



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ HITALO PALMITO DE OLIVEIRA

UTILIZAÇÃO DE *BLEND* DE CARBONATO TRICÁLCICO ( $\text{CaCO}_3$ ) E DIÓXIDO DE  
SILÍCIO ( $\text{SiO}_2$ ) COMO SUBSTRATO DE ANTENA DE MICROFITA

MOSSORÓ

2019

JOSÉ HITALO PALMITO DE OLIVEIRA

UTILIZAÇÃO DE *BLEND* DE CARBONATO TRICÁLCICO ( $\text{CaCO}_3$ ) E DIÓXIDO DE SILÍCIO ( $\text{SiO}_2$ ) COMO SUBSTRATO DE ANTENA DE MICROFITA

Dissertação de mestrado apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade, Prof. Dr.

Co-orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2019

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semiárido conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semiárido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48u Oliveira, José Hitalo Palmito de.  
Utilização de blend de Carbonato Tricálcico (CaCO<sub>3</sub>) e Dióxido de Silício (SiO<sub>2</sub>) como substrato de antena de microfitas / José Hitalo Palmito de Oliveira. - 2019.  
104 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.  
Coorientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

1. Substrato. 2. Antenas de microfitas. 3. Carbonato tricálcico (CaCO<sub>3</sub>). 4. Dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>). I. Andrade, Humberto Dionísio de, orient.  
II. Queiroz Júnior, Idalmir de Souza, co-orient.  
III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOSÉ HITALO PALMITO DE OLIVEIRA

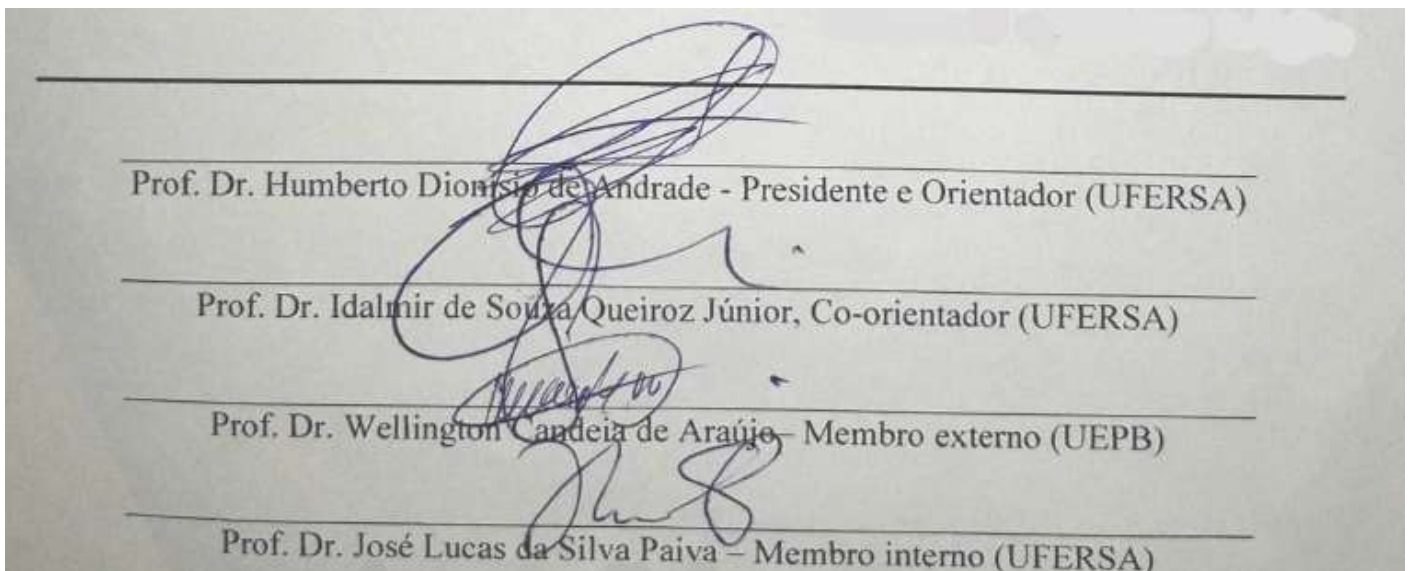
UTILIZAÇÃO DE *BLEND* DE CARBONATO TRICÁLCICO ( $\text{CaCO}_3$ ) E DIÓXIDO DE SILÍCIO ( $\text{SiO}_2$ ) COMO SUBSTRATO DE ANTENA DE MICROFITA

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Defendida em: 18 / 12 / 2020

BANCA EXAMINADORA



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Cícero e Neuma, pelos esforços durante toda uma vida que me proporcionaram a oportunidade de desenvolver este e outros trabalhos importantes. Agradeço também à minha irmã, Lidiane, pelo apoio pessoal e profissional.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Humberto, por todo o grande conhecimento e ajuda durante a graduação e a pós-graduação.

Agradeço ao meu co-orientador, Idalmir, pelos ensinamentos e grande conhecimento compartilhado com todos desta comunidade acadêmica.

Agradeço aos amigos do curso de pós-graduação em engenharia elétrica, que compartilharam conhecimento e me ajudaram a realizar este trabalho.

*“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações”.*

(Nikola Tesla)

## RESUMO

Antenas de microfita estão sendo cada vez mais objeto de estudos científicos devido à vasta gama de aplicações, versatilidade dos modelos, abrangência de transmissão de sinais bem como possibilidade de tamanho reduzido. Neste contexto, a constante procura por dielétricos que atendam às necessidades destes dispositivos de micro-ondas para implementação de projetos reduzidos impulsionou a pesquisa na área de materiais cerâmicos, em especial materiais que tenham elevada disponibilidade na região onde se faz a pesquisa. Desta forma, materiais cerâmicos oriundos de rejeitos de processos industriais tem grande utilidade, pois aproveita o que seria rejeitado ou teria gasto extra de energia e tempo para entrar novamente no processo. Baseando-se nesta ideia, este trabalho tem como objetivo propor um tipo de substrato cerâmico obtido a partir de uma linha de rejeito de material de uma indústria cimenteira. O carbonato tricálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) e o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) são coletados em uma mina de calcário localizada em Quixeré/CE. Passam pelo processo de pré-homogeneização e posteriormente por um processo de moagem para obtenção do *blend* final. Isto posto, serão abordados o projeto e a análise da performance deste elemento como substrato operando na região de frequência da banda C em 5,8 GHz, para aplicações futuras em dispositivos de transmissão e/ou recepção de sinais.

**Palavras-chave:** Substrato; Antenas de microfita; carbonato tricálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ).

## ABSTRACT

Microstrip antennas are increasingly being the subject of scientific studies due to the wide range of applications, model versatility, signal transmission range as well as small size possibilities. In this context, the constant search for dielectrics that meet the needs of these microwave devices for the implementation of small projects has boosted research in the area of ceramic materials, especially materials that have high availability in the region where the research is being conducted. In this context, ceramic materials from industrial process waste are very useful because they take advantage of what would be rejected or would have spent the energy and time to reenter the process. Based on this idea, this work aims to propose a type of ceramic substrate obtained from a waste material line of a cement industry. Tricalcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) and Silicon Dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) are collected in a limestone mine located in Quixeré / CE. The material goes through the pre-homogenization process and then through a grinding process to obtain the final blend. Thus, the design and performance analysis of this element as a substrate operating in the C band frequency region at 5.8 GHz will be addressed for future applications in signal transmission and/or reception devices.

**Keywords:** Substrate; Microstrip antennas; Tricalcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), Silicon Dioxide ( $\text{SiO}_2$ ).



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro eletromagnético .....	21
Figura 2:Antena filamental: (a) vista frontal, (b) vista superior.....	22
Figura 3:Antena Dipolo e seu campo irradiado.....	23
Figura 4: Exemplo de antena corneta .....	24
Figura 5:Padrão de radiação de uma antena corneta de seção piramidal: (a) plano E, (b) plano H. ....	24
Figura 6:Exemplo de antena patch de microfita.....	25
Figura 7:Exemplos de geometrias de Antena patch de microfita.....	26
Figura 8:Antena refletora.....	27
Figura 9:Antena de lente.....	27
Figura 10 - Arranjo Yagi-Uda .....	28
Figura 11:diagrama de radiação tridimensional de uma antena diretiva.....	29
Figura 12:Gráfico de diretividade de uma antena .....	30
Figura 13:Gráfico demonstrando as frequências de ressonância, inferior e superior de uma antena e sua respectiva largura de banda.....	31
Figura 14:Modelo de quadripolo .....	32
Figura 15:Gráfico da carta de Smith, demonstrando as partes real (resistência constante), e imaginárias (indutância e capacitância constantes).....	34
Figura 16: Representação para um dipolo .....	35
Figura 17:Antena patch de microfita .....	38
Figura 18:Antena de microfita com alimentação por linha de alta impedância.....	38
Figura 19:Antena de microfita com alimentação por cabo coaxial.....	39
Figura 20:Antena de microfita com alimentação por abertura.....	40
Figura 21:Antena de microfita com alimentação por proximidade.....	40
Figura 22:Antena de microfita com suas respectivas linhas de campo.....	41
Figura 23:Cavidade ressonante.....	43
Figura 24:Mercado de cimento no Brasil .....	45
Figura 25:Mina de calcário.....	46
Figura 26:Pátio de pré-homogeneização .....	47
Figura 27:Britador .....	47
Figura 28:Detalhe de torre de pré-aquecimento e forno de clínquer.....	48

Figura 29:Clínquer Portland .....	49
Figura 30: ConFiguração de cátions e ânions em uma cerâmica cristalina.....	52
Figura 31: Exemplo de arranjo de íons de silício e oxigênio .....	52
Figura 32: Vidrado cerâmico.....	53
Figura 33:Banda de energia para o MgO.....	58
Figura 34: Grãos de SiO <sub>2</sub> .....	59
Figura 35: Cristobalita .....	59
Figura 36: Aragonita (CaCO <sub>3</sub> ).....	60
Figura 37: Fluxograma do processo metodológico utilizado .....	61
Figura 38: Reagente para fusão da amostra.....	62
Figura 39: Realização de pesagem da amostra.....	63
Figura 40: Introdução do material no cadinho para fundição.....	64
Figura 41: Início do processo de fundição .....	64
Figura 42: Aquecimento dos moldes das amostras .....	65
Figura 43: Retirada da amostra.....	65
Figura 44: Amostra pós resfriamento .....	66
Figura 45: Amostra.....	66
Figura 46: Difratomia de Raio X.....	67
Figura 47: Difrátômetro de Raio-X .....	68
Figura 48:Medição de permissividade dos materiais propostos.....	69
Figura 49: Parte real da permissividade elétrica das amostras .....	70
Figura 50: Parte imaginária da permissividade elétrica das amostras.....	71
Figura 51: Tangente de perdas das amostras .....	72
Figura 52: Dimensões da antena.....	73
Figura 53: Fresa CNC modelo PCB 2020 .....	74
Figura 54: Conector SMA reto PCI.....	75
Figura 55: Difratomia de raios x da amostra 1 .....	76
Figura 56: Parte real da permissividade elétrica da amostra 1 .....	77
Figura 57: Parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 1 .....	77
Figura 58: Tangente de perdas da amostra 1 .....	78
Figura 59:Detalhe construtivo da antena 1 .....	78
Figura 60:Medição da Antena 1 .....	79
Figura 61: Resultados de perda de retorno e largura de banda simulados da antena 1 .....	79

Figura 62: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos da antena 1 .....	80
Figura 63: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos versus simulados da antena 1 .....	80
Figura 64: Carta de Smith da antena 1 .....	81
Figura 65: Diagrama de radiação 2D, Plano E (a) e Plano H (b), da antena 1 .....	81
Figura 66: Diagrama de radiação 3D da antena 1 .....	82
Figura 67: Densidade de corrente simulada da antena 1 .....	82
Figura 68: Difractometria de raios x da amostra 2 .....	83
Figura 69: Parte real da permissividade elétrica da amostra 2 .....	83
Figura 70: Parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 2 .....	84
Figura 71: Tangente de perdas da amostra 2 .....	84
Figura 72: Detalhe construtivo da antena 2 .....	85
Figura 73: Medição da antena 2 .....	85
Figura 74: Resultados de perda de retorno e largura de banda simulados da antena 2 .....	86
Figura 75: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos da antena 2 .....	86
Figura 76: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos versus simulados da antena 2 .....	87
Figura 77: Carta de Smith da antena 2 .....	88
Figura 78: Diagrama de radiação 2D, Plano E (a) e Plano H (b), da antena 2 .....	88
Figura 79: Diagrama de radiação 3D da Antena 2 .....	89
Figura 80: Densidade de corrente simulada da antena 2 .....	89
Figura 81: Difractometria de raios x da amostra 3 .....	90
Figura 82: Parte real da permissividade elétrica da amostra 3 .....	90
Figura 83: Parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 3 .....	91
Figura 84: Tangente de perdas da amostra 3 .....	91
Figura 85: Detalhe construtivo da antena 3 .....	92
Figura 86: Medição da antena 3 .....	92
Figura 87: Resultados de perda de retorno e largura de banda simulados da antena 3 .....	93
Figura 88: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos da antena 3 .....	93
Figura 89: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos versus simulados da antena 3 .....	94
Figura 90: Carta de Smith da antena 3 .....	94
Figura 91: Diagrama de radiação 2D, Plano E (a) e Plano H (b), da antena 3 .....	95

Figura 92: Diagrama de radiação 3D da antena 3 .....	95
Figura 93: Densidade de corrente simulada da antena 3 .....	96
Figura 94: Comparação de perda de retorno das antenas 1, 2 e 3 .....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Maiores produtores de cimento em 2017. ....	44
Tabela 2:Maiores produtores de cimento instalados na América do Sul .....	45
Tabela 3:Propriedades e aplicações das cerâmicas.....	55
Tabela 4:Condutividade das cerâmicas .....	56
Tabela 5: Materiais para a fabricação das amostras .....	62
Tabela 6:Tempo de resfriamento por amostra .....	67
Tabela 7: Valores de permissividade elétrica das amostras em 5,8GHz .....	70
Tabela 8: Permissividade elétrica das amostras .....	71
Tabela 9: Tangente de perdas das amostras.....	72
Tabela 10:Dimensões das antenas .....	73

## NOMENCLATURA

### *Letras latinas*

- BW – Largura de banda da antena;  
D – Diretividade;  
E – Campo elétrico;  
 $f_{inf}$  – Frequência inferior;  
 $f_r$  – Frequência de ressonância ou central;  
 $f_{sup}$  – Frequência superior;  
G – Ganho;  
H – Intensidade de campo magnético;  
h – Espessura do substrato;  
L – Comprimento do *patch*;  
 $L_0$  – Comprimento da linha de microfita;  
 $P_{in}$  – Potência total fornecida;  
 $R_L$  – Perda de retorno;  
 $S_{11}$  – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1 do quadripolo;  
 $S_{12}$  – Isolação do quadripolo;  
 $S_{21}$  – Ganho de tensão direta do quadripolo;  
 $S_{22}$  – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 2 do quadripolo;  
W – Largura do *patch*;

### *Letras gregas*

- $\Gamma$  – Coeficiente de reflexão;  
 $\epsilon$  – Permissividade elétrica complexa;  
 $\epsilon'$  – Constante dielétrica;  
 $\epsilon''$  – Fator de Perdas;  
 $\epsilon_0$  – Permissividade elétrica do vácuo;  
 $\epsilon_r$  – Permissividade elétrica relativa do material;  
 $\epsilon_{ref}$  – Constante dielétrica efetiva;  
 $\eta_{rad}$  – Eficiência de radiação;

$\eta_r$  – Eficiência de reflexão;  
 $\lambda$  – Comprimento de onda;  
 $\omega$  – Frequência angular;  
 $\tan\delta$  – tangente de perdas;  
 $\tau_f$  – coeficiente térmico na frequência de ressonância;

