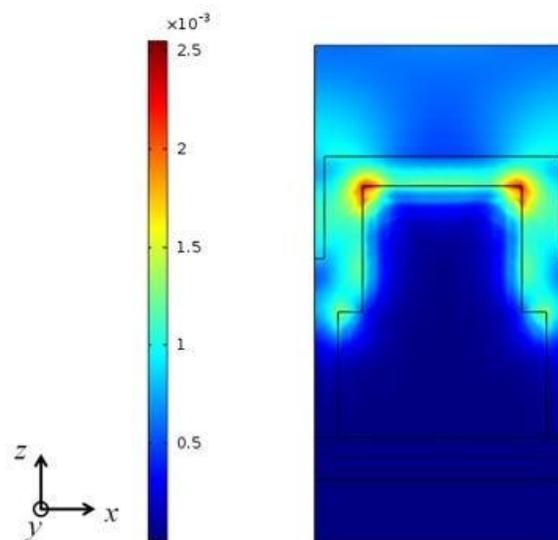


Figura 29 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 27,008 GHz.

Esse comportamento é esperado pela característica da perda dielétrica da água, pois as

perdas são mais fortes dentro da camada de água, uma vez que as ressonâncias devem sua existência a camada superior da água, assim para o pico de ressonância o campo concentra-se na parte superior nos vértices da água junto à resina.

A seguir será apresentado os resultados para absorção na estrutura trapezoidal para a água sob temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C, para todas as resinas da tabela (2).

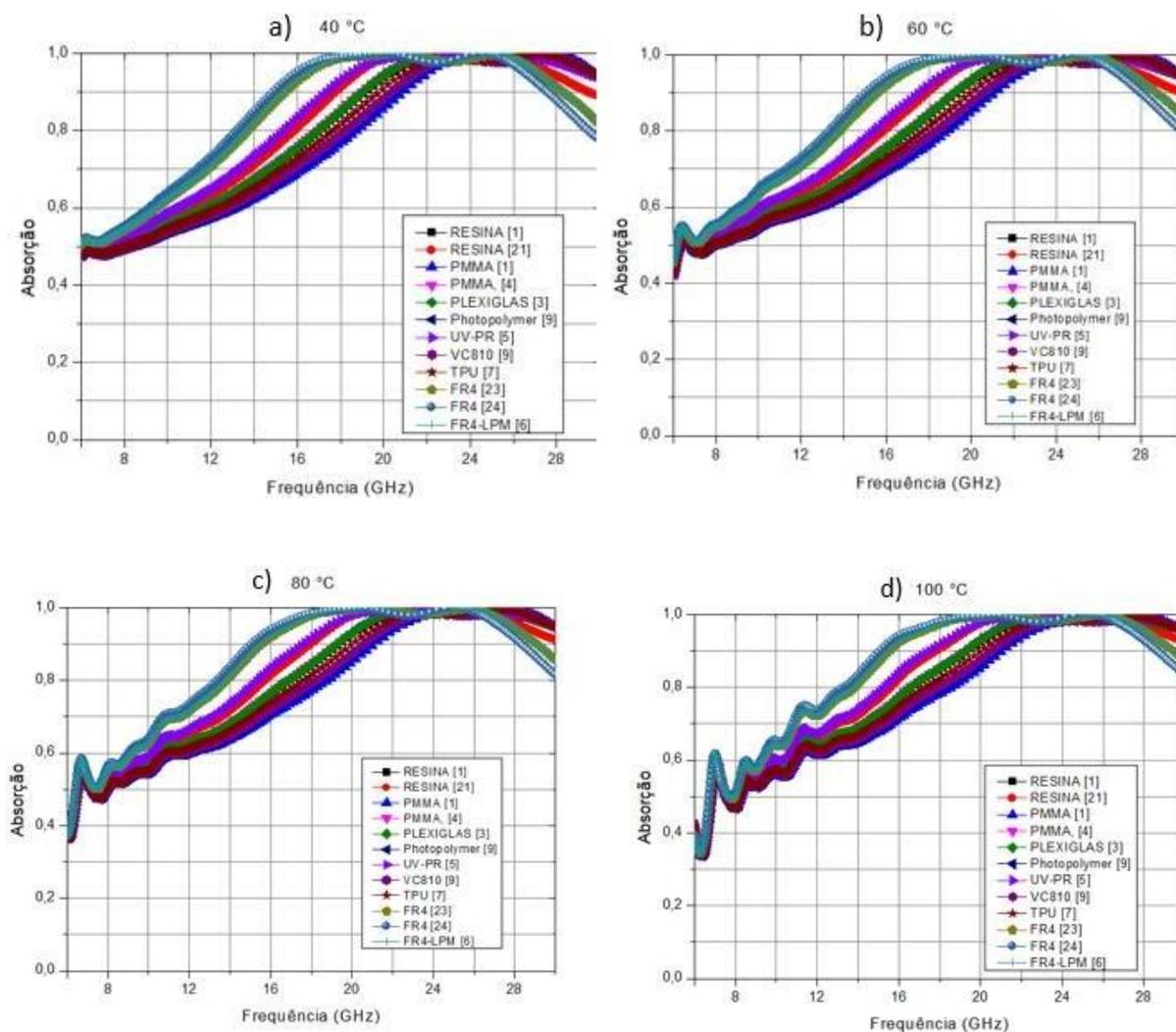


Figura 30 - Absorção para o metamaterial com FR4/água/FR4, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C, para o modo TE.

A figura (30) mostra o comportamento da estrutura para diferentes temperaturas, e como a permissividade da água apresenta dependência da temperatura, pois com o aumento da temperatura podemos ver a partir do modelo Debye, a dependência da permissividade da água pela temperatura,

o que muda o coeficiente de absorção. Na figura (30 – a) pode ser visto que a absorção na estrutura quase que não apresenta uma grande variação em comparação a temperatura de 27 °C, medida inicialmente. Já na figura (30 – b) sob temperatura de 60 °C a banda larga de absorção já apresenta um aumento chegando a 13,09 GHz. Sob temperatura de 80 °C como visto na figura (29 – c) a banda de larga de absorção foi de 13,05 GHz, e para temperatura de 100 °C em figura (29 – d), a banda de absorção foi de 13.8 GHz. Em geral, para a estrutura trapezoidal, a variação de temperatura não mostrou-se significativa para a estrutura, mesmo que a mudança de temperatura da água altere o coeficiente de reflexão.

Na figura (31) será apresentado os resultados para os ângulos de incidência na superfície de 15°, 30°, 45° e 60°, tanto para o modo TE como para o modo TM, visto na figura (31.1).

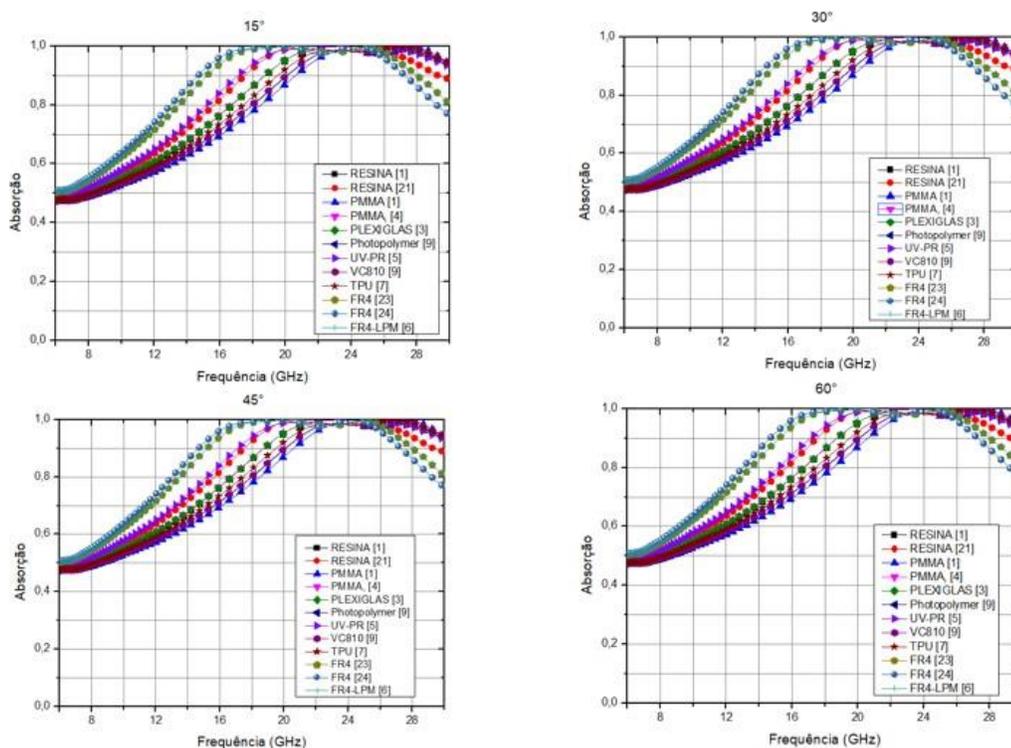


Figura 31 - Absorção para o metamaterial com FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência de 15°, 30°, 45° e 60°, para o modo TE.

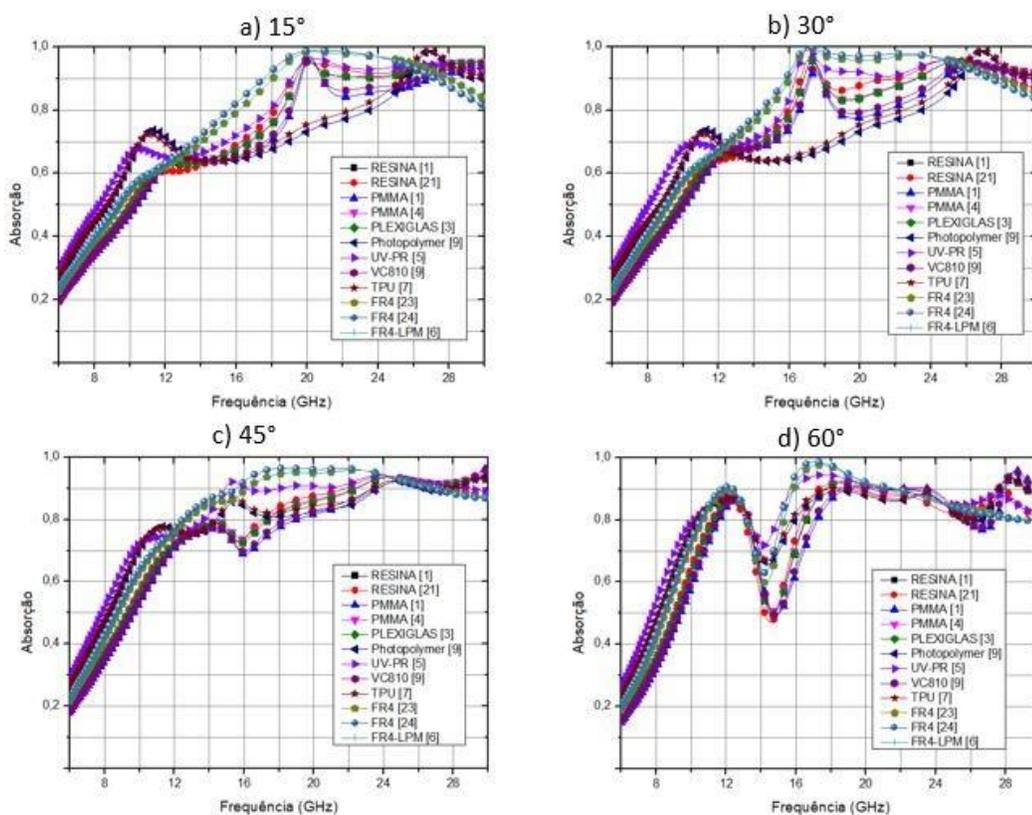


Figura 32 - Absorção para o metamaterial com Resina/água/Resina, para os ângulos de incidência de  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ , para o modo TM.

Neste caso os resultados mostraram que mesmo com uma grande variação na absorção para os ângulos de incidência, com uma banda de absorção de 10,76 GHz entre o intervalo de banda de 16,24 GHz – 27 GHz com absorção acima de 90%, assim apresentando baixa tolerância angular, em que há variação significativa de absorção na estrutura.

### 3.2.2 Estrutura de triangular

Partindo do que foi discutido anteriormente foi modificada a estrutura base [21], ainda levando em consideração puramente dielétrica, configurado resina/água/resina. Ainda com o modelo 2D com comprimento máximo 13,1 mm e altura máxima de 11,4 mm, como pode ser visto na figura (32).