### *Siglas*

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semiárido;  
UWB – *Ultra Wide Band* (Banda Ultra Larga);

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>2 ANTENAS.....</b>	<b>21</b>
2.1 DEFINIÇÃO.....	21
2.2 TIPOS DE ANTENAS.....	22
<b>2.2.1 Antenas Filamentares.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2 Antenas De Abertura .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3 Antenas De Microfita .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.4 Antenas Parabólicas .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.5 Antenas de Lente .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.6 Arranjo de Antenas .....</b>	<b>28</b>
2.3 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS.....	28
<b>2.3.1 Diagrama De Radiação .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.2 Diretividade.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3 Ganho.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.4 Largura De Banda.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.5 Perda De Retorno .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.6 Carta De Smith .....</b>	<b>33</b>
<b>2.4 Propriedades Elétricas .....</b>	<b>35</b>
<b>2.4.1 Permissividade Elétrica.....</b>	<b>35</b>
<b>2.4.2 Tangente De Perdas.....</b>	<b>35</b>



<b>3 ANTENA DE MICROFITA.....</b>	<b>37</b>
3.1 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO .....	37
<b>3.1.1 Linha De Microfita .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.2 Cabo Coaxial.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.3 Acoplamento Por Abertura .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.4 Acoplamento Por Proximidade .....</b>	<b>40</b>
3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE .....	41
<b>3.2.1 Linha De Transmissão .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.2 Cavidade.....</b>	<b>42</b>
<b>4 INDÚSTRIA CIMENTEIRA .....</b>	<b>44</b>
4.1 INDÚSTRIA DO CIMENTO NO MUNDO.....	44
4.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	46
4.3 INSUMOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO.....	49
<b>5 MATERIAIS CERÂMICOS .....</b>	<b>51</b>
5.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS CERÂMICOS.....	51
<b>5.1.1 Estruturas Cristalinas .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1.2 Cerâmicas À Base De Silicato.....</b>	<b>52</b>
<b>5.1.3 Vidros.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1.4 Produtos À Base De Argila .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1.5 Refratários.....</b>	<b>53</b>
5.2 PROPRIEDADES .....	54
5.3 TIPOLOGIA E APLICAÇÕES.....	54
5.4 CERÂMICAS COMO CONDUTORES ELÉTRICOS .....	55
5.5 CERÂMICAS ISOLANTES .....	57
5.6 MATERIAIS CERÂMICOS DO TIPO $\text{SiO}_2$ E $\text{CaCO}_3$ .....	58
<b>6 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>

6.1 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	62
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARA O SUBSTRATO .....	67
<b>6.2.1 Caracterização Química .....</b>	<b>67</b>
<b>6.2.2 Caracterização Elétrica.....</b>	<b>69</b>
6.2.2.1 Permissividade Elétrica ( $\epsilon$ ).....	69
6.2.2.1.1 Parte Real.....	69
6.2.2.1.2 Parte Imaginária.....	71
6.2.2.1.3 Tangente De Perdas .....	72
6.3 PROJETO E SIMULAÇÕES .....	73
<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>76</b>
7.1 RESULTADOS SIMULADOS <i>VERSUS</i> RESULTADOS MEDIDOS .....	76
<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>98</b>
<b>9 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de telecomunicações sem fio (*wireless*) estão em crescente avanço tecnológico e cada vez mais há a busca por materiais que tornem o desempenho dos diversos dispositivos mais adequados para aplicações particulares e que possam atender a determinados requisitos de projeto. Em um grande número de aplicações (comunicação ponto a ponto, comunicação via satélite, radar), são necessárias antenas de alto ganho para sua capacidade de concentrar a energia na direção útil. Nas frequências de micro-ondas, existem várias tecnologias de antena de alto ganho, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Para aplicações de sistemas embarcados, a principal restrição está relacionada ao tamanho geral da antena, com o objetivo de minimizar o diâmetro e o comprimento ocupado pela antena, mantendo um bom desempenho no ganho, largura de banda, facilidade de fabricação e integração. (DIALLO, 2017).

Na organização deste trabalho, inicialmente, serão demonstrados os principais objetivos desta pesquisa e, em seguida, uma contextualização das propriedades do material utilizado, principalmente no cenário de novas aplicações para dispositivos de micro-ondas e a exploração deste tipo de material como um recurso abundante no Brasil. Seguindo sobre o *blend* de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  estudado, será mostrada a forma na qual será trabalhado o material nos experimentos realizados, onde estão detalhados os fenômenos de cristalização que ocorrem no processo de fabricação das amostras e as variáveis mais importantes a serem estudadas.

Além disso, para uma dada aplicação como substrato de antena de microfita e para melhor entendimento das caracterizações elétricas, serão mostradas as equações que regem o comportamento destes tipos de dispositivos, que é o foco da aplicação deste material.

Na parte experimental será descrita a forma na qual foi trabalhado o material a fim da obtenção de um composto padronizado para as amostras e detalhamento das etapas e métodos de caracterização. Em seguida serão demonstrados os principais resultados obtidos e a descrição das propriedades que tiveram mudanças no material devido à variação no tempo de cristalização que será aplicada em cada amostra. Por fim, são expostas perspectivas para trabalhos futuros e realização de experimentos que podem vir a facilitar a compreensão de todas as mudanças das propriedades estudadas deste tipo de material.

## 1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar e desenvolver antenas de microfita utilizando um *blend* cerâmico de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  como substrato, mostrando os procedimentos e materiais utilizados desde a caracterização até o projeto, confecção das amostras e testes das antenas. Desta forma serão seguidos os passos descritos abaixo:

- Fundir três amostras do *blend* de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  e aplicar tempo de cristalização diferente nas três amostras e caracterizá-las química e eletricamente;
- Confeccionar antenas de microfita e utilizar as amostras para validar a utilização deste tipo de material como substrato de antena de microfita.

## 1.2 Objetivos específicos

Seguindo mais especificamente à técnica de elaboração deste trabalho, serão seguidos os passos abaixo de modo a garantir padronização na fabricação das amostras do material:

- Fabricar as três amostras e aplicar tempo de cristalização de 0 min., 120 min. e 240 min;
- Fazer DRX das amostras e caracterizá-las quimicamente;
- Fazer medição de permissividade elétrica das amostras com analisador vetorial de redes (VNA), e caracterizá-las eletricamente;
- Confeccionar os *patches* de cada antena e medir sua performance de transmissão/recepção de sinais com o analisador vetorial de redes (VNA);
- Comparar a performance das três antenas e expor quais diferenças químicas e estruturais foram benéficas ou não.

## 2 ANTENAS

### 2.1 Definição

Antenas são dispositivos que transformam energia elétrica em energia eletromagnética e vice-versa. Isto possibilita que um sinal seja transmitido em um meio não metálico, como o espaço livre (YARMAN, 2008). A intensidade e direção destes campos eletromagnéticos e principalmente a maneira como interagem entre si, vai depender basicamente de quatro fatores: da forma de variação com o tempo das cargas elétricas (excitação); da forma da variação das cargas elétricas no espaço, que depende da geometria da antena; do material de que é constituída a antena e do meio físico no qual a antena está inserida. (CARNEIRO FILHO, 2010).

Sabe-se que antenas podem operar nas mais variadas faixas de frequência, desde sinais na faixa de kHz até altos valores de GHz (faixa de micro-ondas mostrada na Figura 1), por exemplo. Para o último caso, as antenas de microfita estão ocupando papel principal devido a sua alta performance aliada ao tamanho reduzido. Na Figura 1 é demonstrado o espectro eletromagnético com seus respectivos comprimentos de onda  $\lambda$  (m) e frequências  $f$  (Hz).

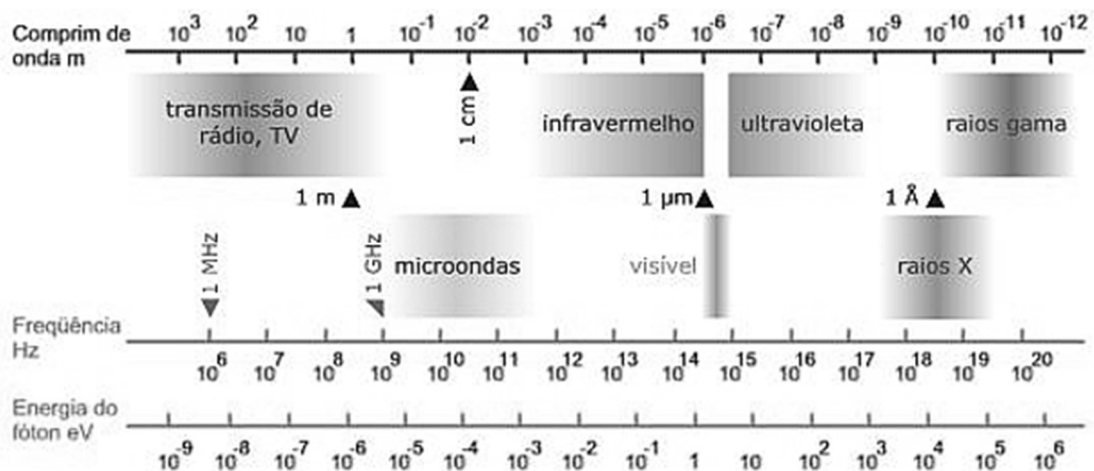


Figura 1: Espectro eletromagnético

Fonte: MSPC Engenharia

Nos modelos de engenharia utilizados para o estudo das antenas, estas são vistas com impedâncias (cargas) e podem ser utilizadas tanto para emissão como para recepção de ondas

eletromagnéticas (SOUZA, 2015). Existe uma grande variedade de tipos de antenas e cada tipo tem suas características e parâmetros peculiares bem como frequência de operação ótima. No presente estudo, as frequências estudadas estão dentro da faixa de frequência de micro-ondas, mais especificamente na banda C.

## 2.2 Tipos de Antenas

Antenas são dispositivos que transformam energia elétrica conduzida por um fio (linha de transmissão) em energia eletromagnética irradiada. Os primeiros equipamentos datam de 1886 e até hoje têm papel principal quando se fala de transmissão de sinais em longas distâncias. A seguir são demonstrados os principais tipos de antenas e suas características físicas e de trabalho.

### 2.2.1 Antenas filamentosares

Antenas de fio ou filamentosares são os modelos mais antigos que se tem histórico devido a sua facilidade de construção aliado ao baixo custo. São os mais simples e mais facilmente reconhecidos pois são vistos em muitos equipamentos do cotidiano como automóveis, barcos, prédios, etc. Porém podem ter as mais diversas formas e aplicações, a Figura 2 mostra uma antena filamentar utilizada para transmissão de sinais em banda ultra larga (*ultrawideband*).

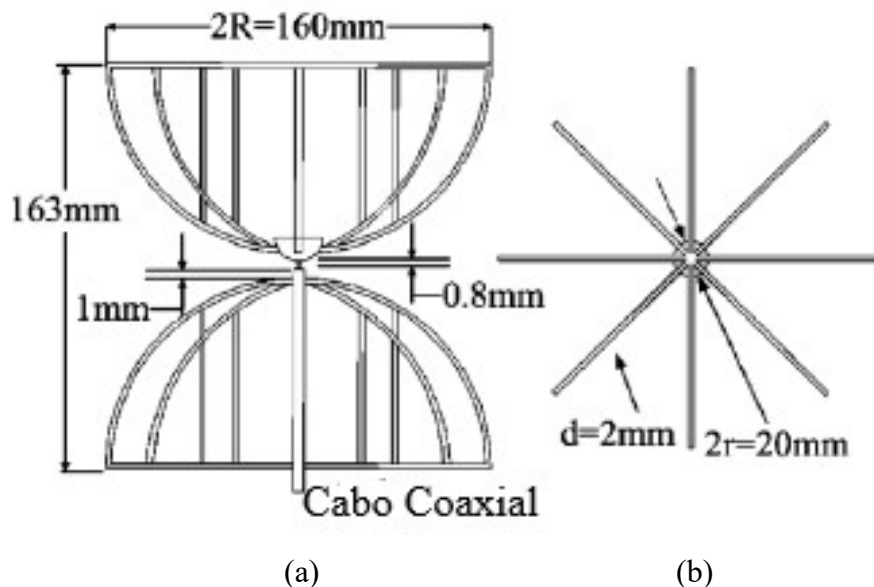


Figura 2:Antena filamentar: (a) vista frontal, (b) vista superior

Fonte: YANG, 2012.

A antena da Figura 2 consiste em uma estrutura dipolo, onde cada polo é formado por quatro fios fechados de forma semicircular. Existem vários modelos possíveis de antenas de fio, cada um adaptado ao seu sistema de alimentação e local de trabalho (YANG, 2012). Na Figura 3, é mostrada, como exemplo, uma antena dipolo linear e seu respectivo campo irradiado.

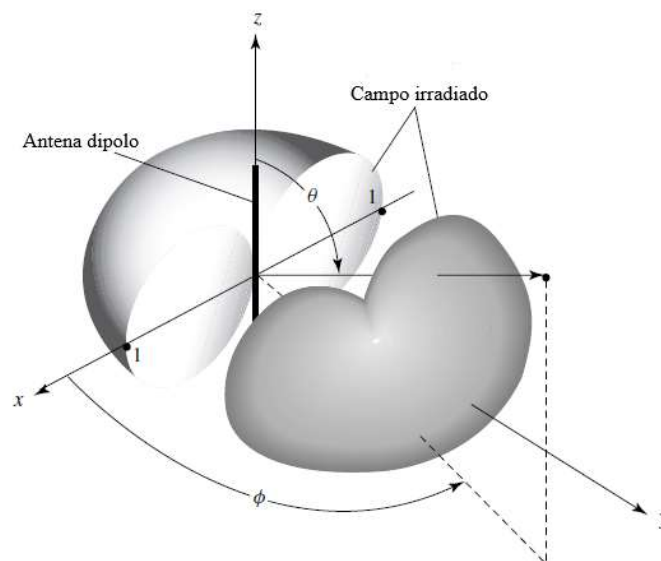


Figura 3: Antena Dipolo e seu campo irradiado  
Fonte: BALANIS, 2005.

### 2.2.2 Antenas de abertura

Antena de abertura ou corneta, ou ainda corneta eletromagnética, são guias de onda cuja extremidade é aberta. Como características têm-se a reflexão da onda transmitida devido à mudança nos meios de propagação e ganho bem definido em função da frequência. Na Figura 4, vemos um exemplo deste tipo de antena e seus respectivos detalhes geométricos. Este tipo de antena tem também boa resistência mecânica, o que ajuda na montagem sob estrutura física de aeronaves ou satélites (JOHNSON, 1993).

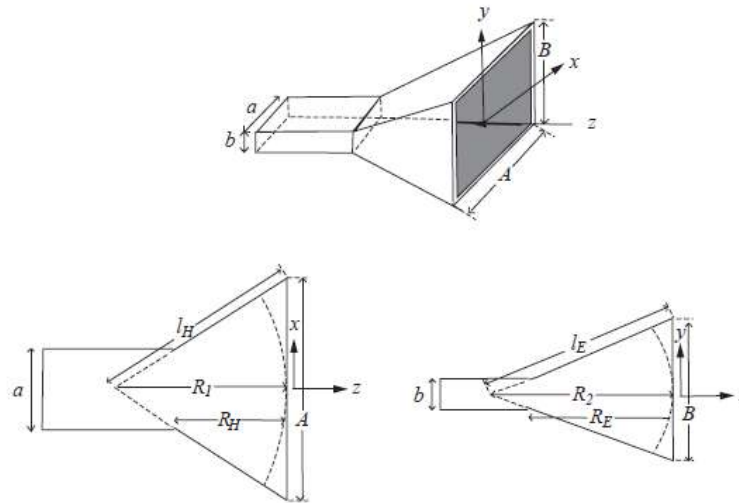


Figura 4: Exemplo de antena corneta  
 Fonte: Instituto Nacional de Telecomunicações

As características de radiação deste tipo de antena com dimensões de abertura superiores a cerca de uma onda podem ser calculadas com razoável precisão usando o princípio de *Huygens*, tendo-se o campo de abertura conhecido na boca da antena. A Figura abaixo mostra um exemplo de campo irradiado de uma antena tipo corneta de seção piramidal.

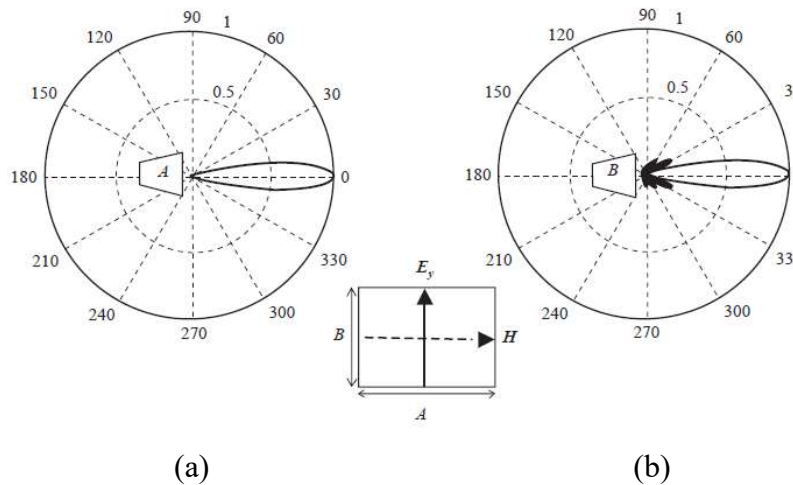


Figura 5: Padrão de radiação de uma antena corneta de seção piramidal: (a) plano E, (b) plano H.

Fonte: Adaptado de Huang & Boyle, 2008.

### 2.2.3 Antenas de microfita

Em aeronaves de alto desempenho, espaçonaves, satélites e mísseis, onde o tamanho, peso, custo, desempenho, facilidade de instalação e perfil aerodinâmico são itens restritivos, as



antenas de microfita têm papel principal pois atendem a todos estes requisitos. Estas antenas são discretas, compatíveis com superfícies planas e não planas, simples e barato de fabricar utilizando tecnologia de circuito impresso. São dispositivos muito versáteis em termos de frequência de ressonância, polarização e impedância. (BALANIS, 2005).

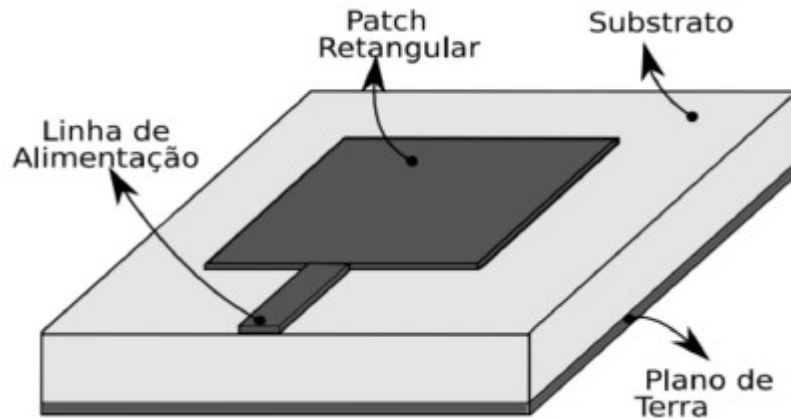


Figura 6:Exemplo de antena patch de microfita  
Fonte: AQUINO, 2005.

De acordo com Carneiro Filho (2010), diferentes geometrias e características dos substratos usados nas antenas (permissividade elétrica; permeabilidade magnética), como também a condutividade elétrica dos metais usados na confecção dos condutores, podem modificar o desempenho da antena. O patch e o plano de terra podem apresentar diversas geometrias, dependendo da aplicação que se deseja fazer. As formas mais usadas para o patch são as retangulares, circulares, triangulares, afiladas, em forma de letras, anéis, sendo recentemente também usadas formas fractais. A Figura 7 a seguir, mostra alguns destes modelos de *patch* utilizados.

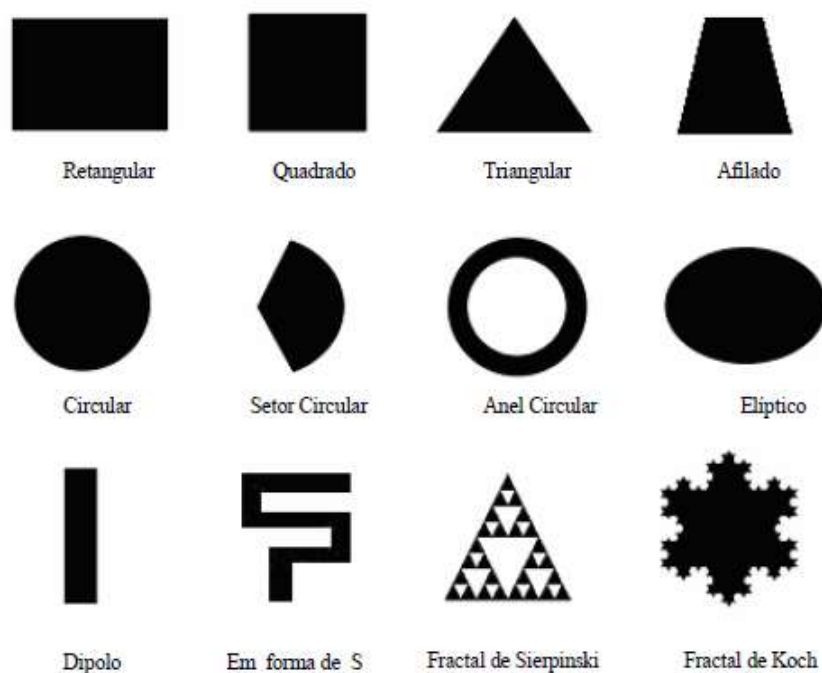


Figura 7:Exemplos de geometrias de Antena *pacth* de microfita  
 Fonte: CARNEIRO FILHO, 2010.

O modelo a ser escolhido é norteado pela futura aplicação da antena – dispositivo ou máquina onde será montada a antena, condições operacionais e ambientais, etc. – sendo que, o projeto visa o ponto ótimo entre dimensões, performance e custos de fabricação.

#### 2.2.4 Antenas parabólicas

Antenas parabólicas ou antenas com refletor são resumidas por Johnson (1993) como dispositivos que se utilizam de elementos de reflexão para melhorar as condições de recepção do sinal, ganho e diretividade por exemplo. Os elementos de reflexão podem ser dos mais diversos tipos, porém os mais comuns são parábolas como é visto na Figura a seguir.



Figura 8:Antena refletora  
Fonte: NAGASAKA 2016.

Este tipo de projeto é utilizado em aplicações em que o controle do padrão de radiação é essencial, como em sistemas terrestres via satélite, e tem eficiências de 65 a 80% (BALANIS 2009).

### 2.2.5 Antenas de lente

Antenas refletoras parabólicas são tipicamente uma referência em termos de eficiência de abertura, mas para diâmetros pequenos, geralmente menores que  $20\lambda$ , sofrem de bloqueio de abertura (MOLDSVOR, 1992). Segundo PETOSA 2004, para frequências acima de 30 GHz, as antenas de lentes são uma boa alternativa aos refletores parabólicos porque não sofrem com o bloqueio da abertura e têm boas tolerâncias de fabricação. Porém, associar uma distância focal curta a um diâmetro grande resulta em aumento da espessura e do peso da lente. É possível observar na Figura 9 um exemplo de antena de lente plana.

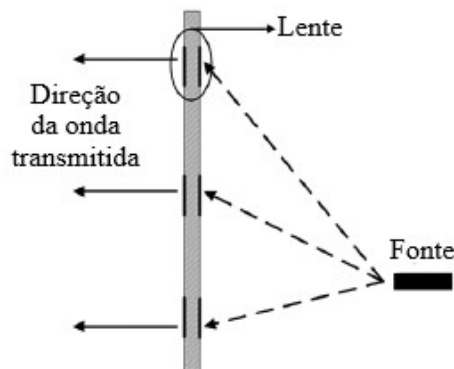


Figura 9:Antena de lente  
Fonte: CHEN 2013.

## 2.2.6 Arranjo de antenas

Muitas aplicações requerem características de radiação que podem não ser alcançáveis por um elemento único. Pode, no entanto, ser possível que um agregado de elementos radiantes em um arranjo elétrico e geométrico resultará nas características de radiação desejadas. A disposição do arranjo pode ser tal que a radiação a partir dos elementos se soma para fornecer uma radiação máxima em um determinado direcionador direções, mínimo em outras ou de outra forma, conforme desejado. Um exemplo típico de arranjo de uma antena filamentar é mostrado na Figura 10 (BALANIS, 2005).

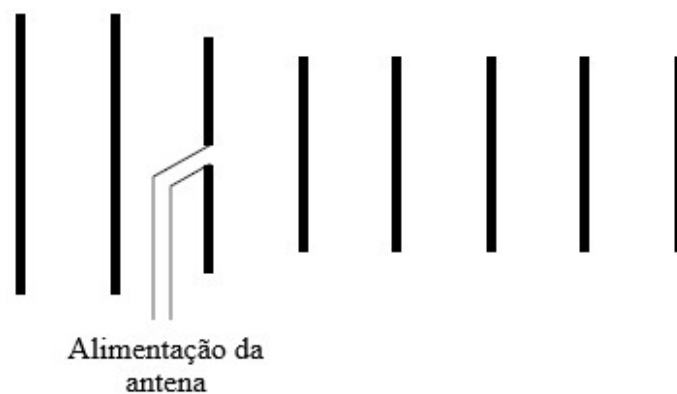


Figura 10: Arranjo Yagi-Uda  
Fonte: BALANIS 2005.

Normalmente, o termo arranjo é reservado para um conjunto de antenas em quais os elementos radiantes individuais são separados, no entanto, o mesmo termo também é usado para descrever um conjunto de elementos em uma mesma estrutura.

## 2.3 Parâmetros Fundamentais de Antenas

Nesta seção serão abordados os principais parâmetros propriedades fundamentais das antenas, como também equações essenciais para o efetivo estudo de seu desempenho e aplicabilidade tomando como referência Carneiro Filho (2010, p. 16-21), que mostra a abordagem sobre esses parâmetros: parâmetros de espalhamento, impedância, coeficiente de onda estacionária e perda de retorno, frequência de ressonância e largura de banda, fatores de qualidade e tangente de perdas. Porém é possível notar que, o parâmetro utilizado para aferir se

um dispositivo funciona ou não como antena é a perda de retorno, que por sua vez varia com a frequência.

### 2.3.1 Diagrama de radiação

O Diagrama de radiação é uma função matemática que descreve as propriedades espaciais de radiação da antena. Estas propriedades incluem densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, intensidade de campo, diretividade e polarização. (MOURA, 2009). Esse gráfico é a representação dos valores dos campos distantes em relação a região em torno da antena (POZAR, 2012). A Figura 11 mostra um diagrama de radiação tridimensional, onde são vistos com precisão o lóbulo principal que mostra a direção de máxima radiação de potência.

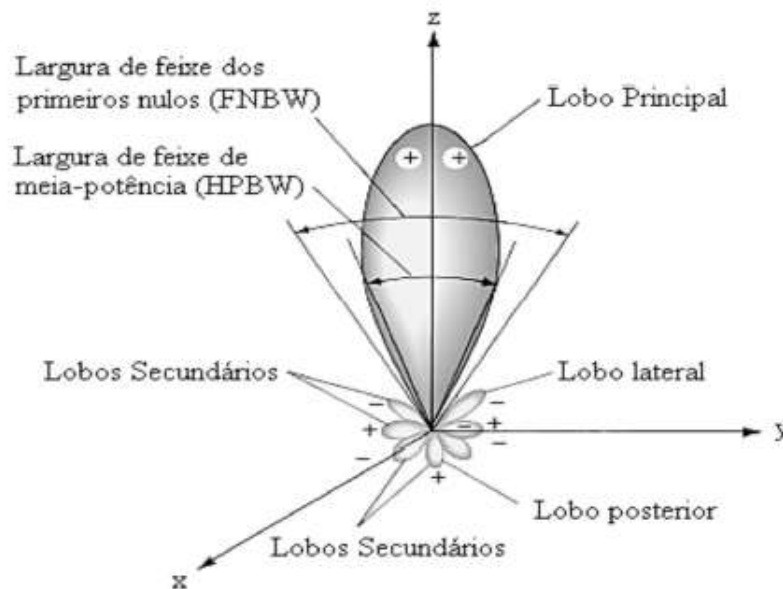


Figura 11:diagrama de radiação tridimensional de uma antena diretiva  
Fonte: BRITO, 2018.

Por padrão é utilizado um sistema esférico de coordenadas com a antena posicionada na origem com o diagrama em função do raio ( $r$ ), ângulo ( $\theta$ ) e fluxo ( $\phi$ ).

### 2.3.2 Diretividade

A diretividade é a razão entre a intensidade de uma antena numa determinada direção e a intensidade de radiação média em todas as direções (BALANIS, 2005), com base nisso o conceito de diretividade traz a ideia de ganho diretivo máximo, ou seja, a razão entre a intensidade de radiação máxima e a intensidade de radiação média. De acordo com BALANIS (2009), a diretividade pode ser descrita pela equação a seguir:

$$D = \frac{U_{MÁX}}{U_{MÉD}} = \frac{4\pi U_{MÁX}}{P_{rad}} \quad (1)$$

Onde,

D é a diretividade (adimensional);

U é a intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido);

$P_{rad}$  é a potência total radiada (W);

A Figura 12 mostra um gráfico de diretividade de um sinal irradiado em 360°.

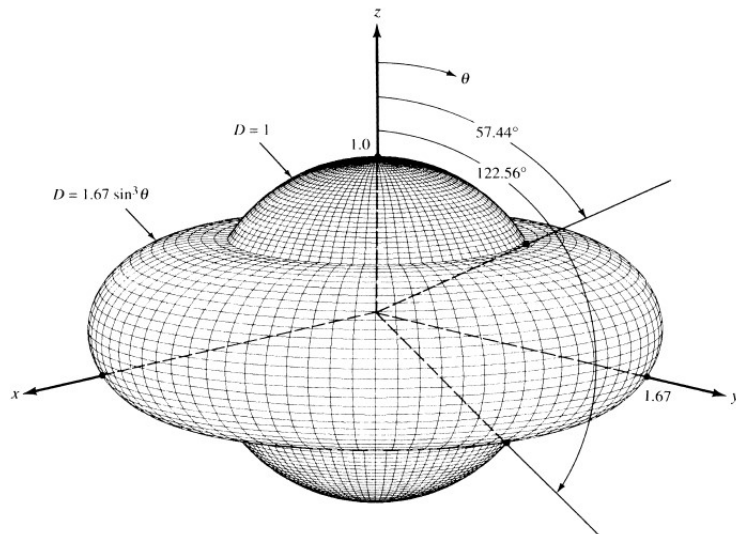


Figura 12: Gráfico de diretividade de uma antena  
Fonte: BALANIS, 2005.

### 2.3.3 Ganho

É definido como sendo a relação entre a intensidade de radiação numa determinada direção em relação e a potência se a antena tivesse radiação isotrópica. (BALANIS, 2009).

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} \quad (2)$$

Onde,

$G$  é o ganho da antena;

$U$  é a intensidade de radiação;

$P_{in}$  é a potência total fornecida pela fonte;

### 2.3.4 Largura de banda

Define-se Largura de banda (LB) de uma antena como a gama de frequências dentro da qual a perda de retorno é inferior a -10dB, logo, são as frequências em torno da frequência central (frequência de ressonância da antena). São mensuradas a -10dB (valor no qual o dispositivo começa a se comportar como antena) e delimitam, assim, a faixa de frequência de trabalho do dispositivo analisado (BALANIS, 2009).