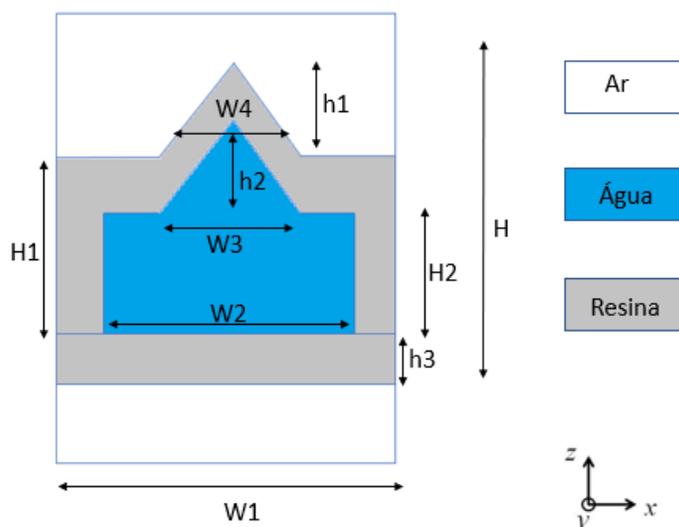


Figura 33 - Metamaterial absorvedor proposto de topo triangular (Estrutura 2), configurado em resina/água/resina.

O absorvedor puramente dielétrico de largura  $W1$  e comprimento  $H$ , foi configurado com as seguintes dimensões:  $W1 = 13.1$  mm,  $W2 = 10.1$  mm,  $W3 = 5.9$  mm,  $W4 = 5.9$  mm,  $H = 11,4$  mm,  $h3 = 1$  mm,  $h2 = 2.3$  mm,  $h1 = 4.2$  mm,  $H1 = 4.1$  mm,  $H2 = 3.9$  mm. A figura 32, mostra a absorção na estrutura para as resinas da tabela (2), para a mesma banda simulada inicialmente para os modelos proposto.

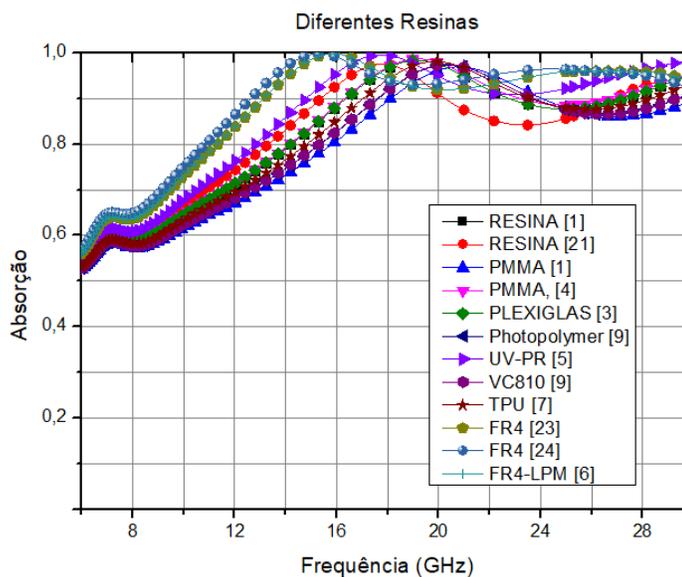


Figura 34 - Absorção na estrutura (2) para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE.

Para a estrutura da figura (32), o gráfico da figura (33) apresentou absorção para ultra banda larga de 17,29 GHz, de 12,77 GHz a 29,99 GHz, na configuração FR4/água/FR4. Para o maior

pico de absorção em 15,29 GHz é possível observar na figura (34) a concentração do campo magnético para o modo TE, para incidência normal.

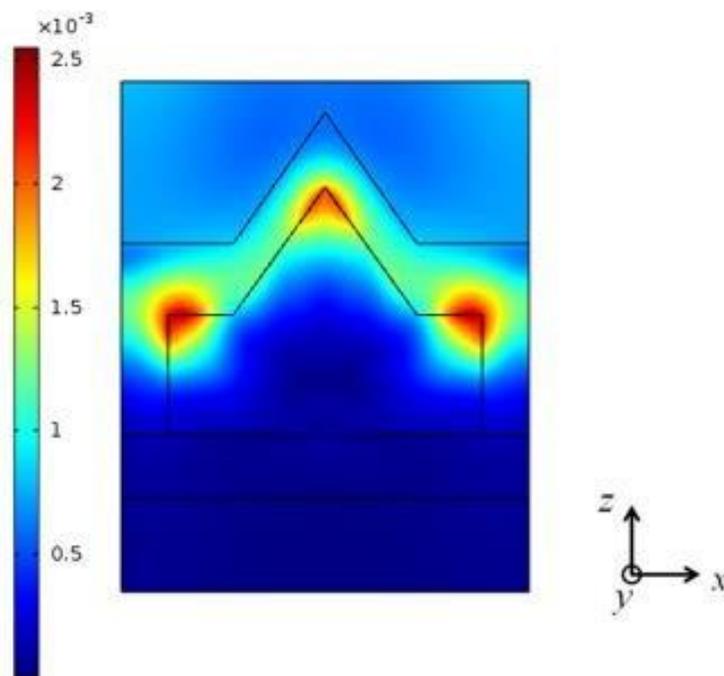


Figura 35 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 15,29 GHz.

Como visto nos dois casos anteriores podemos ver que densidades de perdas de potência na estrutura (2) concentra-se na parte interior da água nos vértices superior entre a água e a resina, para as médias iniciais. Posteriormente será apresentado o resultado, variando as dimensões da estrutura. Na figura (35) podemos ver como a estrutura se comporta sobre a mudança de temperaturas.

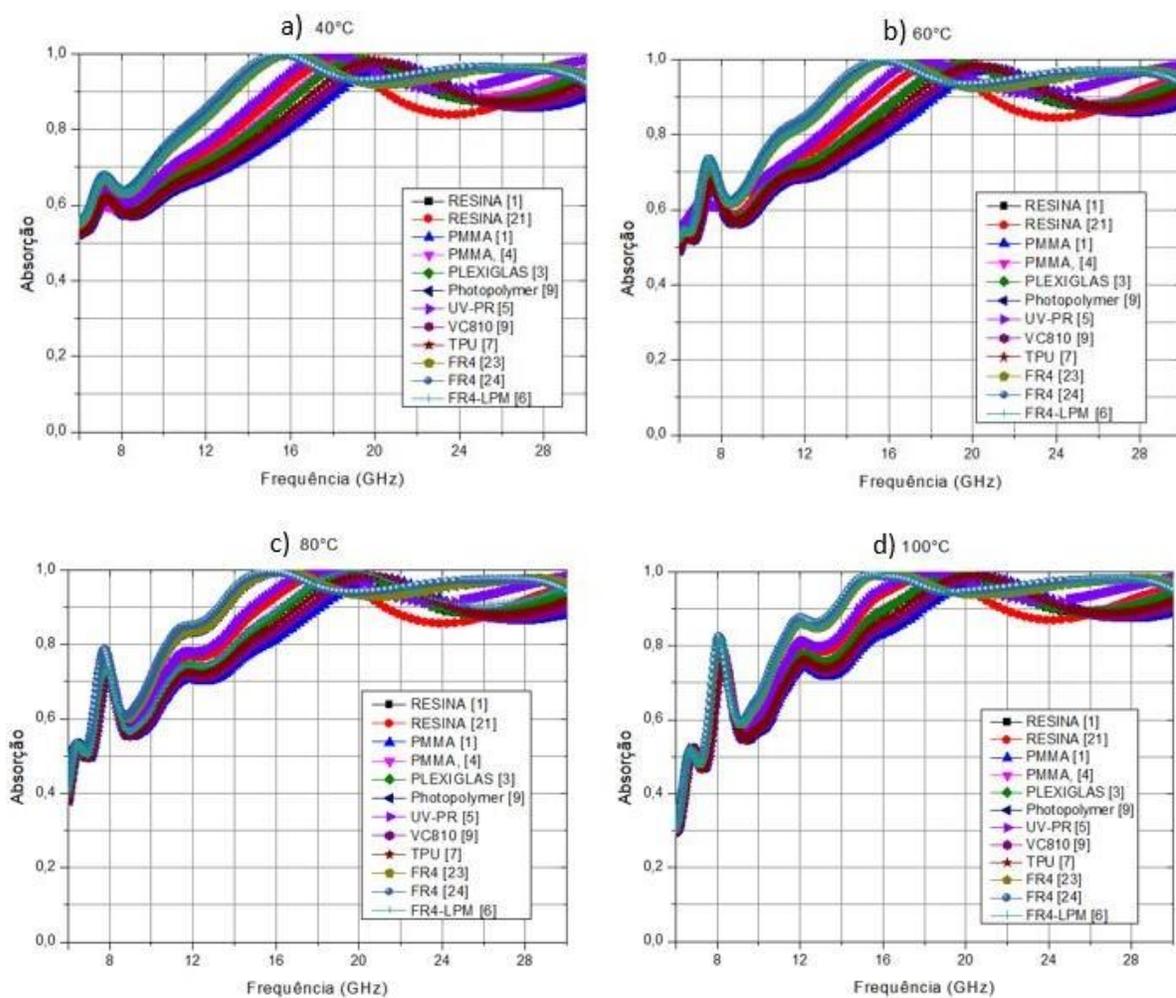


Figura 36 - Absorção para a estrutura (2) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C, para o modo TE.

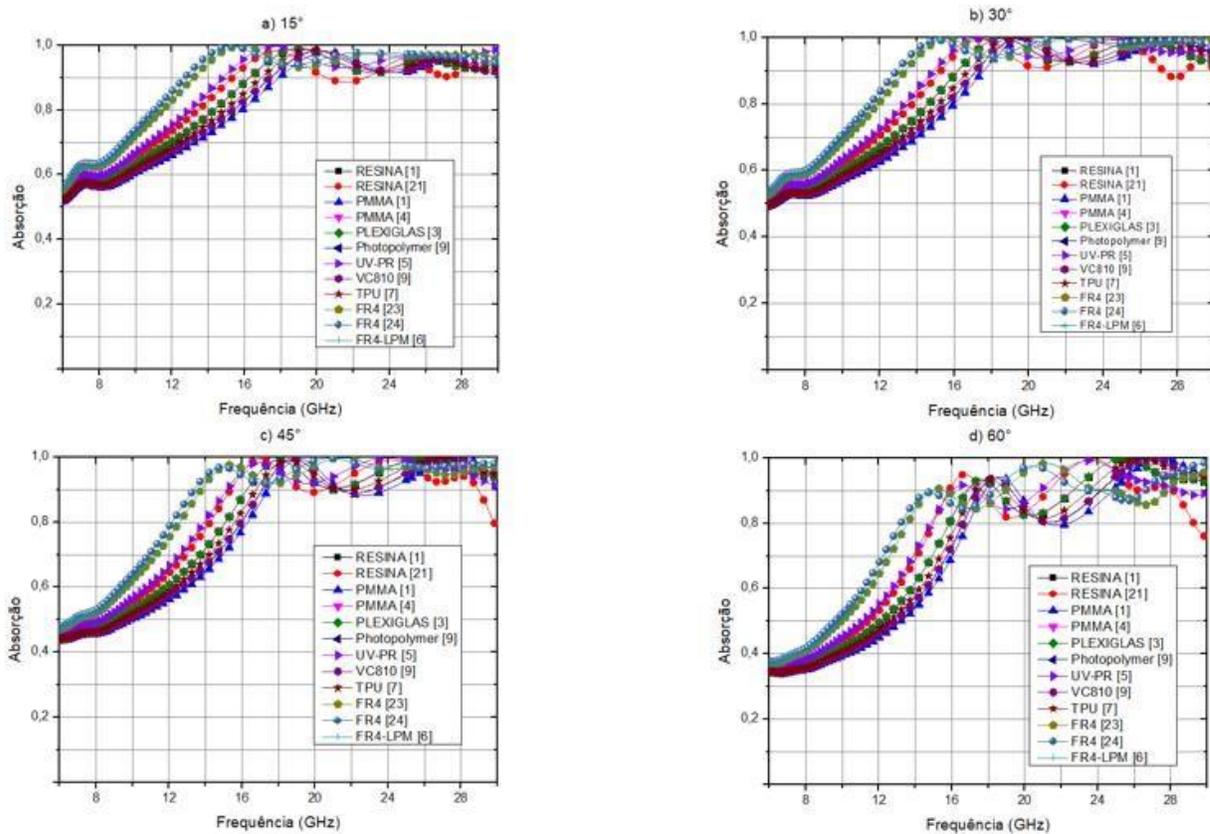


Figura 37 - Absorção para a estrutura (2) metamaterial com a configuração Resina/água/Resina, para os ângulos de incidência de 15°, 30°, 45° e 60°, para o modo TE.

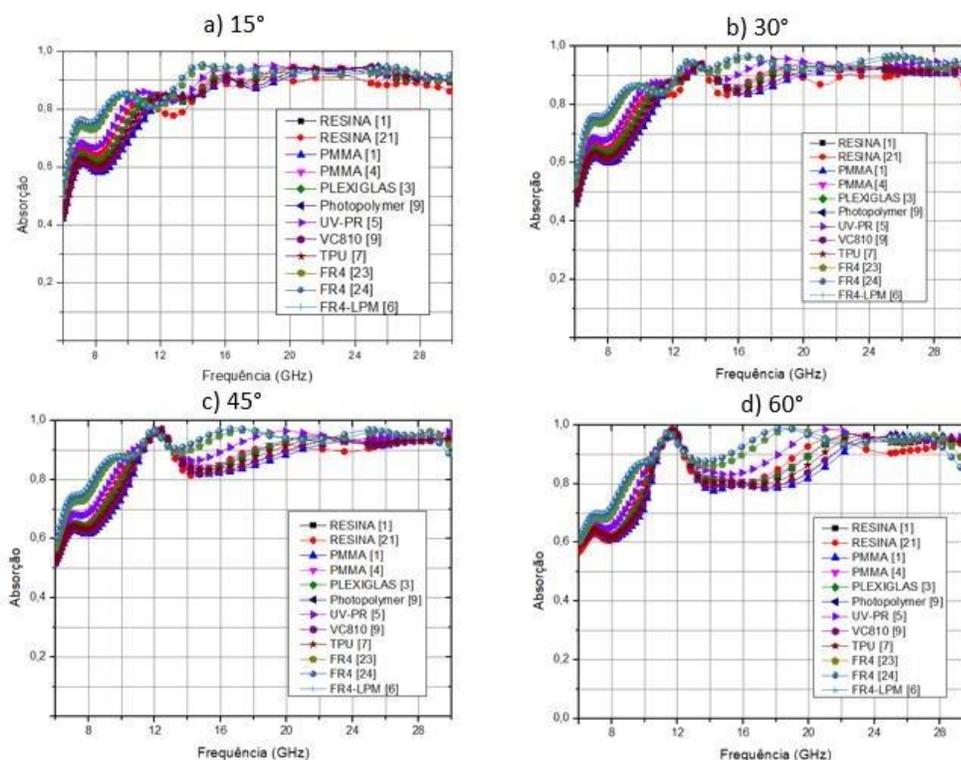


Figura 38 - Absorção para a estrutura (2) metamaterial com a configuração Resina/água/ Resina, para os ângulos de incidência de 15°, 30°, 45° e 60°, para o modo TM.

Na figura (35) observamos novamente que mesmo com a permissividade da água sendo dependente da temperatura, o conjunto da estrutura com resina e água não demonstrou dependências nos níveis de absorção, ainda é visto que o FR4 [24] com a resina o melhor desempenho. Na figura (36) é apresentado que há grande tolerância angular para incidência oblíqua, na estrutura quando variados os ângulos de incidência para o modo TE, com baixas flutuações nas absorções, mantendo-se em valores acima de 90%. Já na figura (36.1) temos que para incidência oblíqua para o modo TM a estrutura mantém uma banda de absorção acima de 90% para uma os ângulos simulados, isso também é visto em [2]. A estrutura (2) se mostrou um modelo com resultados significativos, que favorecem o estudo posteriormente em 3D e para a produção do dispositivo.

### 3.2.3 Estrutura Triangular invertida

A nova estrutura agora apresenta o topo triangular para baixo, de largura  $W1$  e comprimento  $H$ , foi configurado com as seguintes dimensões  $W1 = 11.8$  mm,  $W2 = 8.5$  mm,  $W3 = 4.5$  mm,  $W4$

= 4.5 mm,  $H = 6.2$  mm,  $h_3 = 1$  mm,  $h_2 = 1.7$  mm,  $h_1 = 3.1$  mm,  $H_1 = 5.2$  mm,  $H_2 = 3.5$  mm, sendo realizado as simulações para a mesma configuração resina/água/resina, para as resinas da tabela (2), para as faixa banda estudada.

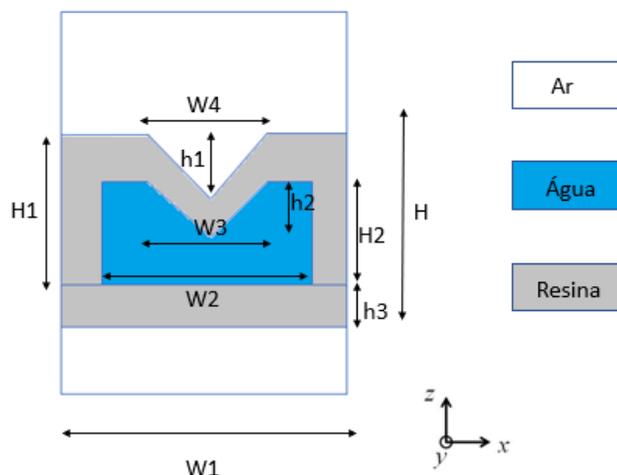


Figura 39 - Metamaterial absorvedor proposto de topo triangular invertida (Estrutura 3), configurado em resina/água/resina.

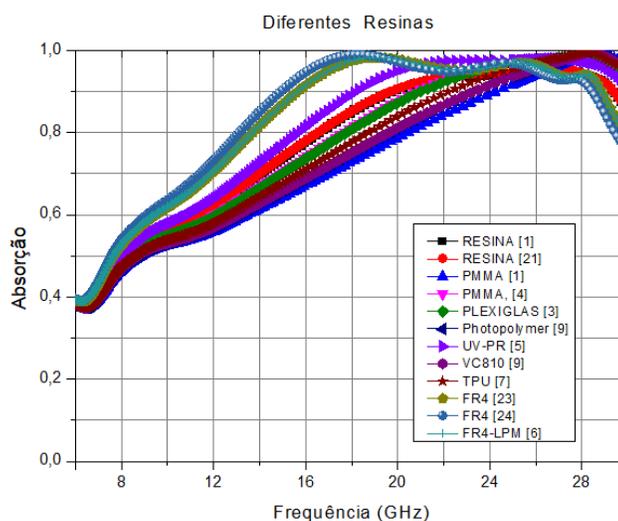


Figura 40 – Resultado da Absorção na estrutura (3) para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE.

Na figura (40) para temperatura de 27 °C, ao mudar as características da geometria as resinas FR4 [24], FR4 [23] e UV-PR [5] manteve uma alta banda larga de absorção, em que novamente FR4 [24], com intervalo de 13,41 GHz de absorção, com pico de ressonância em 18,31 GHz, como pode ser visto na figura (40).

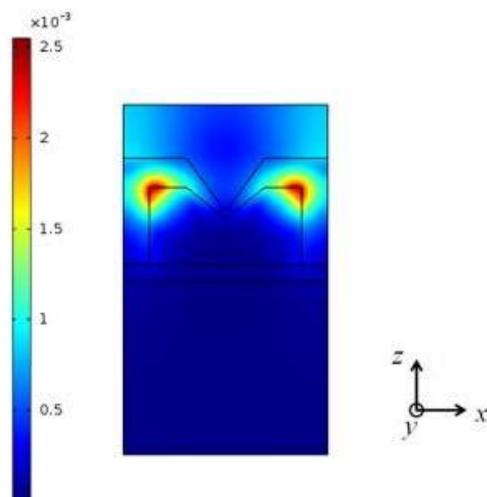


Figura 41- Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 18,31 GHz, para FR4/água/FR4

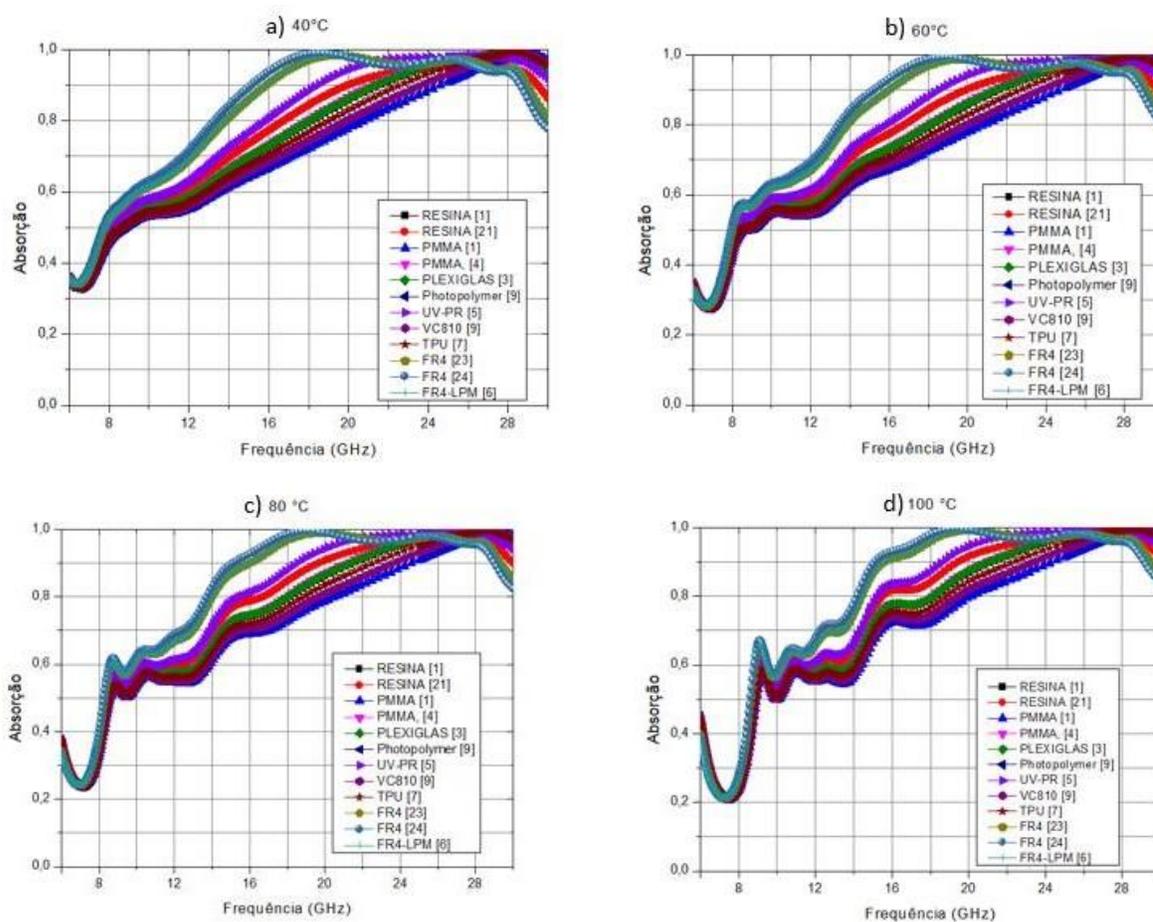


Figura 42 - Absorção para a estrutura (3) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C, para o modo TE.