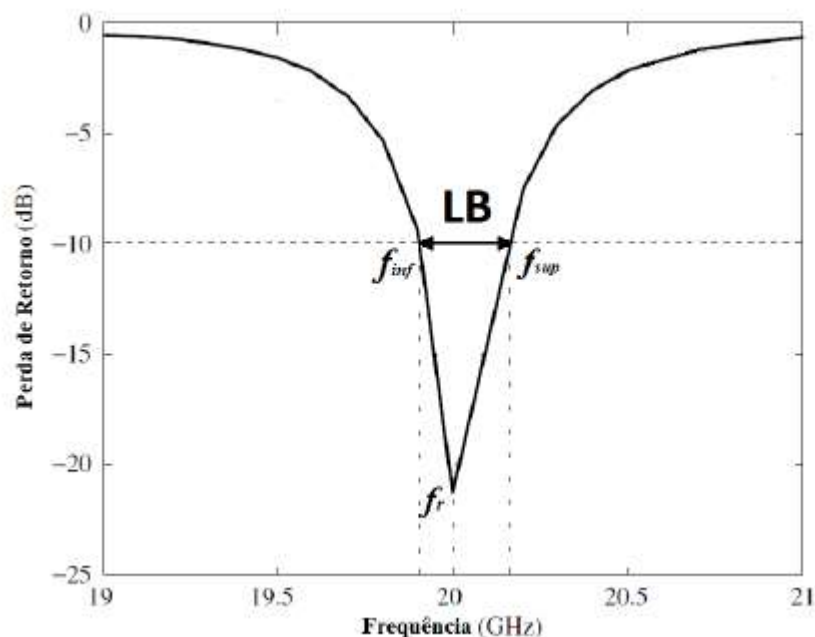


Figura 13: Gráfico demonstrando as frequências de ressonância  $f_r$ , inferior  $f_{inf}$  e superior  $f_{sup}$  de uma antena e sua respectiva largura de banda  
Fonte: BALANIS, 2005.

### 2.3.5 Perda de retorno

De acordo com POZAR (2012) a perda de retorno pode ser definida como a relação entre a potência transmitida e a potência refletida por um determinado dispositivo de transmissão de sinais, cujo valor pode ser obtido pela expressão abaixo:

$$RL = -20\log|\Gamma| \quad (3)$$

Onde,

$RL$  é o termo em inglês *Return Loss* ou perda de retorno;

$\Gamma$  é o coeficiente de reflexão da onda na entrada da antena;

Uma modelagem dos circuitos de micro-ondas (em especial as antenas) que torna o entendimento da perda de retorno mais didático é o conceito exposto por POZAR (2012) em que se caracteriza estes circuitos como redes de duas portas – uma a entrada e outra o sinal irradiado. A seguir é visto de forma didática o modelo de antena representado por duas portas (quadripolo).

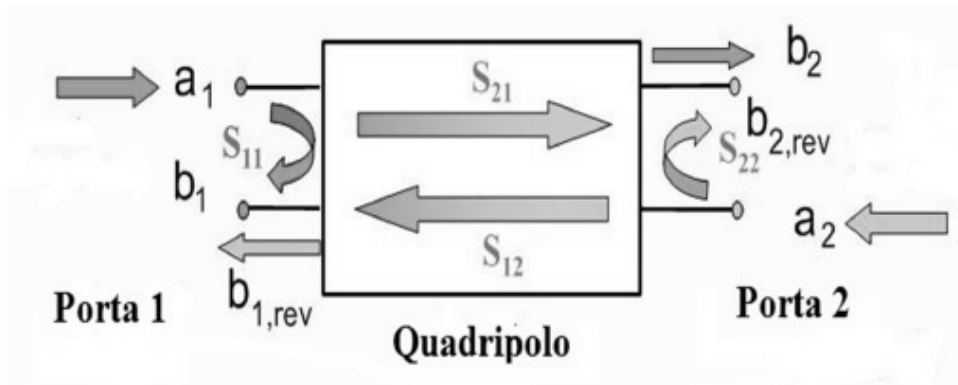


Figura 14: Modelo de quadripolo  
Fonte: BRITO, 2018.

O modelo acima exibe as ondas de tensões complexas normalizadas incidentes ( $a_1$  e  $a_2$ ) e refletidas ( $b_1$  e  $b_2$ ), juntamente com as impedâncias da geração e da carga são apresentadas. O cálculo destas variáveis é descrito pelas equações a seguir, (ANDERSON, 1967):

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{z_0}} \quad (4)$$



$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{z_0}} \quad (5)$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{z_0}} \quad (6)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{z_0}} \quad (7)$$

Onde,

$Z_0$  é a impedância de referência;

### 2.3.6 Carta de Smith

A carta de Smith foi inventada por Phillip H. Smith (1905-1987) e de acordo com SADIKU, 2004 trata-se de uma representação gráfica da variação de impedância de uma linha de transmissão mediante nos movemos ao longo dela. Além disto, a análise e o estudo da carta de Smith fornecem parâmetros essenciais de projeto, como: impedância da linha de transmissão, coeficiente de reflexão e impedância normalizada equivalente (POZAR, 2012). Chan e Harter (2000) demonstram que a representação das impedâncias deve ser feita através dos coeficientes de reflexão pois é mais adequada para estabelecer uma reprodução gráfica entre o coeficiente de reflexão e a impedância da carga devido ao fato de que a carta de Smith é plotada a partir da análise da carga no ponto em que a impedância é casada.

De acordo com POZAR, 2012 o cálculo da impedância normalizada é feito pela equação a baixo:

$$\frac{Z_L}{Z_0} = z_L = r + jx \quad (8)$$

Onde,

$Z_L$  é a impedância da carga;

$z_L$  é a impedância normalizada;

$r$  é a resistência normalizada da carga;

$x$  é a reatância normalizada da carga;

Sabendo-se que:

$$\Gamma = \frac{Z_E - Z_0}{Z_E + Z_0} \quad (9)$$

Temos:

$$\Gamma_L = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{r + jx - 1}{r + jx + 1} \quad (10)$$

Reescrevendo a equação acima, obtemos as relações da resistência e reatância da carga em função do coeficiente de reflexão:

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{1+r}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2 \quad (11)$$

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left(\Gamma_i - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (12)$$

Com base nas duas equações acima é possível plotar o gráfico da carta de Smith para os diferentes valores de resistência e reatância, como é visto na Figura 14.

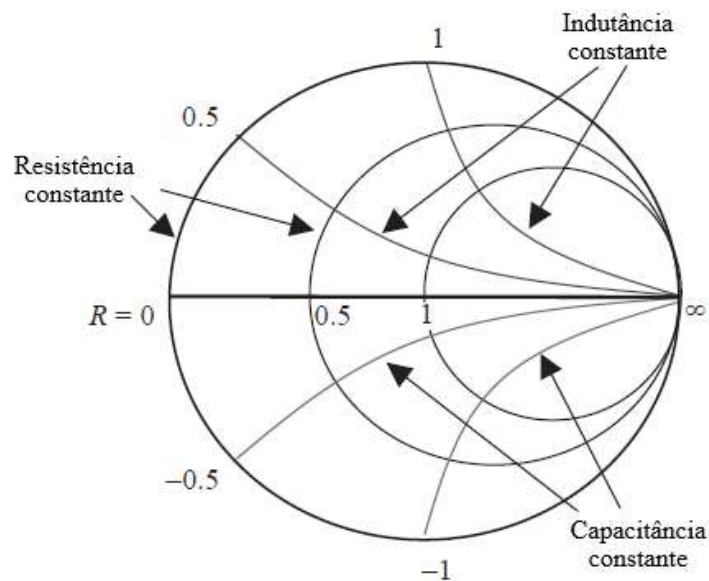


Figura 15: Gráfico da carta de Smith, demonstrando as partes real (resistência constante), e imaginárias (indutância e capacitância constantes)  
 Fonte: Adaptado de HUANG & BOYLE, 2008.

## 2.4 Propriedades Elétricas

### 2.4.1 Permissividade elétrica

A permissividade elétrica trata da orientação dos dipolos elétricos de um determinado material mediante ação de um campo elétrico externo. Quando atua, o campo externo reorienta os dipolos de forma a que fiquem alinhados ao campo atuante. O efeito de tal rearranjo é denominado permissividade elétrica ( $\epsilon$ ). A Figura 16 mostra um dipolo qualquer sob influência de um campo elétrico externo ( $E$ ) e seu posterior rearranjo (SOUZA, 2015).

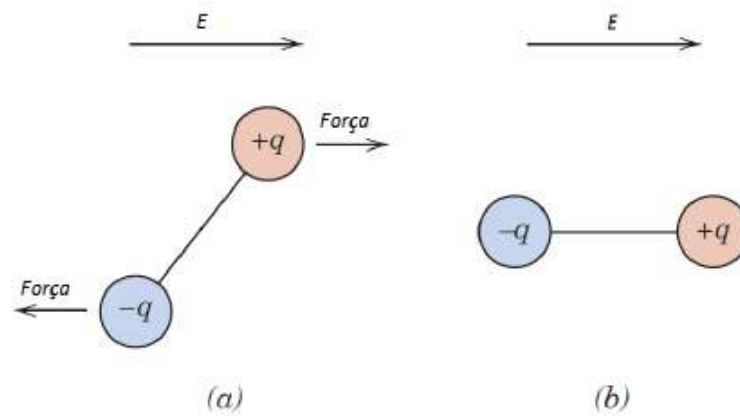


Figura 16: Representação para um dipolo  
Fonte: SOUZA, 2015.

Como a presença de cargas elétricas varia de material para material, os valores da permissividade dependem da natureza de cada um.

### 2.4.2 Tangente de perdas

Quando o objetivo é o trabalho na região de micro-ondas, são três as propriedades específicas a serem consideradas na escolha de um material dielétrico a ser usado em micro-ondas (BERNAL, 2010): a constante dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) do material, a tangente de perdas ( $\tan\delta$ ), e o coeficiente térmico na frequência de ressonância ( $\tau_f$ ). No tocante a tangente de perdas SOUZA, 2015 coloca que quando uma tensão alternada é aplicada em um capacitor, a corrente alternada induzida para um meio sem perdas está adiantada de  $90^\circ$  da tensão. Ao se

introduzir um meio material entre as cargas de sinais opostos do capacitor, ocorre uma perda de energia associada ao realinhamento dos dipolos presentes no material entre as cargas. Isso faz com que o ângulo entre a corrente induzida e a tensão aplicada seja menor que  $90^\circ$  de  $\delta$ . A tangente de perdas é definida como o valor da tangente desse ângulo  $\delta$ . Ela pode ser relacionada com a condutividade dum material através da seguinte relação:

$$\tan(\delta) = \frac{\omega\varepsilon'' + \sigma}{\omega\varepsilon'} \quad (13)$$

Onde,

$\sigma$  é a condutividade elétrica do meio estudado;

$\varepsilon'$  é parte real da permissividade;

$\varepsilon''$  é a parte imaginária da permissividade;

### 3 ANTENA DE MICROFITA

O conceito de antena de microfita remonta dos anos de 1953 nos EUA por Deschamps e na França por Gutton e Baissinot. Deschamps, entretanto, propôs um novo modelo no desenvolvimento de elementos ressonantes, pois, sugeriu a construção de antenas de baixo peso e baixo custo através do uso de linhas de transmissão construídas em microfita (CARVER; MINK, 1981).

Nos anos de 1974 e 1978 Munson e Kerr comprovam a ideia de Deschamps e introduzem novas técnicas de para projeto das antenas de microfita. Com isso a demanda por bens e serviços na área da eletrônica e das telecomunicações muda com os contínuos requisitos por sistemas de baixo custo e melhor desempenho. Um dos exemplos mais claros é a tecnologia móvel, que tem experimentado uma expansão explosiva nas últimas décadas. Porém, além das exigências técnicas, têm aparecido também requisitos de portabilidade que obrigam que os aparelhos sejam de tamanho e peso reduzidos. Isto faz com que antenas de microfita estejam cada vez mais presentes nos objetos de estudo e pesquisa em todo o mundo. Sabe-se que estas antenas têm ocupado lugar de destaque em se tratando de operações em frequências de na faixa de micro-ondas, mas a procura por novos materiais e o estudo mais aprofundado dos já existentes estão sempre presentes. Neste contexto, o uso de materiais cerâmicos em sistemas elétricos e eletrônicos vem sendo cada vez mais frequente, dado que constantemente proporcionam soluções viáveis para muitos dos problemas que precisam ser resolvidos (BERNAL, 2010).

#### 3.1 Métodos de Alimentação

Antenas de microfita, em geral, podem ter os mais variados tipos de alimentação, porém dividem-se em dois grandes grupos: acoplados e não acoplados (acoplamento eletromagnético). Os conectados possuem uma fonte de RF e é ligada ao *patch* usando linhas de alta impedância ou conector coaxial, enquanto os não conectados, a ligação é feita por acoplamento eletromagnético (BRITO, 2018).

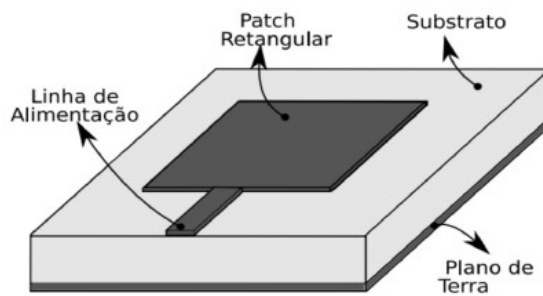


Figura 17: Antena *patch* de microfita  
 Fonte: AQUINO, 2008.

A seleção do método de alimentação depende de vários fatores, porém o construtivo e o casamento de impedância são os mais importantes pois dependendo do tamanho da antena alguns métodos podem se tornar ineficazes ou de custo muito alto, inviabilizando o projeto – antenas de microfita que operam em frequências muito elevadas têm tamanhos muito pequenos.

### 3.1.1 Linha de microfita

A linha de microfita, ou linha de alta impedância, consiste em uma fita condutora impressa sobre o plano do substrato, conectando o *patch* a extremidade da antena, dessa forma a estrutura se mantém totalmente plana. Esse arranjo torna este tipo de antena adequada para aplicação de circuitos integrados de micro-ondas e em locais onde o volume seja item importante de projeto.

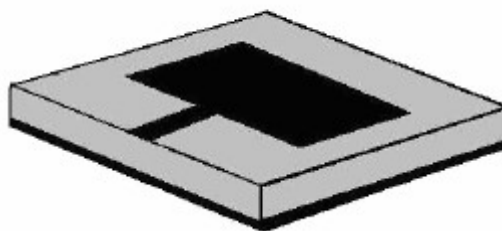


Figura 18: Antena de microfita com alimentação por linha de alta impedância  
 Fonte: Adaptado de CARNEIRO FILHO, 2010.

Segundo KUMAR, 2003 quando o projeto deste tipo de dispositivo contempla substratos de espessuras maiores, ocorre aumento da largura de banda bem como radiações

indesejadas. Não obstante, o casamento de impedância é facilitado pelo ajuste da linha alimentadora.

### 3.1.2 Cabo coaxial

Neste tipo de alimentação o conector é montado de forma transpassante no plano de terra e no substrato ligando-se diretamente ao *patch*. Uma vantagem deste tipo de alimentação é o fácil casamento de impedância pela manipulação do local de conexão do cabo, possui largura de banda estreita e as montagens sobre substratos espessos inviabiliza o projeto devido a difícil modelagem e presença de radiação indesejada (PEREIRA, 2018).