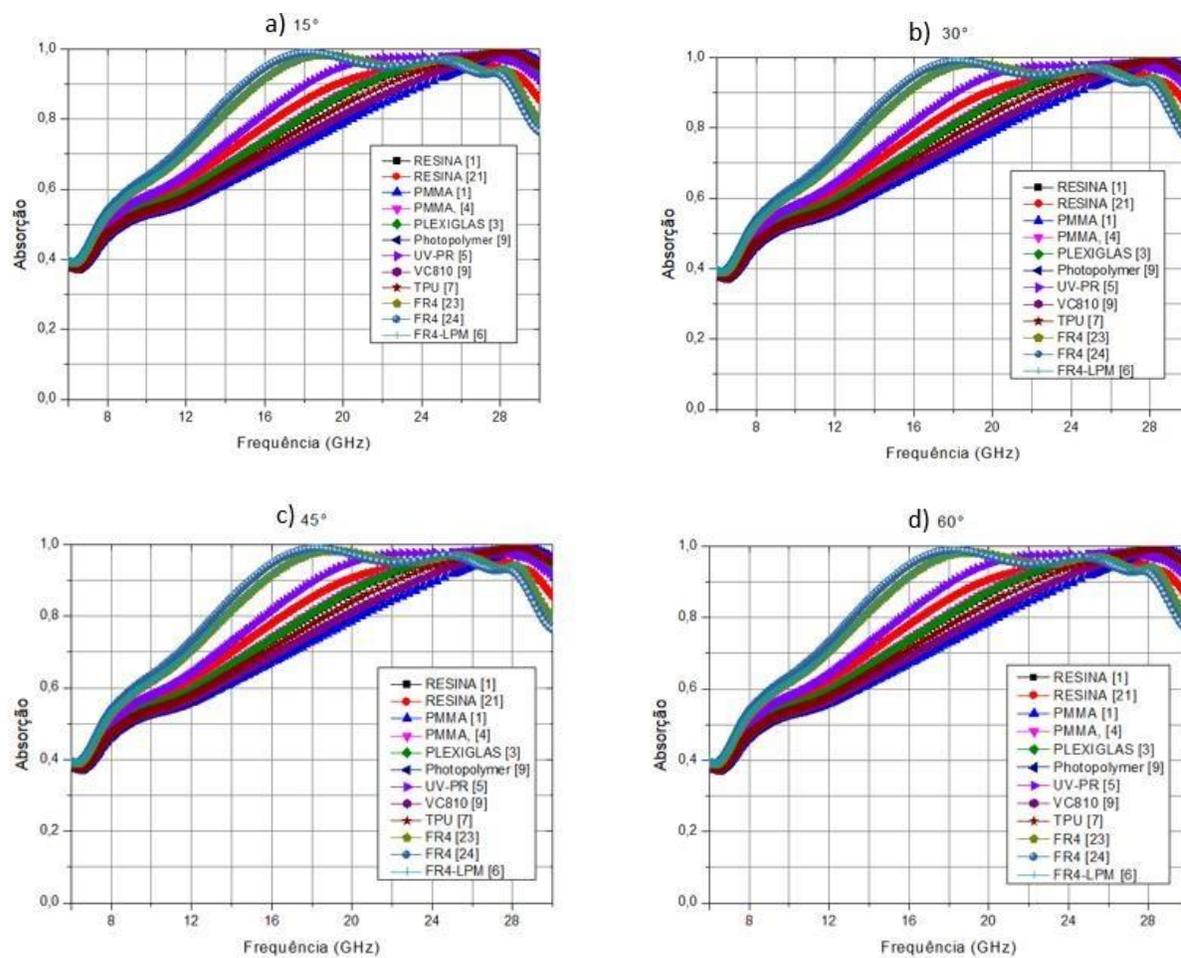


Figura 43 - Absorção para a estrutura (3) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência oblíqua de 15 °, 30 °, 45 ° e 60°, para o modo

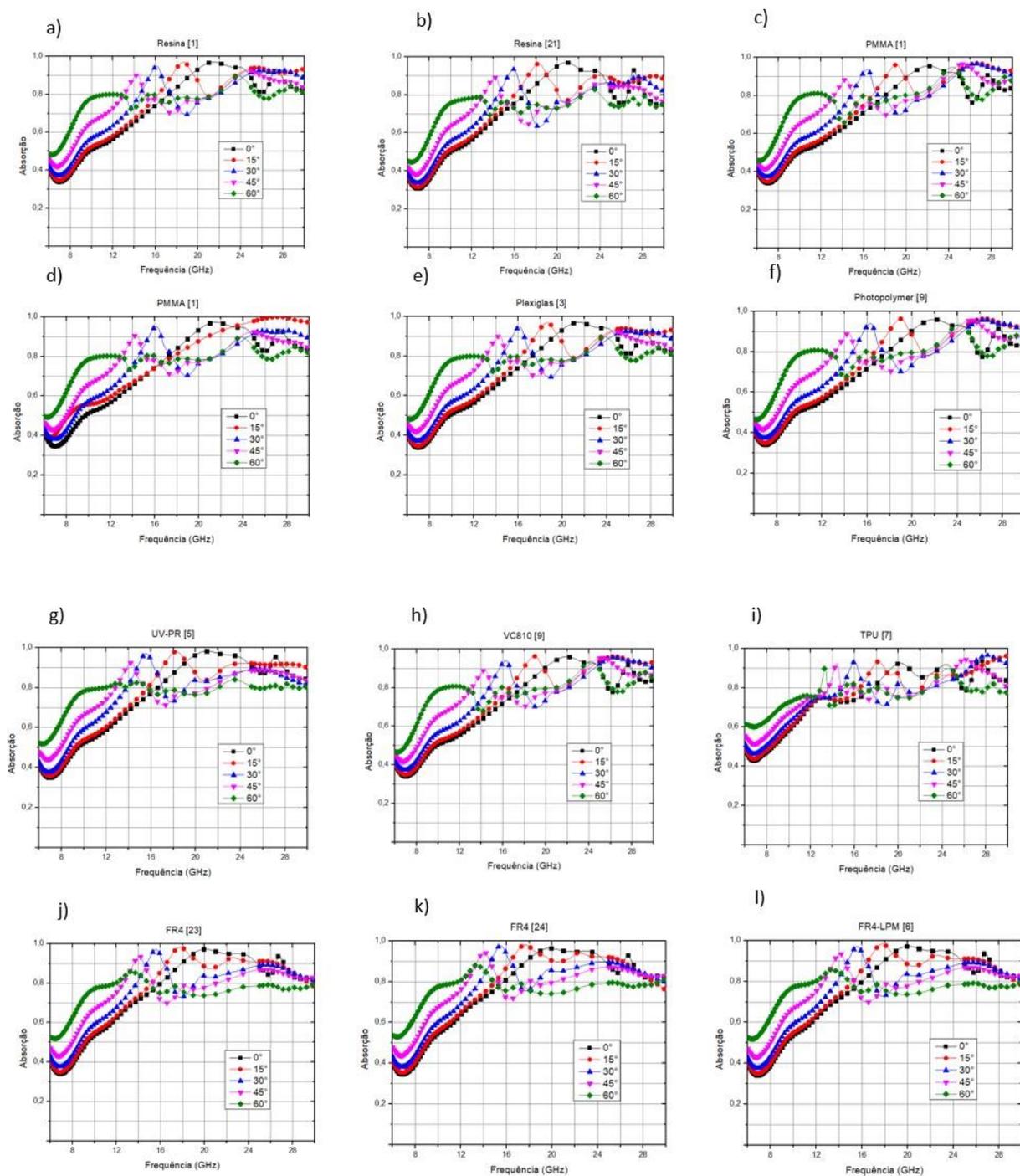


Figura 44 - Absorção para a estrutura (3) para os ângulos de incidência  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ , no modo TM, para as resinas: a) Resina[1], b) Resina [21], c) PMMA [1], d) PMMA [4], e) Plexiglas [3], f) Photopolymer [9], g) UV-PR [5], h) VC810 [9], i) TPU [7], j) FR4[23], k) FR4 [24], l) FR4-LPM [6].

Na figura (40) A distribuição do campo magnético para o modo TE para o pico ressonante concentra-se na parte superior interna da água junto à resina FR4 [24] ao qual apresentou maior banda de absorção, como previsto em teoria. Na figura (40) é visto os resultados para diferentes

temperaturas, a água ainda sim comporta-se como esperado, e a configuração da estrutura mostrou boa instabilidade térmica. Na figura 41 a estrutura mesmo com diferente característica geométrica, apresentou com baixa dependência angular, para o modo TE. Já para incidência oblíqua para o modo TM, é visto na figura (44), para a estrutura com todas as resinas, perde desempenho de absorção com estabilidade na absorção acima de 80 % para os ângulos de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$ , o que é diferente do que é visto em [2], e em comparação ao modo TE, mostrando dependência para o ângulo de incidência. Podemos ver que das resinas, a FR4 [24], foi a que apresentou o melhor desempenho com relação as demais resinas, com absorção acima de 90% entre a banda de frequência de 16,58 GHz – 26,41 GHz, sabendo que para a polarização no modo TM o campo magnético é sempre paralelo ao eixo y.

### 3.2.4 Estrutura em semicírculo concavidade para baixo

Nessa seção a estrutura apresentada tem um topo em semicírculo, de largura  $W1$  e comprimento  $H$ , foi configurado com dimensões:  $W1 = 9$  mm,  $W2 = 7$  mm,  $r1 = 1.55$  mm,  $r2 = 2.05$  mm,  $H = 8.15$  mm,  $h3 = 2$  mm,  $H1 = 4.2$  mm,  $H2 = 6.1$  mm, em que  $r1$  e  $r2$  são os respectivos raios dos semicírculos presentes na estrutura.

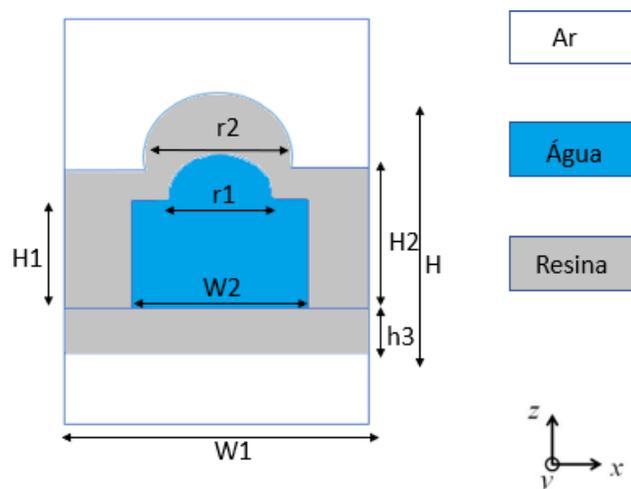


Figura 45 - Metamaterial absorvedor proposto de topo em semicírculo de concavidade para baixo (Estrutura 4), configurado em resina/água/resina.

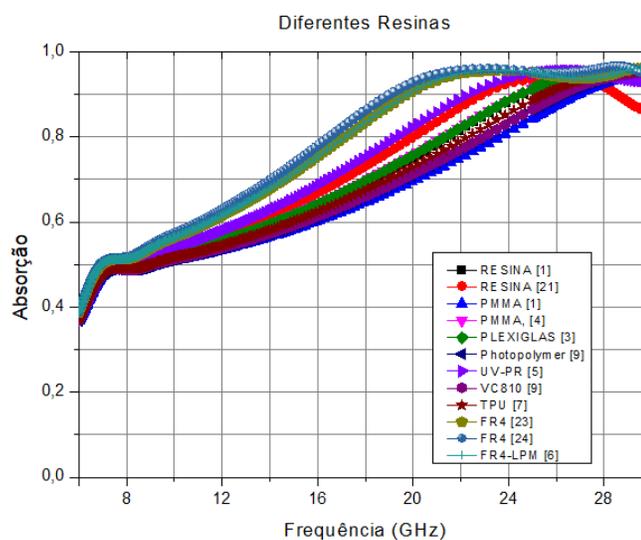


Figura 46 - Resultado da Absorção na estrutura (4) topo semicircular para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE.

A estrutura (4) mostra-se um absorvedor com uma banda de absorção de 10,79 GHz para a resina FR4 [24], que novamente apresentou maior desempenho na estrutura, seu maior pico de absorção foi de 95% em 23,14 GHz, com ressonâncias ocorrendo na parte inferior da água, em sua superfície com a resina, como pode ser visto na figura (43).

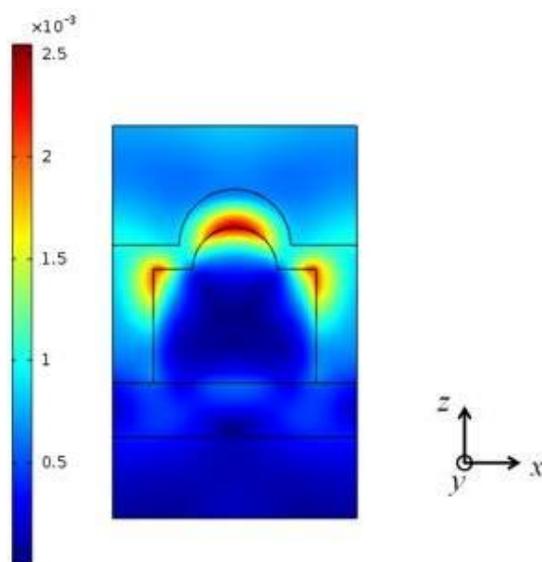


Figura 47 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 23,14 GHz, para FR4/água/FR4.