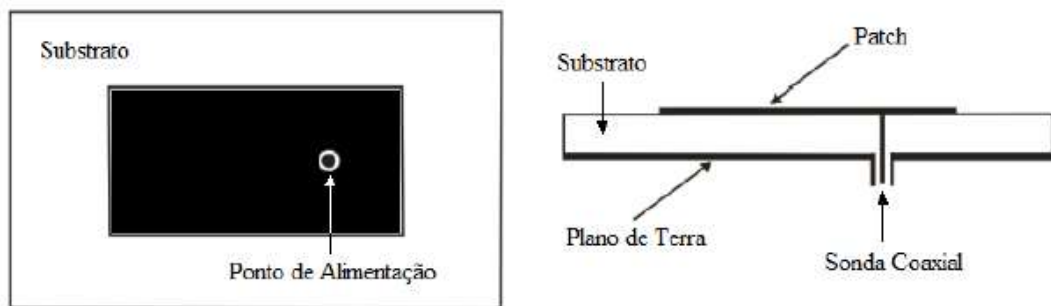


Figura 19: Antena de microfita com alimentação por cabo coaxial  
Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2018.

### 3.1.3 Acoplamento por abertura

Diferente dos outros dois métodos vistos anteriormente, a alimentação por acoplamento não usa conexão direta. Segundo BALANIS, 2005, este tipo de projeto apresenta largura de banda estreita e a fabricação dificultada. No acoplamento por abertura, dois substratos são separados por um plano de terra e uma linha de microfita abaixo do substrato inferior transfere a energia ao patch através de uma fenda no plano de terra. O casamento de impedância é feito baseado no projeto da largura de banda e das dimensões da fenda no plano de terra. Na Figura 19 vemos um exemplo de antena de microfita e sua respectiva alimentação, com detalhe para a abertura do plano de terra.

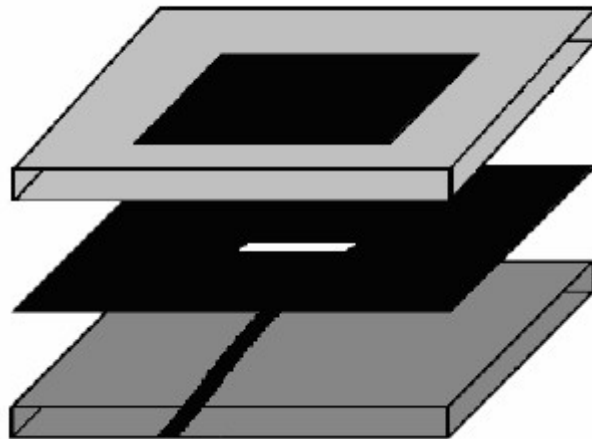


Figura 20: Antena de microfita com alimentação por abertura  
Fonte: Adaptado de CARNEIRO FILHO, 2010.

O fato de o plano de terra estar entre os dois substratos minimiza a radiação indesejada na alimentação devido a alimentação do *patch* estar isolada (SANTOS, 2016).

### 3.1.4 Acoplamento por proximidade

Difere do acoplamento por abertura pelo fato de não possuir uma fenda no plano de terra. Também utiliza dupla camada de substrato que deixa o dispositivo volumoso e que pode representar dificuldade de montagem dependendo do local de instalação. A baixo vemos uma antena com acoplamento por proximidade, com detalhe da linha de alimentação.

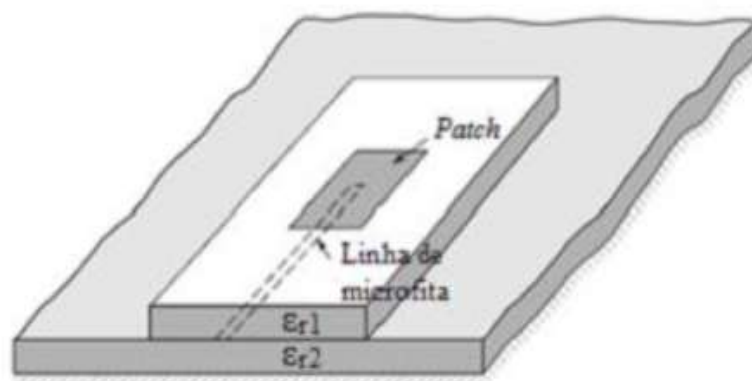


Figura 21: Antena de microfita com alimentação por proximidade  
Fonte: Adaptado de BRITO, 2018.



Este modelo tem seus pontos positivos na maior largura de banda e modelagem mais simples que os outros modelos, porém o alinhamento dos substratos deve ser perfeita e é um ponto de dificuldade do projeto (PEREIRA, 2018).

### 3.2 Métodos de Análise

#### 3.2.1 Linha de transmissão

Foi a primeira técnica empregada para análise de antenas de microfita, pois trata-se de um método mais fácil de ser trabalhado, porém menos preciso, tem boa percepção física, mas difícil de modelar o acoplamento. Modelo da Linha de Transmissão promove boa percepção física do procedimento e resultados satisfatórios. Outra característica positiva desse método é a facilidade de obter o casamento de impedância da estrutura, sendo mais recomendado para antenas que tenham o patch quadrado ou retangular. (BRITO, 2018)

Devido a estrutura física da antena um efeito de “franja”, onde as linhas de campo elétrico sobressaem a estrutura da antena fazendo com que esta pareça eletricamente maior, como é possível ver na Figura 22 a seguir:

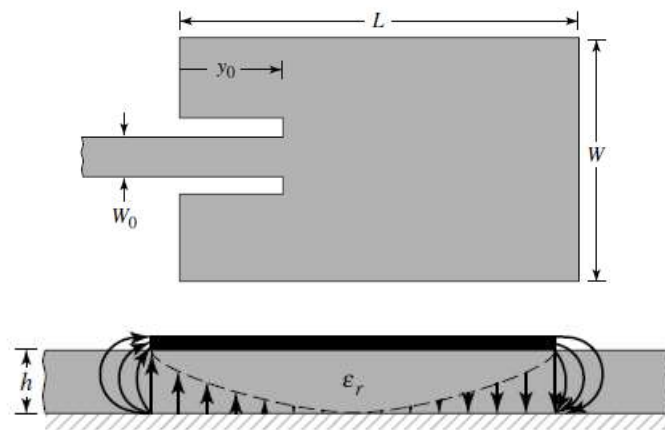


Figura 22: Antena de microfita com suas respectivas linhas de campo  
Fonte: Adaptado de BALANIS, 2005.

Devido a este comportamento, o projeto da antena aborda estas diferenças de tamanho e de meios de propagação – o efeito franja faz com que as ondas se propagam também no ar. Assim a constante dielétrica efetiva  $\epsilon_{\text{reff}}$ , para  $w/h > 1$ , é calculada da seguinte forma:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (14)$$

Como o comprimento do patch parece maior, tem-se que calcular essa variação de comprimento para, somente assim calcular suas dimensões efetivas. A variação é dada por:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left( \frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left( \frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (15)$$

Sendo que o comprimento físico é:

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (16)$$

A largura do patch é dada por:

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (17)$$

Onde,

$f_r$  é a frequência de ressonância adotada no projeto da antena.

### 3.2.2 Cavidade

No método da cavidade, a antena é vista como um cubo ou paralelepípedo, cujo o interior é modelado como uma cavidade cujas faces superior e inferior são tomadas como paredes elétricas (representando *patch* e o plano de terra) e laterais como paredes magnéticas (representando o substrato), conforme é visto na Figura 23.

Uma das premissas do método é a concepção do substrato de espessura muito pequena ( $h \ll \lambda_0$ ). Uma das consequências desta pequena espessura é o efeito “franja”, descrito anteriormente no método da linha de transmissão, ser bem menor. Outra consequência gerada por esta pequena espessura, seria a reflexão considerável que a onda sofre ao chegar na borda

do patch logo teríamos uma pequena fração de energia irradiada, levando a uma eficiência muito baixa (BALANIS, 2005).

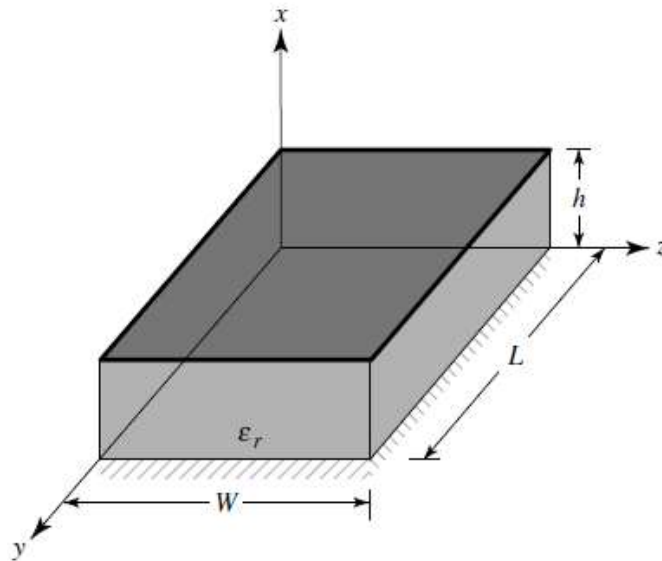


Figura 23: Cavidade ressonante  
Fonte: Adaptado de BALANIS, 2005.

De acordo com Godara, 2002, o modo dominante na estrutura é o que possui a frequência de ressonância mais baixa. Os modos de operação são determinados pela ordem crescente das frequências de ressonância. Para antenas de microfita  $h \ll L$  e  $h \ll W$ . Se  $L > W > h$ , o modo dominante é o  $TM_{10}$  e a frequência de ressonância mais baixa é dada por:

$$(f_r)_{10} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (18)$$

Onde,

C é a velocidade da luz;

L é o comprimento do *patch*;

Esta é uma modelagem que pode ser utilizada para diversos tipos de geometria regulares onde não se utiliza altas frequências e não seja necessária muita precisão.

## 4 INDÚSTRIA CIMENTEIRA

### 4.1 Indústria do cimento no mundo

Segundo *Global Cement Directory* 2018, em 2017 havia 159 países que produziram cimento, em instalações integradas de cimento (instalações com forno de clínquer) ou por clínquer importado. Dos 159, 141 produzem clínquer e 18 países moem apenas clínquer importado compartilhando uma capacidade total de cimento integrada de 2,49 bilhões de toneladas/ano, excluindo a China – para os quais os dados de capacidade não são confiáveis. Para comparação, os dados apresentados em dezembro de 2016 mostraram que havia um total de 158 países fabricando cimento e clínquer, com um total integrado e capacidade de moagem de cimento de 2,69 bilhões de toneladas/ano, excluindo a China (dados não confiáveis). (EDWARDS, 2017). Na Tabela 1 a seguir podemos ver os 10 maiores produtores de cimento no mundo e seus respectivos países.

Tabela 1: Maiores produtores de cimento em 2017.

Ranking	Produtor	Total		Integradas		Moagem	
		Capacidade (Mt/ano)	Número de plantas	Capacidade (Mt/ano)	Número de plantas	Capacidade (Mt/ano)	Número de plantas
1	LafargeHolcim (suíça)	345,2	220	287,3	149	57,9	71
2	Heidelberg Cement (Alemanha)	185,4	141	159,3	102	26,1	39
3	Cemex (México)	91,6	61	85	52	6,6	9
4	UltraTech Cement (Índia)	91,4	39	52,2	18	21,6	21
5	Votorantim (Brasil)	70,8	59	60,2	43	10,6	16
6	InterCement (Brasil)	53,5	42	42,8	28	10,7	14
7	CRH (Irlanda)	50,5	54	41,9	39	8,6	15
8	Buzzi Unicem (Itália)	49,2	37	46,2	31	3	6
9	Eurocement (Rússia)	47,2	19	47,2	19	0	0
10	Dangote Cement (Nigéria)	43,8	12	42,3	10	1,5	2

Fonte: *Global Cement Magazine*, jan/2019.

O Brasil é o maior país da América do Sul e o quinto maior do mundo. Com uma população de aproximadamente 209 milhões de pessoas, torna-se um dos mais populosos do mundo segundo pesquisa de 2017. Com uma capacidade total de mais de 100 milhões de toneladas de cimento por ano, temos a maior indústria de cimento da América Latina. No início de 2019, o Brasil conta com 72 fábricas de cimento integradas (com forno de clínquer) ativas totalizando uma capacidade de expedição de 88,4 milhões de toneladas por ano e 20 moagens de cimento com capacidade total de 12,3 milhões de toneladas por ano (*Global Cement Magazine*, jan/2019).

Tabela 2: Maiores produtores de cimento instalados na América do Sul

Produtor	Capacidade (Mt/ano)			País sede
	Total	Fab. Integradas	Moagem	
Votorantim	46,3	39,2	7,1	Brasil
InterCement	24,7	22,8	1,9	Brasil
LafargeHolcim	20,7	17,6	3,1	Suíça
Cementos Argos	10,4	10,1	0,3	Colômbia
FNC Venezuela	9,8	9,8		Venezuela

Fonte: *Global Cement Magazine*, jan/2019.

Segundo o SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), o mercado de cimento nacional vem sofrendo consecutivas baixas, e a previsão para a retomada do crescimento é que se dê entre o segundo semestre de 2019 e início de 2020 como é visto na Figura 24 a seguir.

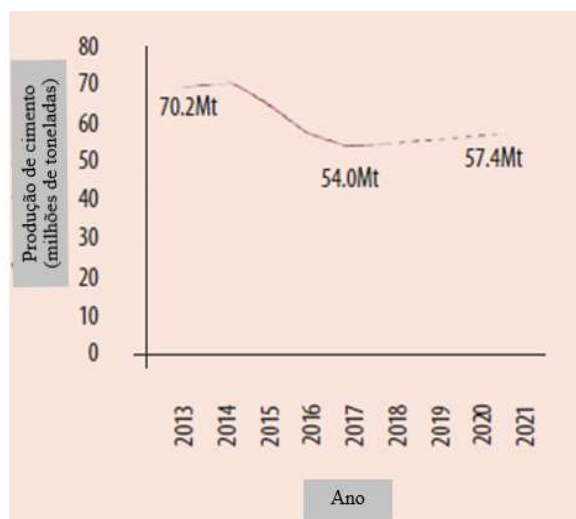


Figura 24: Mercado de cimento no Brasil

Fonte: Adaptado de *Global Cement Magazine*, jan/2019.

## 4.2 Processo de fabricação

O processo produtivo do cimento é, resumidamente, uma combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais não metálicas, sua transformação química em clínquer (produto intermediário do cimento) em um forno a cerca de 1.450°C e posterior moagem e mistura a outros materiais, conforme o tipo de cimento (CNI, 2012).

Na mina, o calcário e outras matérias primas como argila são extraídos através de perfuração ou desmonte com explosivos, e posteriormente transportados por caminhões basculantes. A Figura 25 mostra uma mina de calcário de uma cimenteira.



Figura 25: Mina de calcário  
Fonte: CIMPOR

Após a saída da mina o material se dirige a um britador onde terá sua granulometria diminuída para uma média de 30 a 40 mm, isto facilita a pré-homogeneização do insumo. Na Figura 25 a seguir vemos um exemplo de pátio de pré-homogeneização e sua respectiva pilha de material a ser transportado para o setor de moagem.



Figura 26:Pátio de pré-homogeneização  
Fonte: Autoria própria.

Calcário e argila são as matérias-primas essenciais para a fabricação do clínquer (matéria-prima base do cimento *portland*), em uma proporção de 75%-80% e 20%-25%, respectivamente. Além disso, eventuais aditivos corretivos são utilizados, como minério de ferro, areia e bauxita. Uma vez lavrado, o calcário é britado e pré-homogeneizado junto com argila e demais aditivos. Esses minérios são devidamente dosados nas proporções exatas, quando então são moídos e homogeneizados até resultar em um material fino e de concentrações homogêneas, denominado farinha de clínquer, ou farinha de cru (CNI, 2012).



Figura 27:Britador  
Fonte: Autoria própria.

A farinha é submetida a um pré-aquecimento e a uma percentagem apreciável de descarbonatação (>90%) antes de entrar no forno – a descarbonatação retira o  $\text{CO}_2$  do  $\text{CaCO}_3$  coletado na mina de calcário e o transforma em  $\text{CaO}$ .