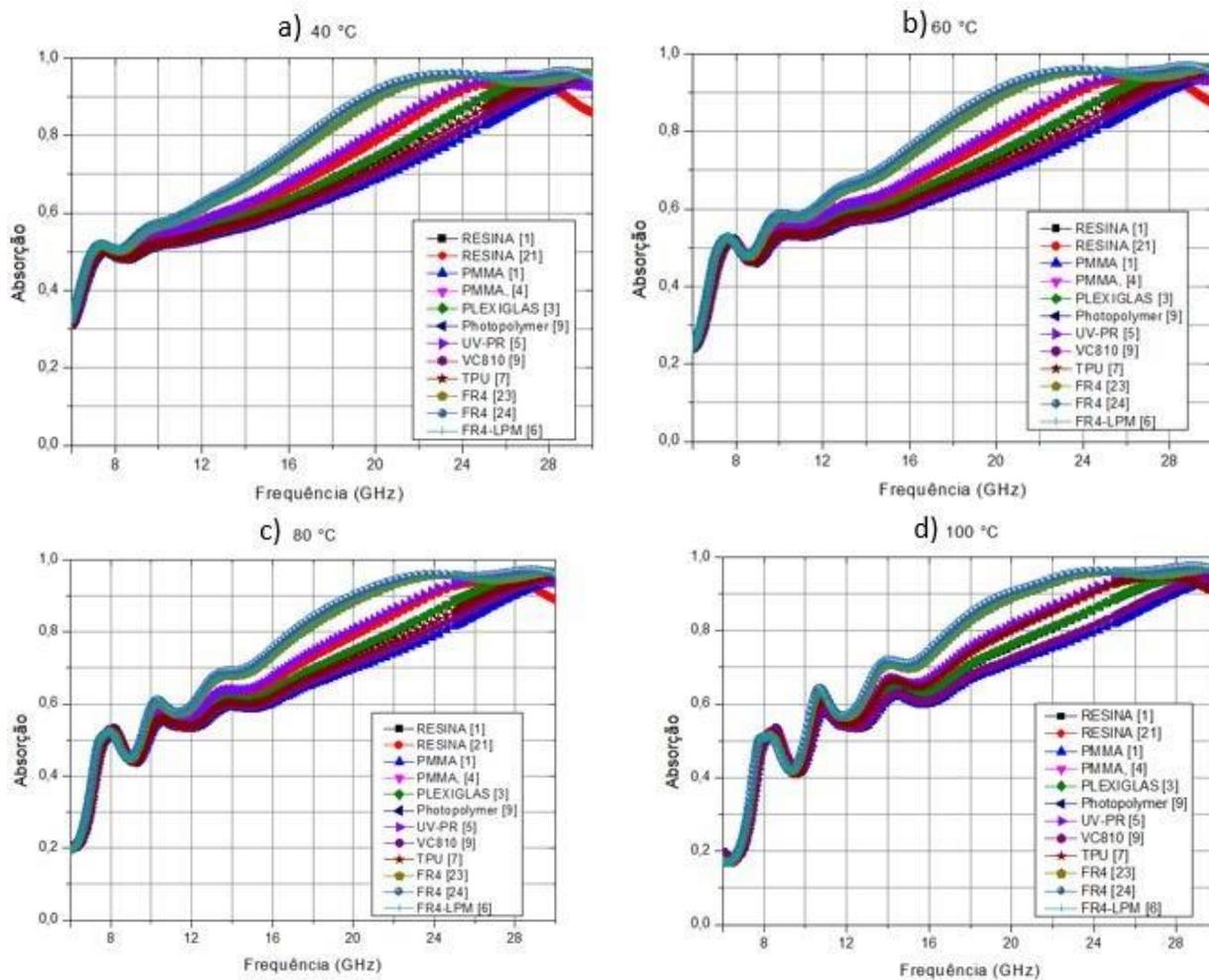


Figura 48 - Absorção para a estrutura (4) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C, para o modo TE.

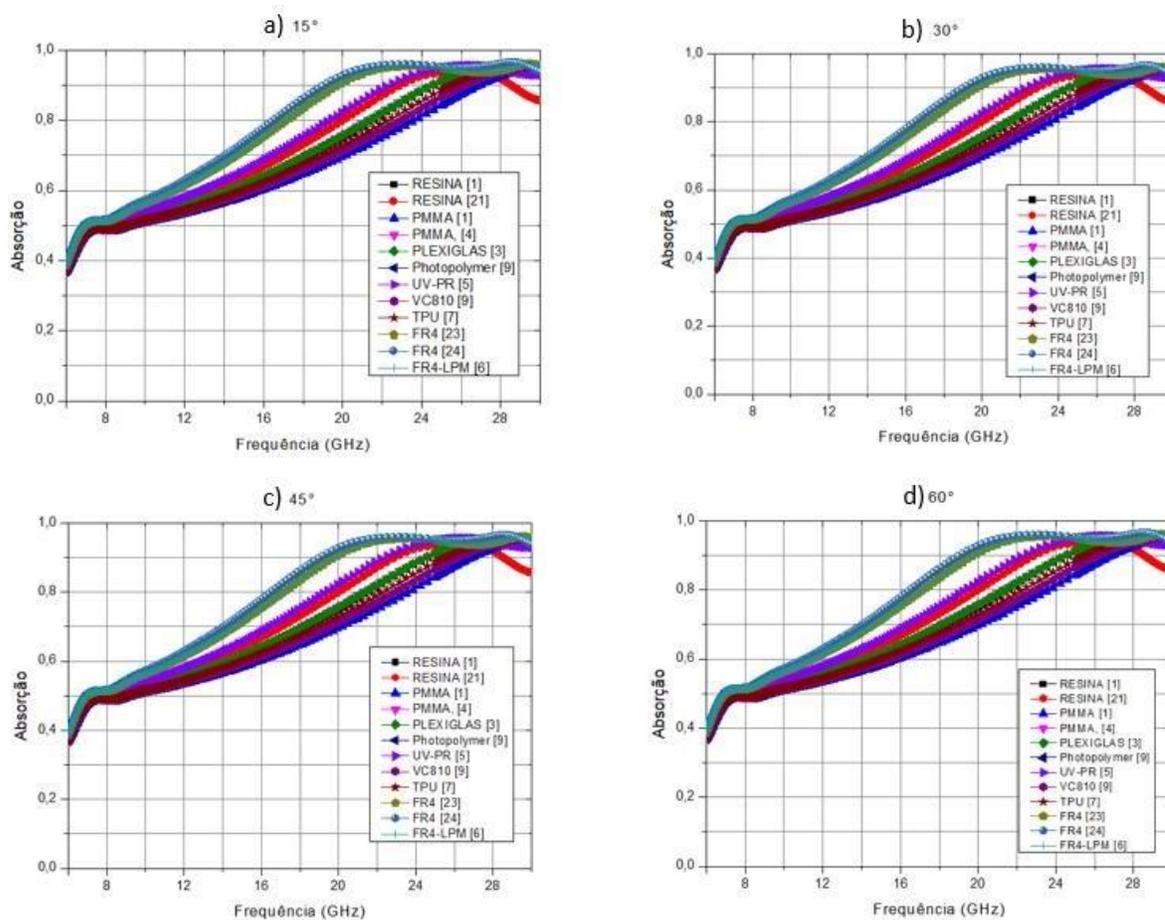


Figura 49 - Absorção para a estrutura (4) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência oblíqua de 15°, 30°, 45° e 60°, para o modo TE.

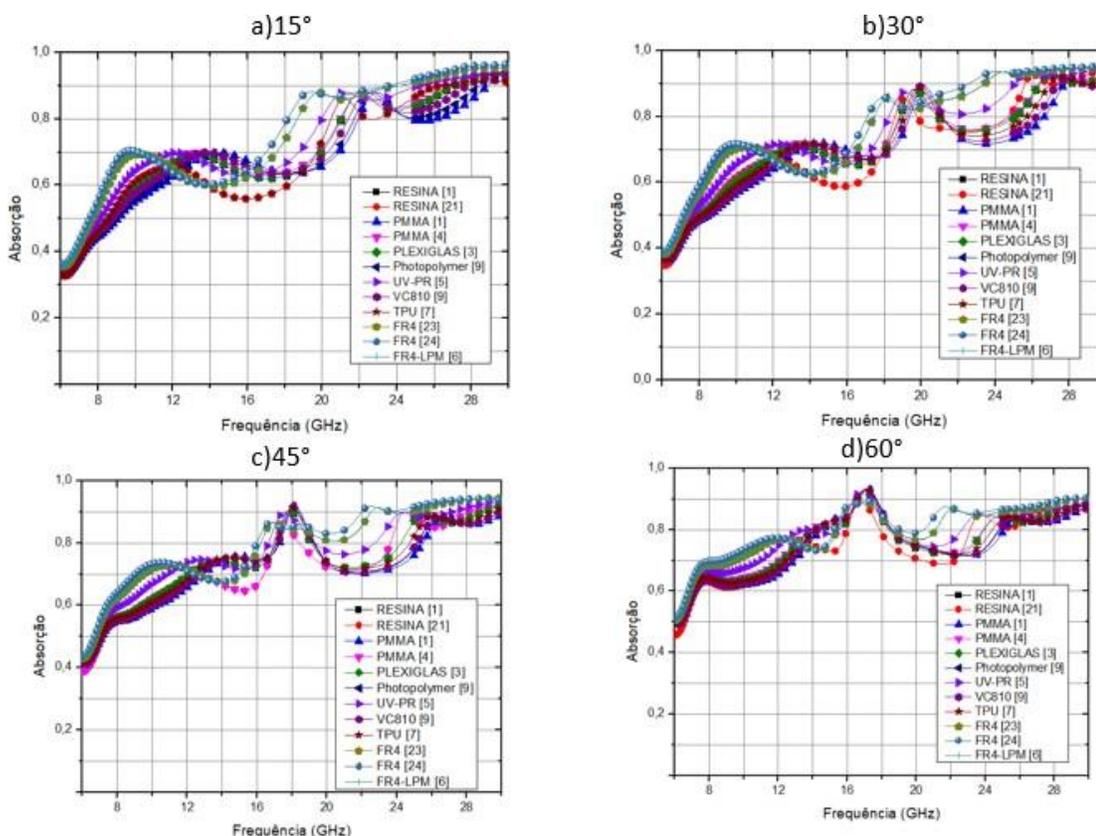


Figura 50 - Absorção para a estrutura (4) metamaterial com a configuração FR4/água/FR4, para os ângulos de incidência oblíqua de 15°, 30°, 45° e 60°, para o modo TM.

As figuras (45) e (46) reforçam como a estrutura mesmo sobre diferentes temperaturas, como pode ser visto na figura (45), apresenta estabilidade térmica com baixa variação entre as temperaturas. Da mesma forma para a figura (46) a estrutura mostrou-se com baixa dependência angular. Já para a figura (46), a polarização para o modo TM, mostrou que a estrutura (6), tem baixo rendimento para absorção, com muitas flutuações para a banda de frequência simulada.

### 3.2.5 Estrutura em semicírculo concavidade para cima

A estrutura (5) vista na figura (47) foi invertido o topo em semicírculo, com a concavidade para cima, com altura  $H$  e largura  $W1$ , e  $r1$  e  $r2$ , os raios dos semicírculos da estrutura, com as seguintes dimensões:  $W1 = 9$  mm,  $W2 = 7$  mm,  $r1 = 2.25$  mm,  $r2 = 1.75$  mm,  $H = 6.1$  mm,  $h3 = 1$  mm,  $H1 = 4.8$  mm,  $H2 = 5.1$  mm.

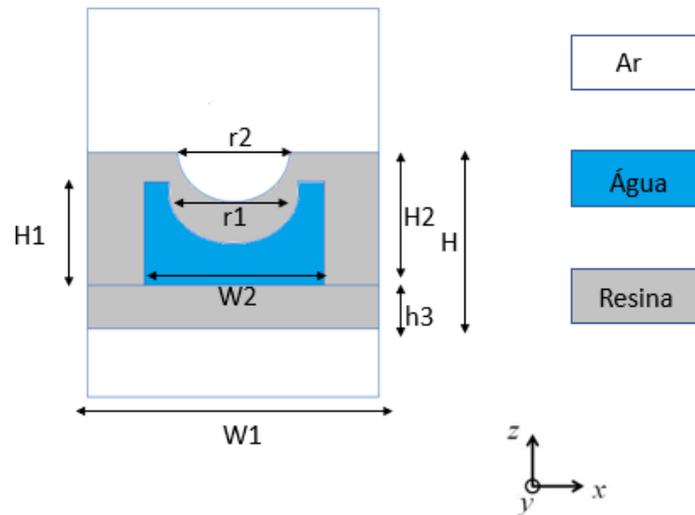


Figura 51 - Metamaterial absorvedor proposto de topo em semicírculo de concavidade para cima (Estrutura 5), configurado em resina/água/resina.

Diferente das estruturas anteriores, a resina FR4-LPM [6] visto na figura (48) apresentou maior banda larga de absorção, durante o intervalo de frequência simulado, chegando a 11,31 GHz entre 18,52 GHz a 29,83 GHz, ligeiramente maior que na resina FR4 [24] com intervalo de banda de absorção de 11,21 GHz entre 17,89 GHz a 29,10 GHz. Essa pequena diferença pode ser vista entre as dimensões da estrutura, em comparação as anteriores.

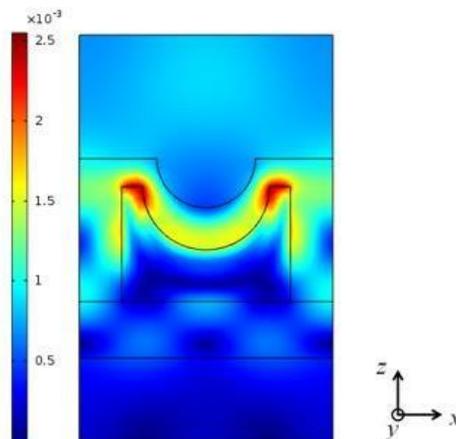


Figura 52 - Distribuição do campo magnético para o modo TE, para incidência normal à temperatura de 27 °C em 27,13 GHz, para FR4-LPM/água/FR4-LPM.

Na superfície superior da estrutura há um espalhamento do campo durante a parte superior da água/FR4-LPM, em que para o pico ressonante há um maior confinamento nos vértices da

estrutura e espalhamento sobre a superfície côncava do metamaterial.

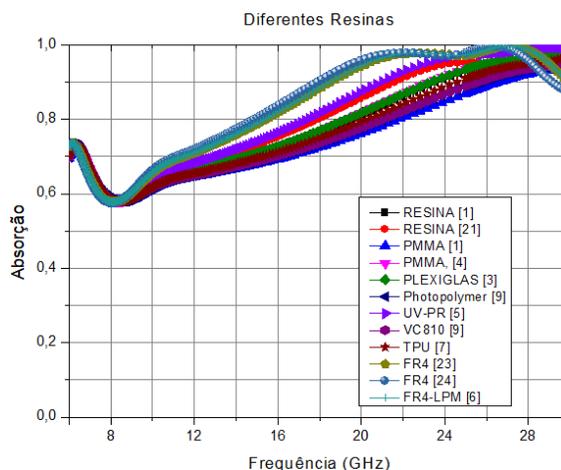


Figura 53 - Resultado da Absorção na estrutura (5) topo semicircular com concavidade para cima para diferentes resinas a 27 °C para o modo TE.

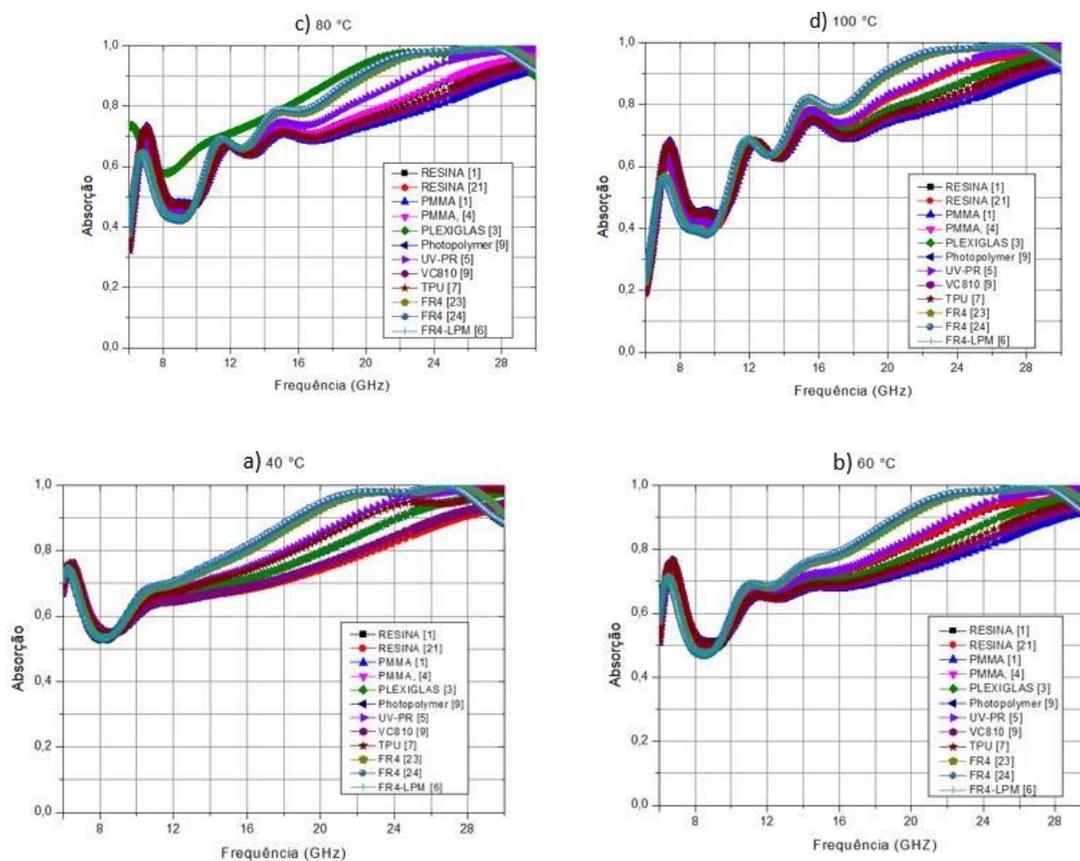


Figura 54 - Absorção para a estrutura (4) metamaterial com a configuração FR4-LPM/água/FR4-LPM, para as temperaturas de 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C, para o modo TE.

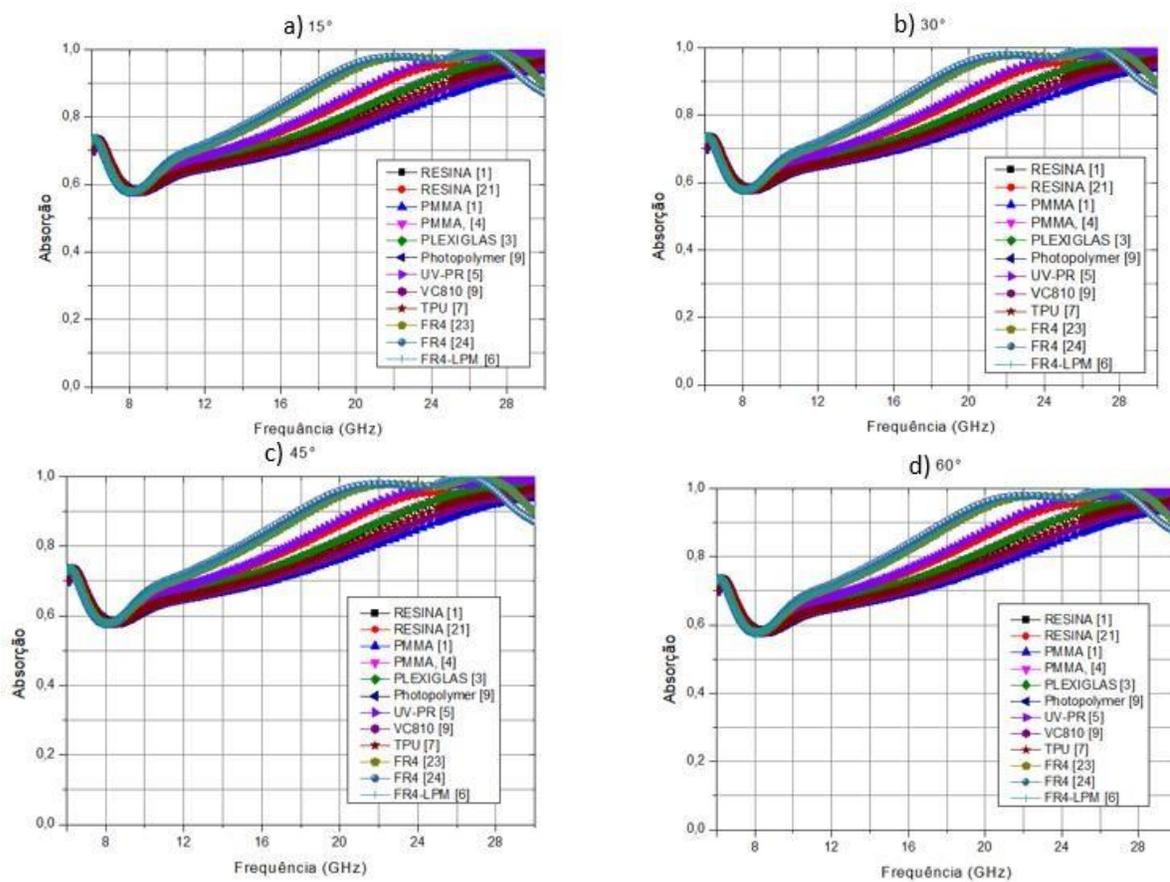


Figura 55 - Absorção para a estrutura (6) metamaterial com a configuração FR4-LPM/água/FR4-LPM, para os ângulos de incidência oblíqua de 15°, 30°, 45° e 60°, para o modo TE.

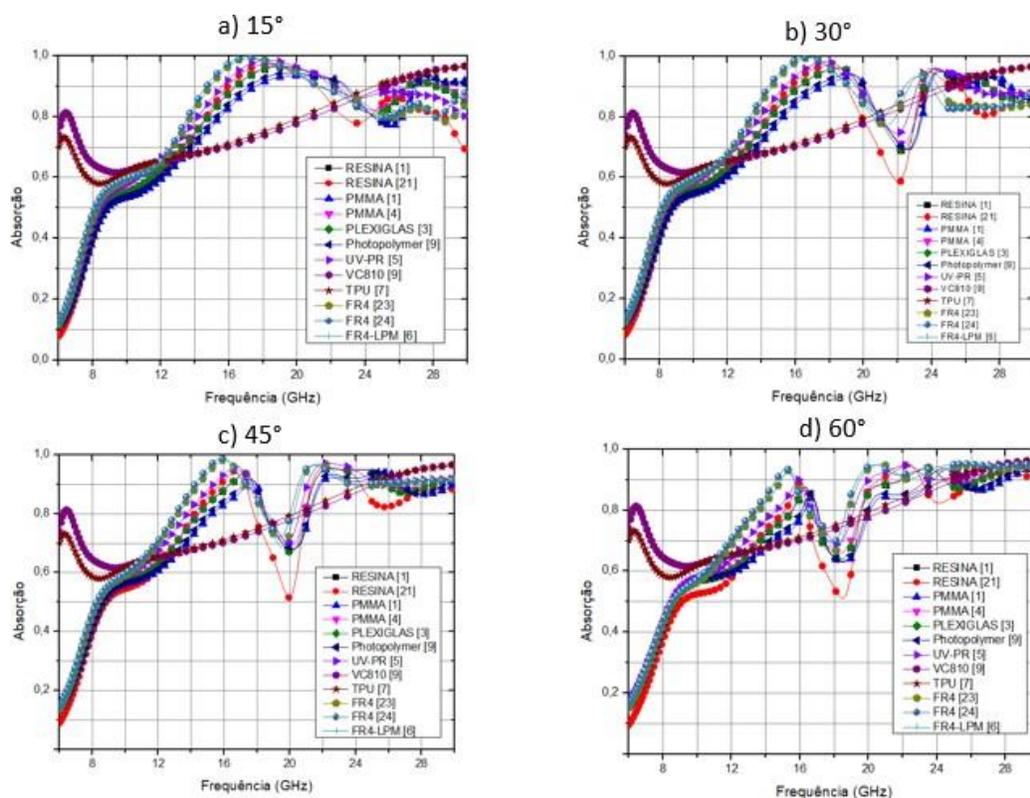


Figura 56 - Absorção para a estrutura (6) metamaterial com a configuração Resina/água/Resina, para os ângulos de incidência oblíqua de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ , para o modo TM.

A figura (54) apresenta que o comportamento da estrutura mesmo sobre diferentes temperaturas, apresenta estabilidade térmica com baixa variação de absorção entre as temperaturas simuladas, o que também é visto em [4] e [8] coincidindo da mesma forma para a figura (55) mostrando que a estrutura também apresenta-se com baixa dependência angular para o modo TE.

Na figura (56) é observada que as flutuações para a absorção no metamaterial, para o modo TM baixa o rendimento de absorção do modelo para os todos os ângulos simulados com máximo de absorção acima de 90 % para uma banda de 6,12 GHz, entre 15,15 GHz a 21,27 GHz. Na próxima seção será apresentado o comportamento da estrutura quando variado alguns parâmetros geométricos.

### 3.2 Comportamento para variação de características geométricas

Para os cinco modelos de estruturas em 2D proposto no estudo foram realizadas mudanças

em alguns parâmetros geométricos, mantendo a configuração da estrutura resina/água/resina, para o mesmo intervalo de frequência de 4,99 GHz a 29,99 GHz.