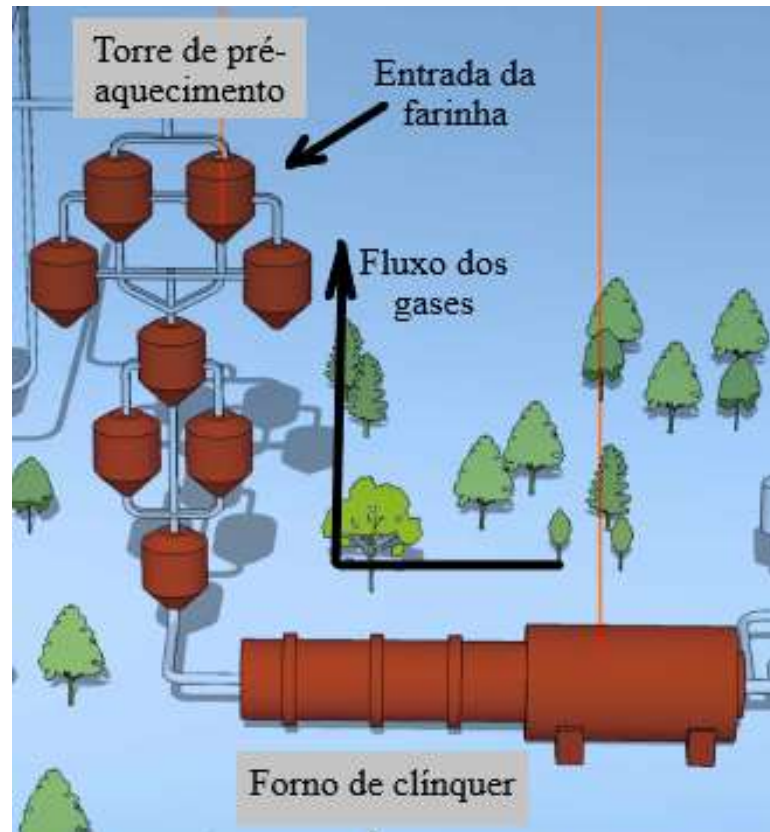


Figura 28: Detalhe de torre de pré-aquecimento e forno de clínquer  
Fonte: CIMPOR.

Como o gás quente se desloca em contra fluxo da farinha de clínquer, cerca de 10% da farinha retorna como rejeito – perda padrão de uma cimenteira. Na Figura 28 é mostrada uma torre de descarbonatação onde a farinha entra em seu topo e inicia o processo de perda de  $\text{CO}_2$ , para posteriormente entrar no forno e o *blend* mineral se transformar em um único elemento que pode ser visto na Figura 29: o clínquer.





Figura 29:Clínquer *Portland*  
Fonte: Autoria própria.

Uma vez doseado nas devidas proporções, o clínquer é moído conjuntamente com cerca de 5% de gesso e transforma-se assim em cimento *portland*. Dependendo do tipo de cimento, outros materiais podem ser adicionados: escória granulada de alto-forno (subproduto da fabricação do gusa nos altos fornos), materiais pozolânicos (naturais ou artificiais) e materiais carbonáticos (rocha calcária moída). Esses materiais são conhecidos como adições e conferem características complementares aos cimentos (ABCP - Associação Brasileira de Cimento *Portland*).

#### 4.3 Insumos da indústria do cimento

A primeira e fundamental etapa do processo de fabricação do cimento é a extração das matérias-primas (calcário e argila). A extração de calcário no Brasil ocorre em grandes lavras mecanizadas a céu aberto. A atividade extrativa frequentemente implica impactos ambientais locais concentrados em pequenas áreas, uma vez que a vegetação e o solo são removidos e a topografia, alterada. Outra matéria-prima extraída nessa etapa é a argila. Para a fabricação de cimento *Portland* é utilizado somente o calcário calcítico. Somente ele pode ser utilizado devido ao baixo teor de MgO presente em sua composição. A matéria-prima deve possuir no máximo 3% de MgO, pois em alta concentração no clínquer pode produzir um cimento de baixa durabilidade. (BELATO, 2013).

Um outro insumo utilizado no processo de fabricação do cimento *portland* é a argila. Porém diferente do calcário, a utilização da argila é mais flexível (o processo aceita uma maior

quantidade de tipos deste insumo). Assim, sua escolha irá depender da disponibilidade, da distância da jazida em relação a fábrica bem como da relação sílica/alumínio do material. Durante o processo de fabricação do clínquer, a argila fornece os compostos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ . Nem sempre a argila utilizada tem a quantidade de óxidos de ferro e alumínio ideal para o processo, portanto pode ser adicionado óxido de ferro e alumínio à matéria-prima. (BERNARDO, 2009).

Por fim tem-se o gesso como a última matéria-prima a ser adicionada ao processo. Ele é adicionado ao cimento antes da moagem. Ele é um aglomerante proveniente da gipsita, utilizado em grande escala no setor de construção civil, devido às suas propriedades de aderência. O gesso é introduzido com a finalidade de retardar a pega do cimento após a adição de água. A pega do cimento seria o início da solidificação da mistura de cimento com água, nas reações de hidratação. (BELATO, 2013).

## 5 MATERIAIS CERÂMICOS

Os elementos metálicos formam a maioria entre os elementos da Tabela periódica. Esses elementos estão localizados à esquerda desta Tabela e, portanto, são elementos eletropositivos - que tendem a perder elétrons para produzir cargas positivas cátions. Elementos não metálicos estão localizados à direita: são eletronegativos e tendem a capturar elétrons. Os compostos não metálicos essencialmente iônicos covalentes são os que constituem as cerâmicas, ou seja, são compostos formados entre metais e não metais, porém com maior frequência são óxidos, nitritos e carbonetos (BOCH; NIEPCE, 2007).

O termo “cerâmico” é mais familiar como um adjetivo para designar certos objetos de arte. Para a engenharia, entretanto, os materiais cerâmicos abrangem uma grande variedade de substâncias naturais e sintéticas tais como vidros, tijolos, pedra, concreto, abrasivos, vidrados de porcelana, isolantes dielétricos, materiais magnéticos não-metálicos, refratários para altas temperaturas e muitos outros. A característica que todos estes materiais têm em comum é que são constituídos por metais e não-metais. (VAN VLACK, 2000).

### 5.1 Classificação dos materiais cerâmicos

Segundo Callister (2007), materiais cerâmicos são compostos inorgânicos e não-metálicos, para os quais as ligações interatômicas ou são totalmente iônicas ou são predominantemente iônicas com alguma natureza covalente cuja classificação pode ser feita de acordo com a estrutura, suas aplicações e métodos de processamento.

#### 5.1.1 Estruturas cristalinas

Em cerâmicas nas quais as ligações atômicas são predominantemente iônicas, as estruturas cristalinas são compostas por íons carregados ao invés de átomos. Duas características dos íons presentes em cerâmicas cristalinas que influenciam na estrutura do cristal são a magnitude da carga elétrica de cada íon e o tamanho relativo entre cátions e ânions. Desta forma, algumas estruturas apresentam maior estabilidade do que outras, conforme mostra a Figura 30 a seguir:

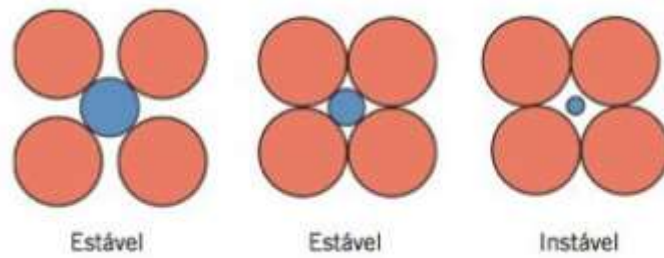


Figura 30: ConFiguração de cátions e ânions em uma cerâmica cristalina  
 Fonte: CALLISTER (2007).

### 5.1.2 Cerâmicas à base de silicato

As cerâmicas à base de silicato são elementos encontrados na natureza cuja composição é principalmente silício e oxigênio. Na maioria das vezes os silicatos não são considerados iônicos, pois existe uma natureza covalente significativa nas ligações interatômicas Si – O, pois existe uma carga de -4 associada a cada tetraedro de SiO<sub>4</sub>, devido à necessidade de o oxigênio receber um elétron para se estabilizar (BOCH; NIEPCE, 2007).

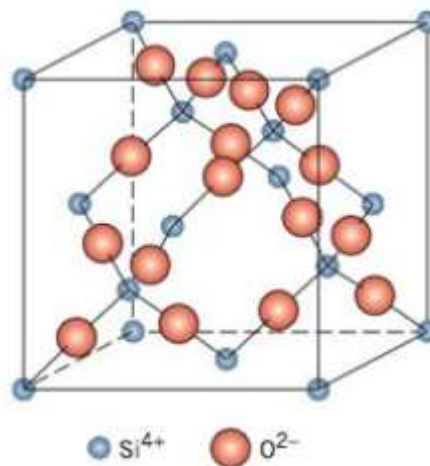


Figura 31: Exemplo de arranjo de íons de silício e oxigênio  
 Fonte: CALLISTER (2007).

De acordo com as aplicações, as cerâmicas, podem ter utilização desde ambientes domésticos (porcelanas, vidros, etc..) até aplicações industriais como indústrias aeroespaciais.

### 5.1.3 Vidros

Como tratado no tópico anterior, os vidros são silicatos não cristalinos que contém outros óxidos (na maioria das vezes  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), os quais têm bastante influência em suas propriedades. As principais características dos vidros são a transparência ótica e a facilidade de fabricação. Em geral possuem boas propriedades dielétricas, elevada resistência mecânica e capacidade de trabalho em temperaturas elevadas. (BOCH; NIEPCE, 2007).



Figura 32: Vidrado cerâmico  
Fonte: autoria própria.

### 5.1.4 Produtos à base de argila

Os produtos à base de argila são os mais amplamente utilizados devido ao baixo custo de manipulação e abundância desta matéria-prima. Sua facilidade de conformação também contribui para seu grande uso, pois, de forma manual pode-se obter os mais variados produtos, desde tijolos, telhas e outros elementos para construção até artigos de decoração.

### 5.1.5 Refratários

Uma das classes mais utilizadas das cerâmicas são as refratárias. A capacidade de resistir a elevadas temperaturas e proporcionar isolamento térmico, faz com que essas cerâmicas sejam

muito importantes para processos industriais como por exemplo fornos rotativos e indústrias metalúrgicas.

A eficiência destes materiais está ligada diretamente a sua composição, desta forma tem-se os principais tipos de cerâmicas refratárias: refratários de argila ( $\text{SiO}_2\text{-AL}_2\text{O}_3$ ) – onde tem-se aproximadamente 45% de alumina, refratários à base de sílica – baixo teor de alumina (~7%) e refratários especiais cuja composição, geralmente, são óxidos de pureza bastante elevada (CALLISTER, 2002).

## 5.2 Propriedades

O espectro de propriedades destes materiais engloba várias características, quais sejam:

**Fragilidade:** A razão pela qual a maioria das cerâmicas são frágeis é a ligação mista covalente-iônica que mantém os átomos constituintes juntos. Em altas temperaturas (acima da temperatura de transição vítrea), o vidro não mais se comporta de maneira quebradiça; ele se comporta como um líquido viscoso. É por isso que é fácil formar vidro em formas complexas. Então, o que é possível dizer é que a maioria das cerâmicas são frágeis à temperatura ambiente, mas não necessariamente a temperaturas elevadas.

**Má condução elétrica e térmica:** Os elétrons de valência são amarrados em ligações e não são livres como em metais. Nos metais, são os elétrons livres que determinam muitas de suas propriedades elétricas e térmicas.

**Resistência à compressão:** As cerâmicas são mais fortes na compressão do que na tensão, enquanto os metais têm resistências à tração e à compressão comparáveis. Essa diferença é importante quando usamos componentes de cerâmica para aplicações de suporte de carga. É necessário considerar as distribuições de tensão na cerâmica para garantir que elas sejam compressivas. Cerâmicas geralmente têm baixa tenacidade, embora combiná-las em compósitos podem melhorar drasticamente essa propriedade (CARTER; NORTON, 2007).

## 5.3 Tipologia e aplicações

As aplicações desses materiais são diversas, desde tijolos e telhas até componentes eletrônicos e magnéticos. As funções dos produtos cerâmicos dependem da sua composição química e infraestrutura, que determina suas propriedades. A seguir são mostrados algumas propriedades de cerâmicas e suas possíveis aplicações.

Tabela 3: Propriedades e aplicações das cerâmicas

Propriedades	Material	Aplicação
<b>Elétrica</b>	$\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$	Componente condutor em resistores;
	$\text{ZrO}_2$ (dopado)	Eletrólito em células de combustível de óxido sólido;
<b>Dielétrica</b>	$\text{SiO}_2$	Tijolos refratários;
	$(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$	Memórias de acesso aleatório dinâmicas (DRAMs);
<b>Magnética</b>	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fitas de gravação;
	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	Imãs permanentes em alto-falantes;
<b>Ótica</b>	$\text{SiO}_2$ (dopado)	Fibras óticas;
	$(\text{Zn},\text{Cd})\text{S}$ (dopado)	Telas fluorescentes para microscópios eletrônicos;
<b>Mecânica</b>	$\text{SiC}$	Abrasivo para polimentos;
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Implantes ósseos;
<b>Térmica</b>	Vidrado pirex	Vidraria e utensílios de laboratório;
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Circuitos integrados;

Fonte: CARTER; NORTON, (2007)

#### 5.4 Cerâmicas como condutores elétricos

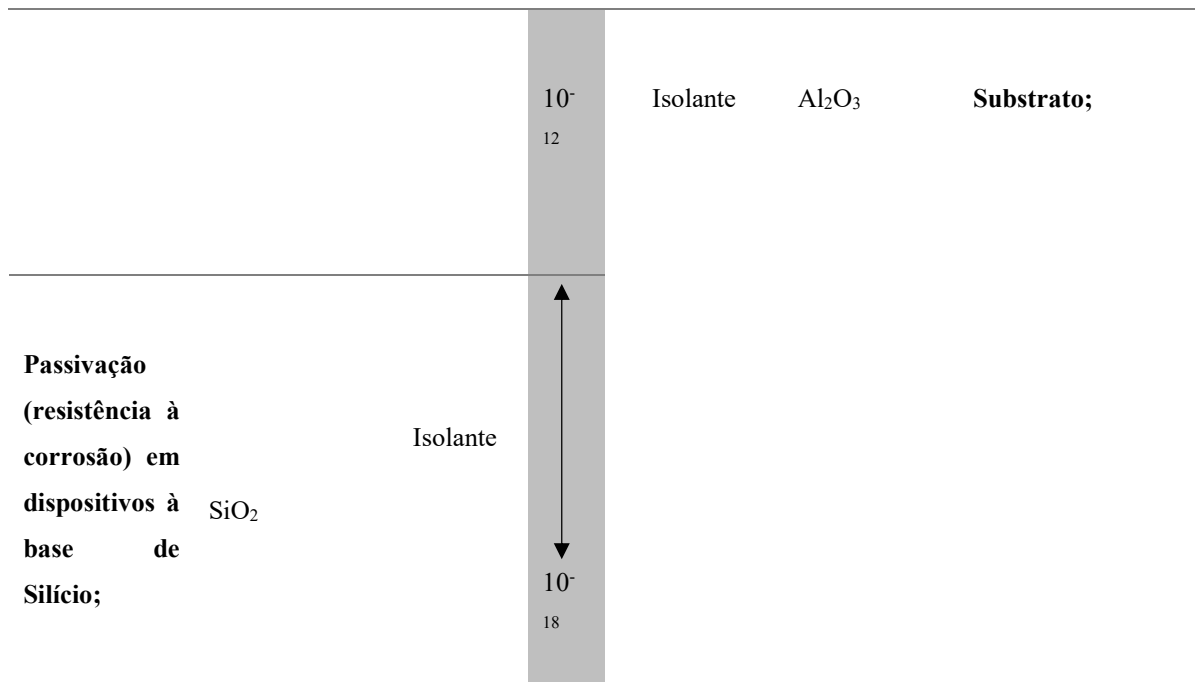
A distinção entre materiais como condutores elétricos e materiais como isolantes foi feita no século XVIII. Embora historicamente as propriedades isolantes da cerâmica tenham sido frequentemente uma de suas propriedades mais importantes, muitas cerâmicas são na

verdade muito boas condutoras elétricas e algumas são até mesmo supercondutoras. Cerâmicas mostram a mais ampla gama de propriedades elétricas de qualquer uma das classes de materiais.