### 3.2.1 Estrutura trapezoidal

Foram variados os parâmetros  $H1$  e  $W1$  da estrutura para entender a influência das características geométricas do absorvedor. As mudanças podem ser notadas para na figura (53 – a) no qual mostra que há uma forte variação da absorção quando alterados o parâmetro  $H1$ , em que quanto menor o valor atribuído ao parâmetro, menor era a absorção no intervalo de banda simulada, em que o melhor valor atribuído para  $H1$  foi 5,9 mm. Já na figura (53 – b) é percebida uma variação na absorção pouco significativa, esse resultado é visto também em [16], que ao variar o comprimento da estrutura, foi visto que houve baixa dependência da absorção e do confinamento das ressonâncias.

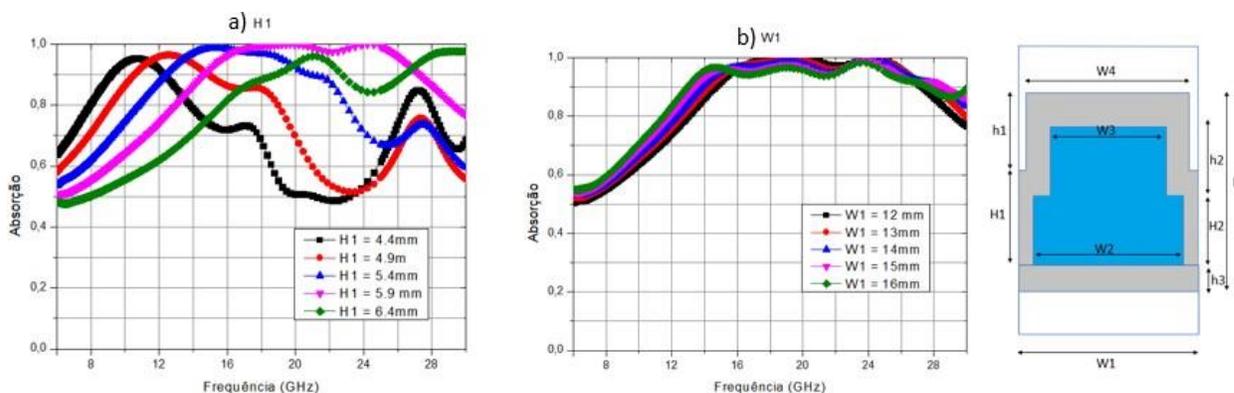


Figura 57 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros  $H1$  e  $W1$  na estrutura trapezoidal, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.

### 3.2.2 Estrutura de triangular

A estrutura de topo triangular visto na figura (54) mostrou que é diferente da estrutura trapezoidal do tópico anterior, pois o desempenho visto para absorção acima de 90% para ultra banda larga de frequência de 12,77 GHz a 29,99 GHz foi para  $H1 = 4,1$  mm, com as outras dimensões fixas, já vista no tópico 3.2.2. Já a variação da largura  $W1$  da estrutura, ainda apresentou alta a banda de absorção, sendo menor apenas para  $W1 = 9,1$  mm e  $W1 = 10,1$  mm.

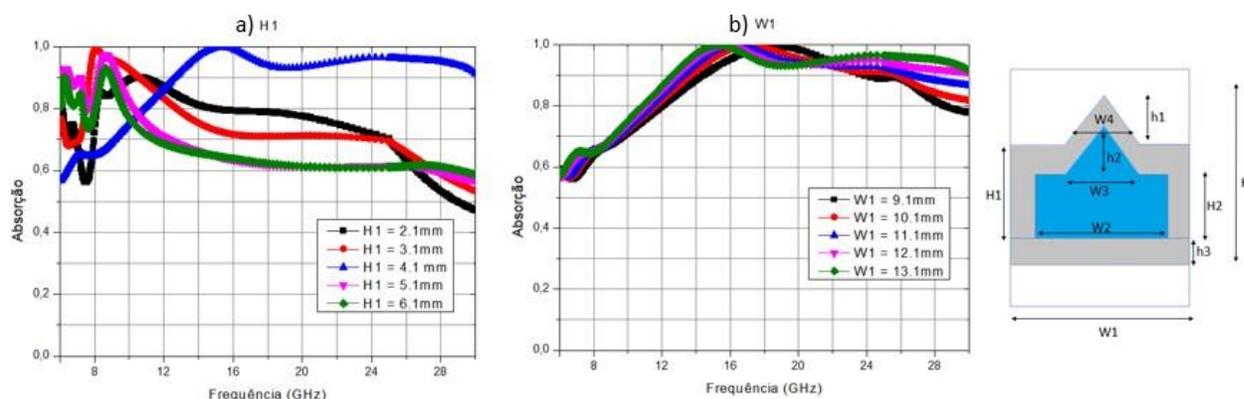


Figura 58 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros  $H1$  e  $W1$  na estrutura triangular, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.

### 3.2.3 Estrutura Triangular invertida

As mudanças nos parâmetros  $H1$  e  $W1$  na estrutura apresentada na figura (55) mostra que a estrutura não apresentou mudança significativa na absorção, mantendo alta a banda de absorção para o parâmetro  $H1$ , diminuindo apenas quando se aproximava para 28 GHz. O mesmo é visto na figura (54 – b) para o parâmetro  $W1$ , com pouca variação da absorção no intervalo de banda.

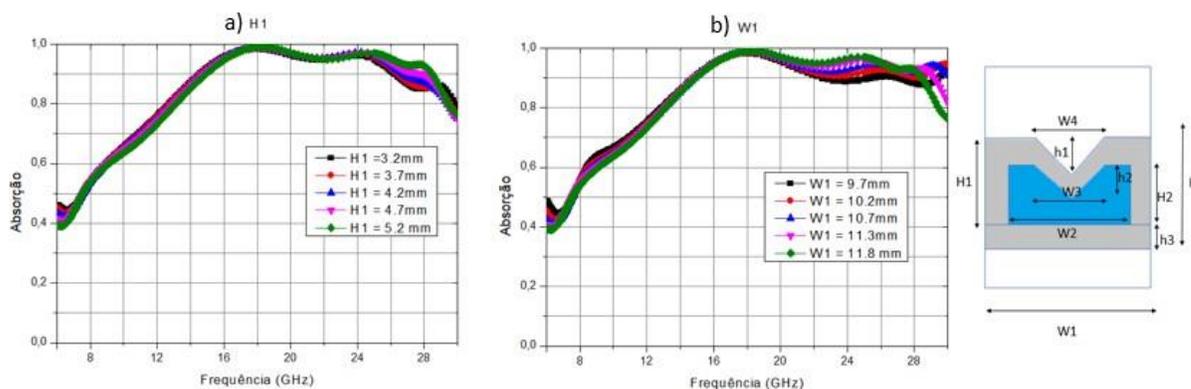


Figura 59 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros  $H1$  e  $W1$  na estrutura triangular com topo invertido, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.

### 3.3.4 Estrutura em semicírculo concavidade para baixo

Por questões de possibilidade de fabricação foi alterado um dos parâmetros a serem mudados, sendo realizada a variação dos parâmetros  $H2$  e  $W1$ , como pode ser visto na figura (56). Foi observado que com a mudança dos parâmetros para a estrutura (4) a mesma manteve-se com

uma banda larga de absorção acima de 90% para o intervalo de banda de 19,20 GHz a 29,99 GHz, tanto para os parâmetros de  $H_2$ , como para  $W_1$ , a possibilidade de que isso tenha ocorrido é pelo fato que a estrutura por ter uma superfície circular, o espalhamento do campo magnético na superfície gere maior acoplamento na região da banda larga de absorção, como é discutido em [6].

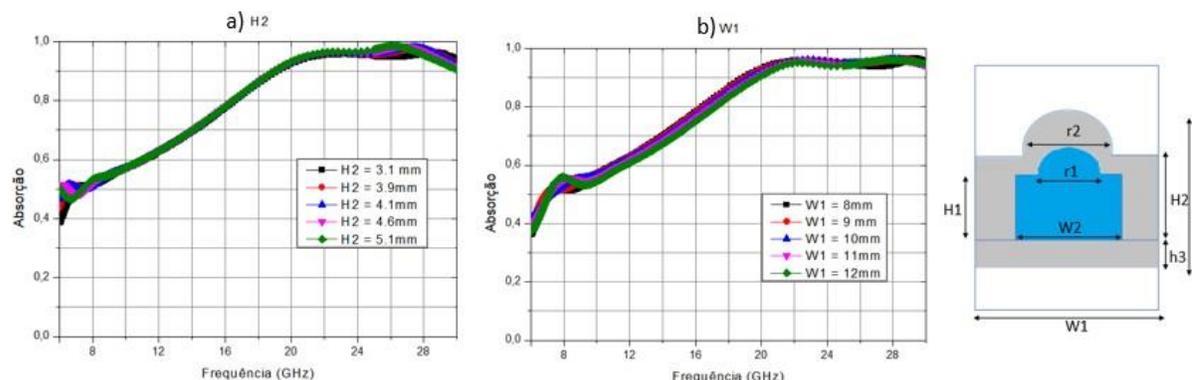


Figura 60 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros  $H_2$  e  $W_1$  na estrutura circular com concavidade para baixo, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.

### 3.3.5 Estrutura em semicírculo concavidade para cima

Da mesma forma como foi feito na estrutura do tópico anterior foi realizada a mudança dos parâmetros  $H_2$  e  $W_1$ . É interessante observar que para o parâmetro  $H_2$ , a variação da absorção na estrutura é significativamente pequena, porém, para a banda simulada é observada que a estrutura quando o parâmetro  $W_1$  é 8 mm, o intervalo de banda de absorção chega 15,5 GHz, entre as frequências de 13,46 GHz a 28,96 GHz, utilizando a resina FR4-LPM [6].

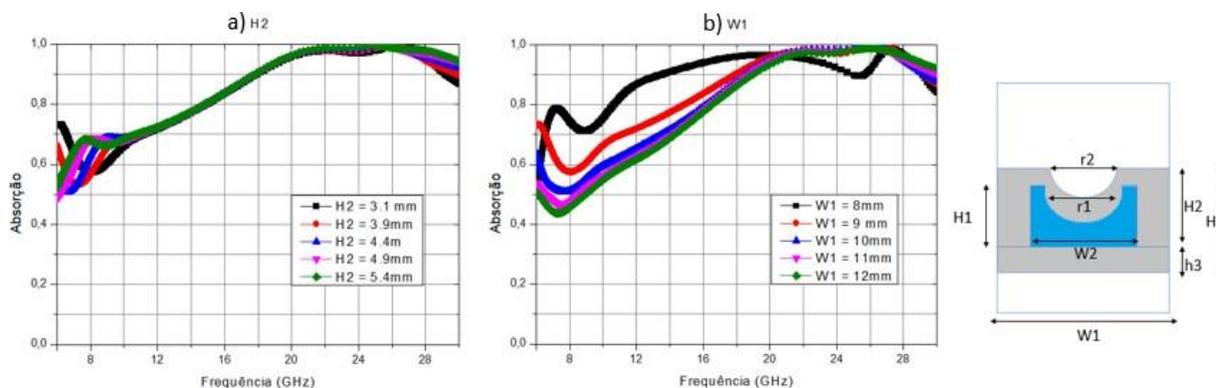


Figura 61 - Absorção para diferentes valores dos parâmetros  $H_2$  e  $W_1$  na estrutura circular com concavidade para o alto, para o intervalo de banda (4,99 – 29,99) GHz.

### 3.4 Conclusões

Ao longo do trabalho foi apresentado uma revisão bibliográfica, com destaque em metamateriais absorvedores com base em água, com o intuito de propor uma estrutura que oferecesse absorção máxima de ondas eletromagnéticas para uma dada banda larga de frequência dentro da faixa do microondas, em que a estrutura fosse puramente dielétrica, com possibilidade de fabricação.

A partir do estudo da arte foi definido inicialmente uma estrutura de base trapezoidal com largura máxima de 12 mm e altura máxima de 14 mm. Foram realizadas simulações para diferentes resinas vista na tabela (2) em que das 12 resinas simuladas a resina FR4 [24] (uma variação da resina utilizada por Landy) foi a que apresentou melhor resultado e a princípio a estrutura apresentou grande banda larga de absorção com picos ressonantes que se acoplam na superfície entre a água e a resina, com absorção perfeita em uma banda de frequência de 12,59 GHz, para o modo TE. Isso mostra que a estrutura tem um ótimo desempenho, e com relação aos estudos dos artigos [1 – 8], [10 – 11], [15 – 27] a estrutura cumpre com o que se proponha a ser. Diferente para as absorções para o modo TM que mostrou que a estrutura diminui as ressonâncias acopladas na superfície da estrutura, o que difere do esperado pelo referencial, que [6] e [8] para o modo TM as estruturas quando as ondas incidem para ângulos inferiores a 30° e a 40°, ainda apresentavam absorção acima de 90 °, e mesmo para ângulos superiores a 60° a absorção no metamaterial ainda era acima de 80°.