Tabela 4: Condutividade das cerâmicas

Aplicação	Material	Condução	Material	Aplicação		
		Iônica	10 <sup>6</sup>	Eletrônica	BaPb <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> O <sub>3</sub>	Supercondutor;
			↑		RuO <sub>2</sub>	Resistores de filme espesso;
					LaCaO <sub>3</sub>	Catalisador;
				Metal	LaNiO <sub>3</sub>	Eletrodo de células a combustível;
			↓		La <sub>1-x</sub> Sr <sub>1-x</sub> CrO <sub>3</sub>	Eletrodo MHD;
			10 <sup>0</sup>		SrTiO <sub>3</sub>	Fotoeletrodo;
Bateria Na/S;	NaβAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		↑			
Sensor de oxigênio;	(300°C) YSZ (1000°C)	Íon condutor		Semicondutor	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Vidro;
Vidro;					TiO <sub>2-x</sub>	Sensor de oxigênio;
Bateria;	Li <sub>2</sub> OLiClB <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		↓			
	(300°C) K <sub>x</sub> Pb <sub>1-x</sub> F <sub>1,75</sub>		10 <sup>-6</sup>			
Eletrodo (íon Fluorino);	LaF <sub>3</sub> EuF <sub>2</sub>	Eletrólito Sólido	↑		TiO <sub>2</sub>	Varistor;
Sal	NaCl		↓		ZnO	





Fonte: CARTER; NORTON, (2007)

### 5.5 Cerâmicas isolantes

Em um isolante elétrico, há uma grande diferença de energia entre a parte inferior da banda de condução e a parte superior da banda de valência. Como exemplo temos a Figura 33 que mostra o diagrama de bandas de energia para o MgO. A banda de valência é formada pelos níveis 2p de energia de oxigênio (íons  $O^{2-}$ ) e a banda de condução é formada a partir dos orbitais 3s vazios dos íons  $Mg^{2+}$  (CARTER; NORTON, 2007).

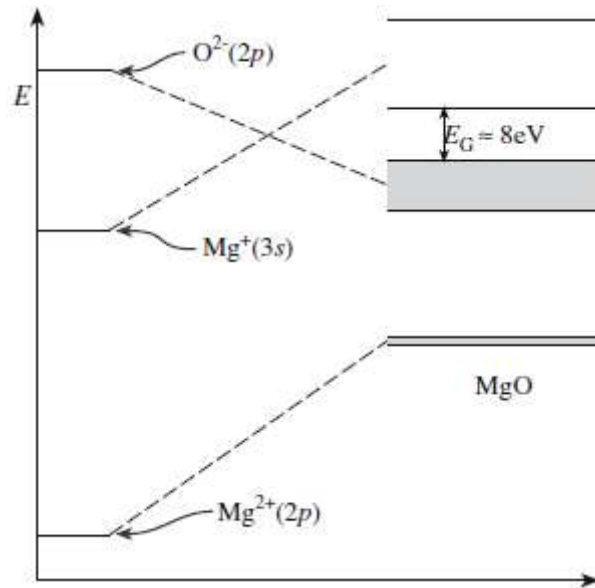


Figura 33: Banda de energia para o MgO  
 Fonte: CARTER; NORTON, (2007)

Vê-se que o *gap* de energia é de aproximadamente 8eV e a concentração de elétrons excitados termicamente na banda de condução de MgO é baixa até o seu ponto de fusão, 2800 ° C. O MgO é, portanto, um excelente isolante de alta temperatura.

### 5.6 Materiais cerâmicos do tipo SiO<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub>

Os polimorfos são materiais que possuem a mesma composição química, mas diferentes estruturas cristalinas. Muitos materiais cerâmicos mostram esse comportamento, incluindo SiO<sub>2</sub>, BN, BaTiO<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> e BeO.

Serão discutidas três formas de SiO<sub>2</sub>, ou seja, quartzo, tridimita e cristobalita. Para cada forma, a baixas temperaturas (a fase  $\alpha$ ) encontramos uma estrutura que é uma distorção da forma de alta temperatura (a fase  $\beta$ ).

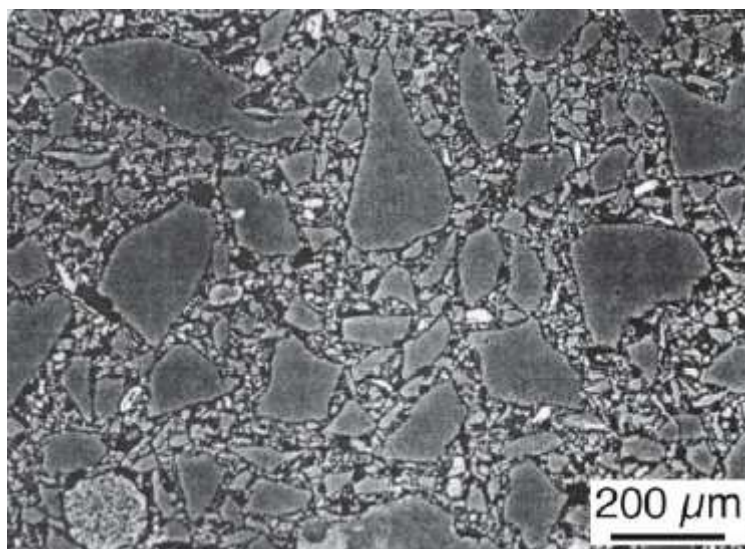


Figura 34: Grãos de SiO<sub>2</sub>  
Fonte: CARTER; NORTON, (2007)

Em cada caso, a mudança da estrutura  $\alpha$  para  $\beta$  envolve uma transformação de fase deslocada; os átomos precisam se mover apenas um pouco em relação ao outro. No entanto, mudar de uma forma para outra requer a quebra de vínculos. Este processo é muito mais difícil e é conhecido como uma transformação de fase reconstitutiva.

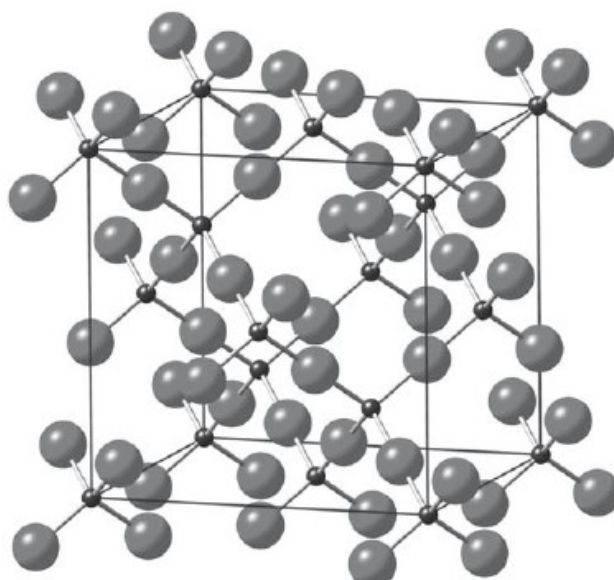


Figura 35: Cristobalita  
Fonte: CARTER; NORTON, (2007)

Outro polimorfo importante no mundo das cerâmicas é o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), cujas formas polimórficas podem ser: aragonita e calcita.

A primeira tem origem orgânica e é dificilmente encontrada pura, geralmente apresenta contaminantes ou associações a outros minerais. A aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ) possui a mesma composição química da calcita, entretanto difere na estrutura cristalina (SAMPAIO, 2008).

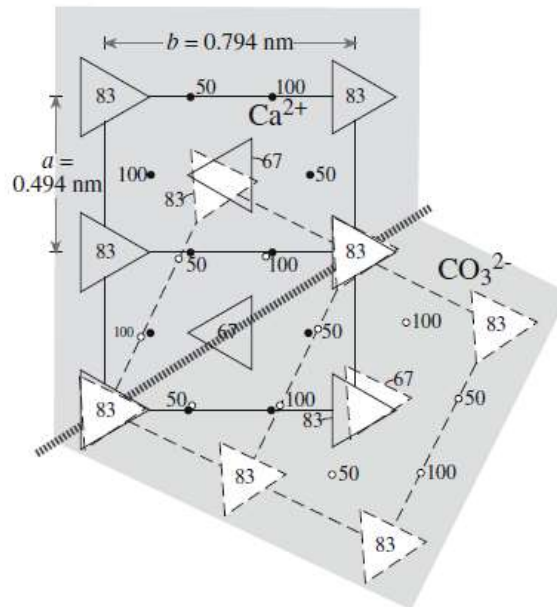


Figura 36: Aragonita ( $\text{CaCO}_3$ )  
Fonte: CARTER; NORTON, (2007)

Na classificação mineralógica das rochas calcárias, deve ser considerada a variação nas proporções de calcita, dolomita, bem como dos componentes não-carbonatados. Tal procedimento é útil na descrição da rocha, especialmente quando combinado com os parâmetros de textura, entretanto não se adapta muito bem quando são abordadas aplicações industriais desse bem mineral. A calcita possui origem sedimentar e é o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore de elevada pureza, sendo assim a forma que possui maior valor econômico no mercado.

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é descrita toda a metodologia de fabricação das amostras de substratos das três antenas desde as caracterizações químicas e elétricas até a confecção e testes. O ambiente de trabalho para a fabricação do substrato é o laboratório de análises químicas e controle de amostras de uma indústria de cimento em Quixeré/CE.

A Figura 37 a seguir ilustra de forma resumida a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

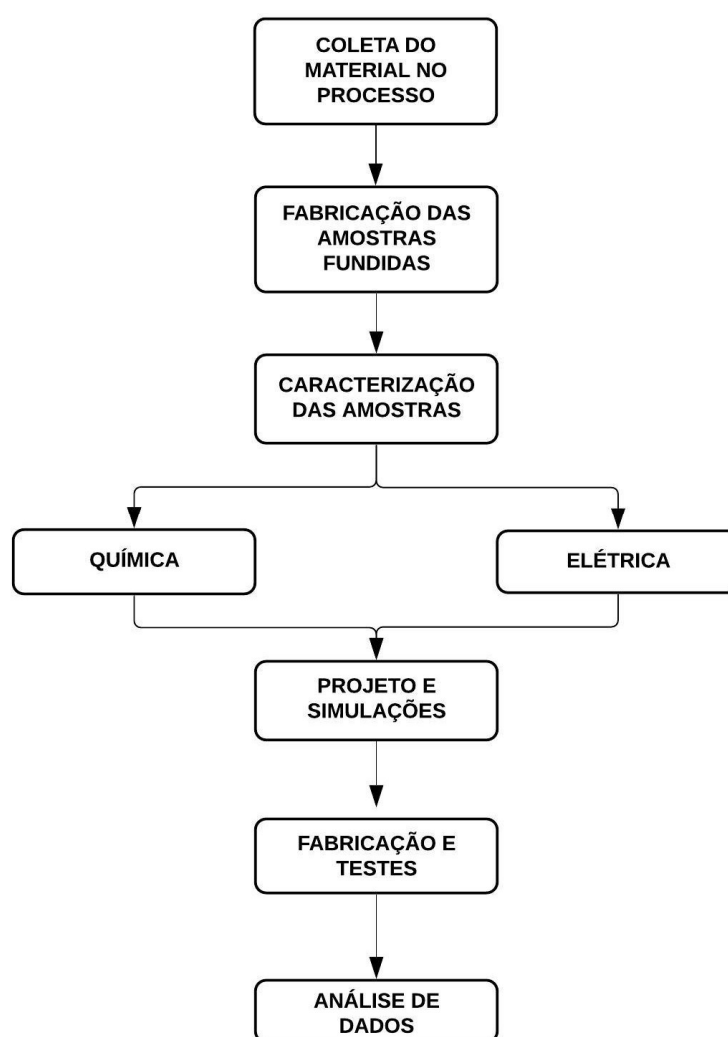


Figura 37: Fluxograma do processo metodológico utilizado  
Fonte: Autoria própria

## 6.1 Fabricação das Amostras

Nesta seção serão abordados os detalhes do procedimento seguido para a preparação da pastilha fundida (vidrado cerâmico) utilizada neste trabalho. A Tabela 5, abaixo, mostra os insumos e equipamentos necessários para a fabricação.

Tabela 5: Materiais para a fabricação das amostras

PARÂMETROS DE CONTROLE		RECURSOS
DESCRIÇÃO	ESPECIFICAÇÃO	
Preparação de Pastilha Fundida	Conforme este procedimento	- Balança analítica e semianalítica, moinho Herzog, forno mufla, bico de Bunsen com capela de exaustão, cadinho de Pt-Au, molde de Pt-Au, reagente MAXXI-FLUX1010 P.A (tetraborato de Lítio + metaborato de Lítio + iodeto de Lítio), pinças, papel de filtro e saco plástico.
CONDIÇÕES NECESSÁRIAS		CUIDADOS ESPECIAIS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- EPI's;</li> <li>- Conhecer o procedimento para ensaios;</li> <li>- Conhecer a NBR 14656.</li> </ul>		- Tomar cuidado com o manuseio de vidrarias e equipamentos de Pt-Au, reagentes e equipamentos quentes.

Fonte: Autoria própria

O elemento fundente utilizado foi o MAXXI-FLUX1010 da Oregon Labware®, de alta densidade e baixa perda ao fogo visto na Figura 38.

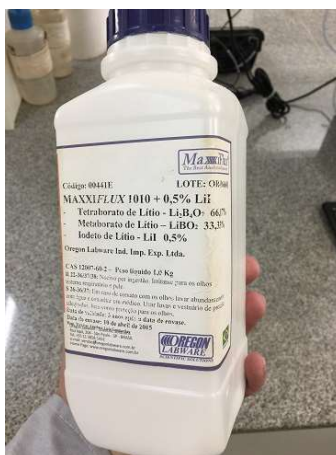


Figura 38: Reagente para fusão da amostra  
Fonte: Autoria própria

Os próximos itens descreverão o procedimento de fabricação:

- A) Em uma balança analítica, foi pesado 12,0640g do reagente MAXXI-FLUX1010 P.A (tetraborato + metaborato + iodeto) todos de lítio, que deve estar seco à 110°C, passando em seguida para um cadinho de Pt –Au, devidamente seco e limpo;



Figura 39: Realização de pesagem da amostra  
Fonte: Autoria própria

- B) Foi pesada também em uma cápsula limpa (para evitar contaminações), 2,4360g da amostra e introduzida no cadinho, contendo a mistura dos reagentes e, com uma espátula fina, homogeneizada a mistura dos materiais dentro do próprio cadinho. Esta quantidade é fixada para que não haja transbordamento de material no cadinho no momento em que o material esteja fundido.