Partindo desses resultados iniciais foi variado a superfície superior da estrutura com o intuito de observar se as características geométricas apresentariam mudanças significativas, nas ressonâncias das ondas incidentes nas estruturas, tanto para o modo TE como para o modo TM.

Das estruturas propostas todas apresentaram um bom desempenho para banda larga de absorção com a resina FR4 [24] menos a estrutura (5), que apresentou boa banda larga de absorção com FR4-LPM [6], que possivelmente seja devido às características geométricas, pois a resina FR4 [24] tem a maior permissividade imaginária  $\epsilon''$ , visto que quanto maior a permissividade imaginária, maior é a perda dielétrica do material, assim, gerando acoplamento dos campos ressonantes na superfície da estrutura.

Vale ressaltar que para todos os modelos, ao observar a concentração do campo magnético na superfície da estrutura é observado que é acoplado entre a interface resina/água, não permitindo

que ocorra o espalhamento do campo na região interna da água, isso devido à incompatibilidade de impedância entre a interface, como é visto em [1].

A estrutura de base triangular foi a que apresentou melhor desempenho, com ultra banda larga de absorção de 17,29 GHz, para o intervalo de banda de 12,77 GHz a 29,99 GHz, com pico máximo de absorção em 15,29 GHz.

Apesar das estruturas de base circular com concavidade para cima e para baixo, não ter chegado a uma maior banda de absorção, as estruturas atendem ao que é proposto no início do trabalho, como absorvedores com banda larga de absorção, sendo que das variações feitas na geometria inicial, ainda foi alcançado ultra banda larga de absorção na estrutura de base triangular (2). Os metamateriais propostos servem como absorvedores na faixa do microondas (1 m – 1 mm), com transmitância zero e alta absorção, em comparação com o referencial, os absorvedores podem ser construídos variando a quantidade de água na estrutura com a possibilidade de serem absorvedores sintonizáveis.

### ***3.4.1 Trabalhos Futuros***

Para trabalhos futuros é sugerido que seja analisado efeitos de absorção nas estruturas com concentração de sal e açúcar na água, com outras resinas, mantendo a estrutura ainda puramente dielétrica em 3D, sabendo que sob determinadas concentração de sal na substância e açúcar, a permissividade da água muda, apresentando desempenho interessante para um maior intervalo de frequência.

### ***3.4.2 Publicações associadas ao trabalho***

- Flávio Silva Santos, Vitaly Felix Rodriguez-Esquerre, "Water-based broadband metamaterial absorbers operating at microwave frequencies," Proc. SPIE 11460, Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2020, 114602G (20 August 2020);

*Resumo: A água é um material dielétrico promissor para absorção de banda larga de grande interesse para aplicações em microondas, devido às suas características dispersivas e parte de permissividade imaginária. Neste trabalho foram analisados diversos absorvedores de banda larga, operando em microondas entre 5,0 GHz a 30,0 GHz. Maior absorção para ondas*

*eletromagnéticas polarizadas TE e TM com eficiência acima de 90% foi observada para frequências de microondas, enquanto a transparência óptica pode ocorrer simultaneamente. Os absorvedores de metamateriais à base de água analisados exibem uma absorção de grande angular. Esses tipos de estruturas podem ser aplicados à tecnologia de compatibilidade eletromagnética e furtiva.*

# Referências

- [1] R. Jian, J. Y. Yin, “Cylindrical-water-resonator-based ultra-broadband microwave absorber,” *Optical Materials Express* 8 (2018).
- [2] H. Xiutao, L. Conghui, W. Shengming, C. Rong, C. Junfeng et al. “All-Dielectric Wet Sandy Soil Broadband Tunable Absorber Base don Interference Theory,” *Journal of Electronic Materials*; Warrendale Vol. 47, Ed. 9, (2018).
- [3] H. Dawei et al., “Optically Transparent Broadband Microwave Absorption Metamaterial By Standing-Up Closed-Ring Resonators,” *Adv. Optical Mater*, (2017).
- [4] P. Yong, et al. “Water-based metamaterial absorbers for optical transparency and broad band microwave absorption,” 2018 *J. Appl. Phys.* 123 (2018).
- [5] X. Huang, et al. “Water-injected all-dielectric ultra-wide band and prominent oblique incidence metamaterial absorber in microwave regime,”. *Journal of Physics. D: Appl. Phys.* (2017).
- [6] Z. J. ming et al. “Broadband microwave absorption utilizing water-based metamaterial structures,” *Optics Express* 8524 Vol. 26, (2018).
- [7] Z. Wu, X. Chen, Z. Zhang, L. Heng, S. Wang, and Y. Zhou, “Design and optimization of a flexible water-based microwave absorbing metamaterial,” *Appl. Phys. Express*, vol. 12, (2019).
- [8] J. Xie et al. "Water metamaterial for ultra-broadband and wide-angle absorption," *Opt. Express* 26, 5052-5059 (2018)
- [9] Bradley, et al. "Printable all-dielectric water-based absorber". *Scientific Reports*. (2018).
- [10] D. Wu et al. "The design of ultra-broadband selective near-perfect absorber based on photonic structures to achieve near-ideal daytime radiative cooling", *Materials & Design*, Vol 139, Pag 104-111, (2018).
- [11] C. Christophe. "Perspectives on EM metamaterials". *Materials Today - MATER TODAY*. (2009).
- [12] W. Jiyang, et al. "Advanced Materials and Materials Genome." (2015).
- [13] W. J. Ellison, "Permittivity of Pure Water, at Standard Atmospheric Pressure, over the Frequency Range 0–25THz and the Temperature Range 0–100°C", *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 36, Pag 1-18 (2007).
- [14] M. Odit, et al. “Experimental demonstration of water based tunable metasurface,” *Appl. Phys. Lett.* 109, 011901 (2016).
- [15] A. Andryieuski, S. Kuznetsova, S. Zhukovsky et al. “Water: Promising Opportunities for Tunable All-dielectric Electromagnetic Metamaterials,” *Sci Rep* 5, 13535 (2015).
- [16] Y. Shen, J et al. "Water-based metamaterial absorber for broadband electromagnetic wave absorption," *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, Suzhou, Pag 1-2, (2017).

- [17] C. Long, S. Yin, W. Wang et al., "Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorbers by transverse magnetic harmonics of 210 mode," *Sci Rep* 6, 21431 (2016).
- [18] I. V. Stenishchev, A. A. Basharin, "Toroidal response in all-dielectric metamaterials based on water," *Sci Rep* 7, 9468 (2017).
- [19] J. b. Sun, L. Y. Liu, G. Dong, and J. Zhou, "An extremely broadband metamaterial absorber based on destructive interference," *Opt. Express* 19, 21155-21162 (2011).
- [21] J. Xie et al., "Truly All-Dielectric Ultrabroadband Metamaterial Absorber: Water-Based and Ground-Free," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 3, Pag 536-540, (2019).
- [22] G. Deepak et al. "Effect of salinity on the dielectric properties of water," *Indian Journal of Pure and Applied Physics*. 50. Pag 405-410. (2012).
- [23] J. Zhao, S. Wei, C. Wang, K. Chen, B. Zhu, T. Jiang, and Y. Feng, "Broadband microwave absorption utilizing water-based metamaterial structures," *Opt. Express* 26, Pag 8522-8531 (2018)
- [24] M. T. Islam, M. N. Rahman, M. S. J. Singh and M. Sam suzzaman., "Detection of Salt and Sugar Contents in Water on the Basis of Dielectric Properties Using Microstrip Antenna-Based Sensor," in *IEEE Access*, vol. 6, Pag 4118-4126, 2018.
- [25] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber". *Phys. Rev. Lett.* 100 (20) (2008).
- [26] Y. Zhao, B. Li, R. Zhang, Z. Zhang, D. Wang and F. Wang, "The Design of Broadband Transmitting Absorbing Material Based on L-Shape Metamaterial\*," 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), pp. 1-3, (2019).
- [27] Claire M. Watts, Xianliang Liu, and Willie J. Padilla. "Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers," *Advanced Materials*, (2014).
- [28] Q. Zhao, J. Zhou, F. Zhang, D. Lippens, "Mie resonance-based dielectric metamaterials", *Materials Today*, Volume 12, Issue 12, Pag 60-69, (2009).
- [29] F. S. Santos, V. F. Rodriguez-Esquerre, "Water-based broadband metamaterial absorbers operating at microwave frequencies," *Proc. SPIE* 11460, *Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2020*, 114602G (2020).
- [30] P. Tassin, L. Zhang, T. Koschny, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, "Low-loss metamaterials based on classical electromagnetically induced transparency," *Phys. Rev. Lett.* 102, 053901 (2009).
- [31] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science* 314, Pag 977–980 (2006).
- [32] D. J. Gogoi and N. S. Bhattacharyya, "Embedded dielectric water "atom" array for broadband microwave absorber based on Mie resonance". *J. Appl. Phys.* 122 (17), (2017).
- [33] A. Andryieuski, et al. "Water: Promising opportunities for tunable all-dielectric electromagnetic metamaterials," *Sci. Rep.*, vol. 5, (2015).
- [35] C. M. Watts, X. Liu, and W. J. Padilla, "Metamaterial electromagnetic wave absorbers," *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 23, Pag 98 – 120, (2012).

- [36] Y. Fan et al. "An active wideband and wide-angle electromagnetic absorber at microwave frequencies," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, Pag 1913–1916, (2016).
- [37] K. N. Rozanov, "Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 8, Pag 1230–1234, (2000).
- [38] J. Tak and J. Choi, "A wearable metamaterial microwave absorber," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, Pag 784–787, (2017).
- [39] V. V. Varadan, "Radar Absorbing Applications of Metamaterials," 2007 IEEE Region 5 Technical Conference, Pag 105-108, (2007)
- [40] D. Zhou, X. Huang and Z. Du, "Analysis and Design of Multilayered Broadband Radar Absorbing Metamaterial Using the 3-D Printing Technology-Based Method," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, Pag. 133-136, (2017).
- [41] B. Zhu, Z. Wang. C. Huang, Y. Feng. J. Zhao, and T. Jiang, "Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle" *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 101, Pag 231–239, (2010).
- [42] R. Ali, B. Zamir, H. A. Shah, "Transverse electric surface waves in a plasma medium bounded by magnetic materials" *Results in Physics*, Vol 8, Pag 243-248, (2018).
- [42] D. Griffiths, "Introduction to Eletrodynamics", 3rd ed. p. cm, Person Addison wesley, ISBN 0-13-805326-X, (1999).
- [45] Q. Zhao, J. Zhou, F. Zhang, D. Lippens, "Mie resonance-based dielectric metamaterials", *Materials Today*, Vol 12, Pag 60-69, (2009)
- [46] S. In and N. Park, "Effects of optical Joule heating in metamaterial absorber: A non-linear recursive feedback optical-thermodynamic multiphysics study," 2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS), (2015).
- [47] S. Joerg, "Uniaxial metallo-dielectric metamaterials with scalar positive permeability". *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*. Pag 74. (2006).
- [48] E. L. Nohara. "Materiais Absorvedores De Radiação Eletromagnética Na Faixa De 8 A 12 Ghz", *Dissertação, Taubaté – SP*, Pag 92, (2005).
- [49] Y. Zhao, et al. "The Design of Broadband Transmitting Absorbing Material Based on L-Shape Metamaterial," *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, Pag. 1-3, (2019).
- [50] D. Zhirihin, K. Simovski, P. Belov and S. Glybovski, "Mushroom-type HIS as a perfect absorber for two angles of incidence," 2017 11th International Congress on Engineered Materials Platforms for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), Pag. 397-399, (2017).
- [51] Y. Wang, X. Xuan, L. Zhu, H. Yu, Q. Gao, X. Ge. Numerical study of an ultra-broadband, wide-angle, polarization-insensitive absorber in visible and infrared region. *Optical Materials* 114, (2021)
- [52] H. Li, et al. "A switchable and tunable multifunctional absorber/reflector with polarization-insensitive features". *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, (2021).
- [53] K. B.X. Hanh, V.T.H.; Tung, B.S.; Lam, V.D.; Kim, Y.J.; Lee, Y.; Tu, H.-T.; Chen, L.Y. Narrow/Broad-Band Absorption Based on Water-Hybrid Metamaterial. *Crystals*, 10, (2020).