Figura 40: Introdução do material no cadinho para fundição  
Fonte: Autoria própria

- C) Por meio de uma pinça longa com a ponta de Platina, o cadinho foi inserido na mufla a  $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , por 20 minutos, efetuando rápidas homogeneizações da fusão a cada 5 minutos, dentro da própria mufla, utilizando a pinça longa com ponta de platina;



Figura 41: Início do processo de fundição  
Fonte: Autoria própria

Para a amostra 1:

- D) Aquecimento ao rubro em um bico de Bunsen o molde de Platina-Ouro (também conhecido como lingoteira), que já deve estar devidamente limpo, mantendo uma chama oxidante, atentando também para o nivelamento do molde;





Figura 42: Aquecimento dos moldes das amostras  
Fonte: Autoria própria

- E) Terminado o tempo do material na mufla, retirado cuidadosamente o cadinho e vertido a massa fundida para dentro do molde, fazendo com que todo material seja transferido;

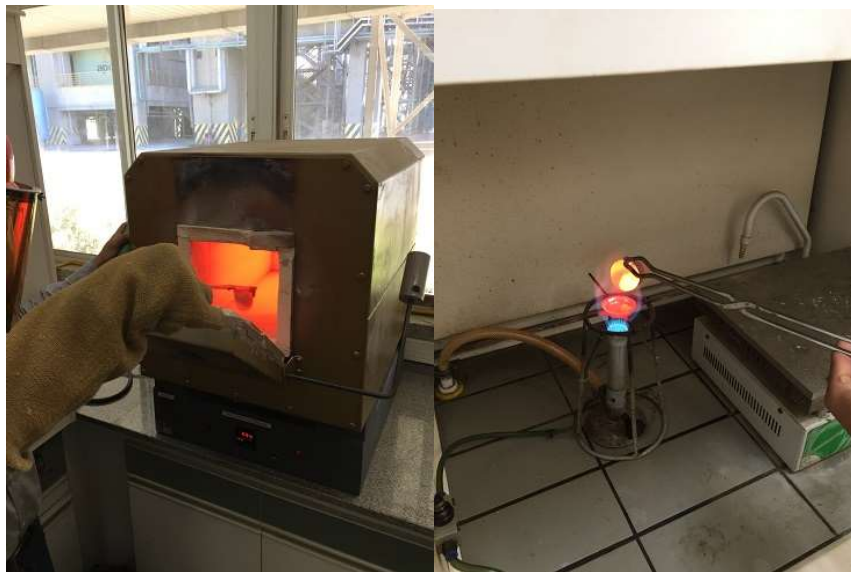


Figura 43: Retirada da amostra  
Fonte: Autoria própria

- F) Terminado a transferência, foi cortado o gás do bico e rapidamente aberto o ar comprimido para resfriamento brusco, o que contribui também para o deslocamento da pastilha fundida de dentro do Molde;



Figura 44: Amostra pós resfriamento  
Fonte: Autoria própria

G) Após realizado o passo anterior, a amostra foi resfriada por aproximadamente 10 minutos para somente assim ser feita a coleta;



Figura 45: Amostra  
Fonte: Autoria própria

Para as amostras 2 e 3 foi repetido o mesmo modo de fabricação descrito acima, porém com diferença de tempo de resfriamento entre elas. A Tabela 6 a seguir demonstra o tempo de resfriamento de cada amostra.

Tabela 6: Tempo de resfriamento por amostra

Amostra	Tempo (min.)									
	0	10	30	60	90	120	150	180	210	240
1	1000°C	45°C								
2	1000°C	800°C	600°C	400°C	200°C	45°C				
3	1000°C	900°C	800°C	700°C	600°C	500°C	400°C	300°C	200°C	45°C

Fonte: Autoria própria

## 6.2 Caracterização do material para o substrato

### 6.2.1 Caracterização química

A caracterização química das amostras foi feita por meio de difratometria de raios x com o difratômetro de raio x SHIMADZU modelo XRD 6000 pelo método de filmes finos. A amostra permaneceu fixa a um ângulo  $\theta = 1^\circ$ , e a coleta dos dados que sofreram difração na amostra foi realizada pelo detector se deslocando de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  com velocidade de varredura de  $1,2^\circ/\text{minuto}$ . Na Figura 44 a seguir vê-se uma ilustração deste método de análise.

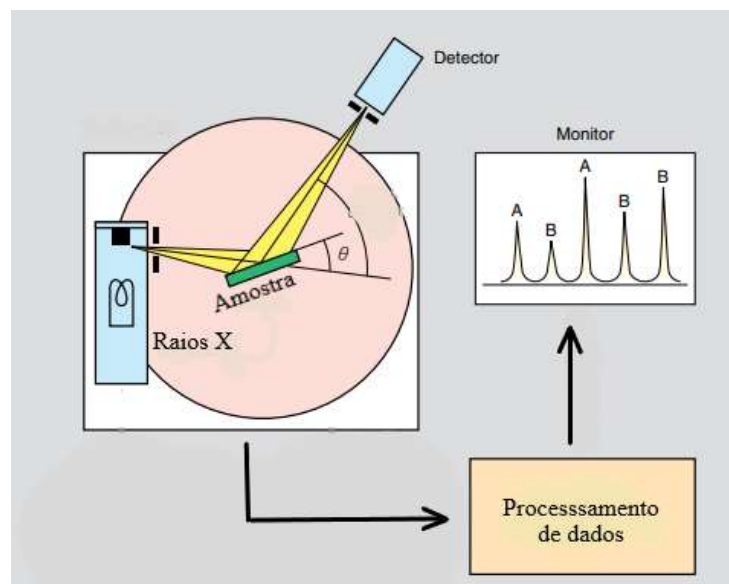


Figura 46: Difratometria de Raio X  
Fonte: LabWrench

Com a análise descrita acima foi possível detectar quais os elementos químicos presentes nas amostras e suas características de cristalografia. Na Figura 47 abaixo é possível observar o Difratorômetro XRD 6000 em medição.



Figura 47: Difratorômetro de Raio-X  
Fonte: Autoria própria

Como as amostras tiveram tempo de resfriamento diferente é esperado que a difratometria de raios x mostre em algum momento formações de cristais diferentes em cada amostra, com isso é possível analisar se este tempo bem como os cristais formados irão influenciar na performance da amostra como dispositivo de transmissão/recepção de sinais na faixa de micro-ondas.

Na amostra 1, devido ao tempo de resfriamento muito curto a estrutura prevaleceu amorfa e não foi possível observar formações cristalinas.

Na amostra 2 pode-se observar presença bem elevada e cristalina apenas do composto  $\text{SiO}_2$  (dióxido de silício) o que demonstra que a cristalização deste elemento é bem mais rápida que o  $\text{CaCO}_3$  também presente na amostra. Esta amostra tem fase cristalina pequena.

A amostra 3 tem presença de dois tipos de cristal, o cristal  $\text{SiO}_2$  e o cristal  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$ , o que confirma o esperado para o estudo: quanto maior for o tempo de cristalização maior será a formação de outros cristais e para este caso o tempo de resfriamento da amostra 3 foi suficiente para que o cálcio (Ca) entrasse na rede cristalina do Silício (Si).

## 6.2.2 Caracterização elétrica

A realização da caracterização elétrica do material com valores de permissividade elétrica, parte real e parte imaginária e tangente de perdas, foi feito pelo método da sonda dielétrica cujo equipamento utilizado é o analisador vetorial de redes *Rohde & Schwarz* modelo ZND com sonda DAK 3.5. A faixa de frequências analisada foi de 1,00 GHz a 8,50 GHz, contemplando assim toda a banda C que é a banda de operação da antena proposta. A seguir na Figura 51, pode-se ver a medição.

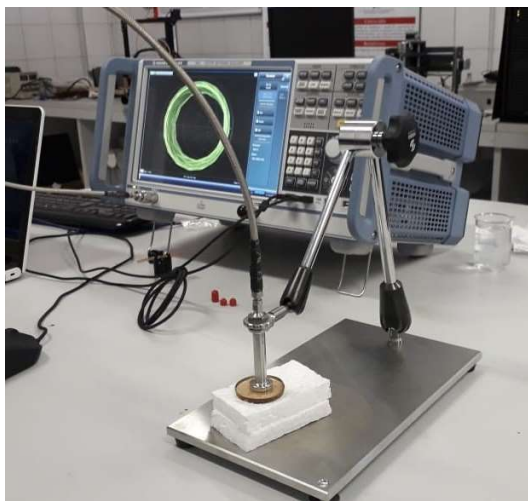


Figura 48: Medição de permissividade dos materiais propostos

Fonte: autoria própria

### 6.2.2.1 Permissividade elétrica ( $\epsilon$ )

Os materiais foram classificados conforme sua permissividade elétrica, da maior para a menor, para o melhor entendimento das variações das respostas das antenas projetadas. Na Tabela 7 serão demonstrados os valores medidos, e suas varrições ao longo da faixa de frequência proposta.

#### 6.2.2.1.1 Parte Real

Lembrando-se que a permissividade é uma grandeza complexa e seu valor está relacionado às perdas do material, logo quanto maior for o valor de permissividade em sua parte

real, menor a tangente de perdas do material e, conseqüentemente, menos energia será dispersada e conseqüentemente, quanto maior ele for sua parte imaginária maior a tangente de perdas do material. A Tabela 7 a seguir mostra os valores da parte real da permissividade elétrica das amostras.

Tabela 7: Valores de permissividade elétrica real das amostras em 5,85GHz

Amostra	$\epsilon'$
1	4,23
2	4,13
3	3,01

Fonte: Autoria própria

Na Figura 48 abaixo é possível observar as variações de permissividade elétrica das amostras ao longo da faixa de frequência estudada. Vê-se que as variações da permissividade da amostra 2 é semelhante a variação da amostra 1 o que denota que o fato de a amostra 2 possuir maior fase cristalina que a amostra 1 ( $\text{SiO}_2$  com fase cristalina), isto não interfere na permissividade elétrica do material.

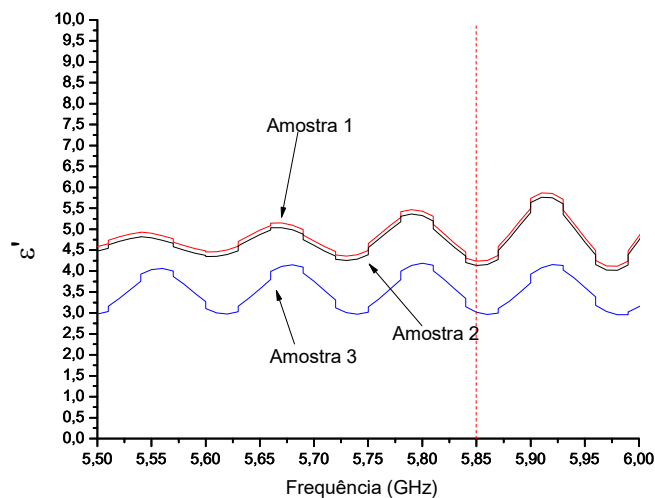


Figura 49: Parte real da permissividade elétrica das amostras

Fonte: Autoria própria

É interessante observar que, geralmente para dispositivos operantes na região da faixa de micro-ondas, é interessante que possuam valores de permissividade maiores que o vácuo ( $\epsilon' = 1$ ) para que seja possível obter dispositivos cada vez menores (quanto maior o valor da permissividade, menor será o dispositivo para a mesma faixa de frequência).

A amostra 3 tem valores de permissividade bem menores (aproximadamente 28% menor) que as outras duas amostras. Logo, é constatada a influência do tempo de resfriamento e, por consequência, da formação do cristal  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$  na permissividade elétrica desta amostra.

### 6.2.1.1.2 Parte Imaginária

Como foi citado no item 6.2.2.1.1, é interessante para este projeto proposto que o material apresente menor permissividade complexa em sua parte imaginária. Sabido isto, são expostos os valores medidos das amostras em questão.

Tabela 8: Permissividade elétrica imaginária das amostras

Amostra	$\epsilon''$
1	0,36
2	0,35
3	0,0002

Fonte: Autoria própria

Nota-se que a variação dos valores de permissividade das amostras 1 e 2, assim como os valores da parte real da permissividade, são bem pequenas o que corrobora o exposto anteriormente que o fato de a amostra 2 possuir maior fase cristalina que a amostra 1 ( $\text{SiO}_2$  com fase cristalina), não interfere na permissividade elétrica do material.

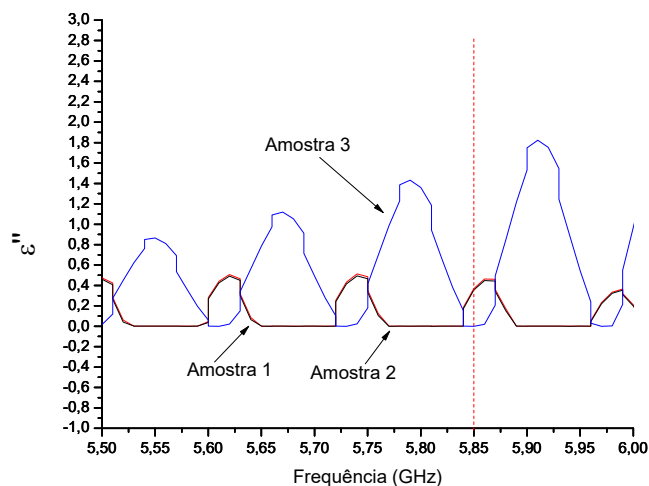


Figura 50: Parte imaginária da permissividade elétrica das amostras  
Fonte: Autoria própria

Na Figura 50 é possível notar que o valor de permissividade da amostra 3 é menor que das outras amostras estudadas (aproximadamente 0,02% em relação as outras amostras), o que demonstra que este tipo de material com estrutura mais cristalina tem menores perdas de energia e que a presença do cristal  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$  tem bastante influência na performance do material estudado.

### 6.2.1.3 Tangente de perdas

Em um meio dielétrico com ou sem perdas, a aplicação de um campo elétrico externo resulta na formação de dipolos elétricos no interior do material (MITRIONE SOUZA, 2014), assim tais perdas estão relacionadas com o ângulo de deslocamento dos vetores dos dipolos em relação ao campo elétrico “E” incidente. Logo, os substratos dielétricos utilizados em micro-ondas precisam ter tangente de perda com valores próximos a zero, para que os campos elétricos propagantes nestes materiais sofram atenuação reduzida. A seguir são demonstrados os comportamentos dos substratos para a variação de frequência de 5,00 GHz a 6,00 GHz.

Tabela 9: Tangente de perdas das amostras

Amostra	$\epsilon''/\epsilon'$
1	0,087
2	0,086
3	0.0001

Fonte: Autoria própria

Ao analisar a Figura 50 nota-se que, assim como os comportamentos anteriores, os valores de tangente de perdas para as amostras 1 e 2 são bem semelhantes, pois sua diferença é da ordem de 1%.

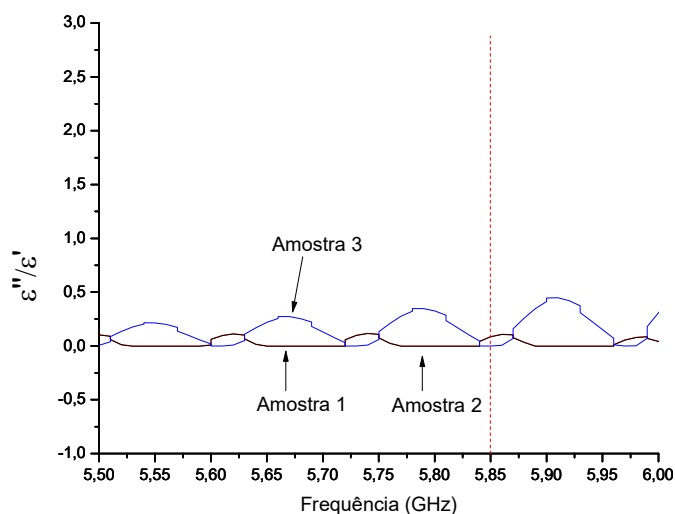


Figura 51: Tangente de perdas das amostras

Fonte: Autoria própria



Para a amostra 3 o comportamento é diferente, pois o valor de tangente de perdas desta amostra é bem menor (aproximadamente 0,1%) que das outras duas. Com isso é possível analisar que estruturas mais amorfas têm maiores valores de permissividade, porém também possuem maiores atenuações dos campos elétricos que se propagam nestes materiais.

### 6.3 Projeto e Simulações

As propriedades elétricas obtidas nas amostras foram utilizadas no projeto das antenas e com base nas equações da seção 3.1 foram calculadas as dimensões das antenas de microfita com *patch* circular alimentadas por linha de alta impedância, como ilustra a Figura 52.

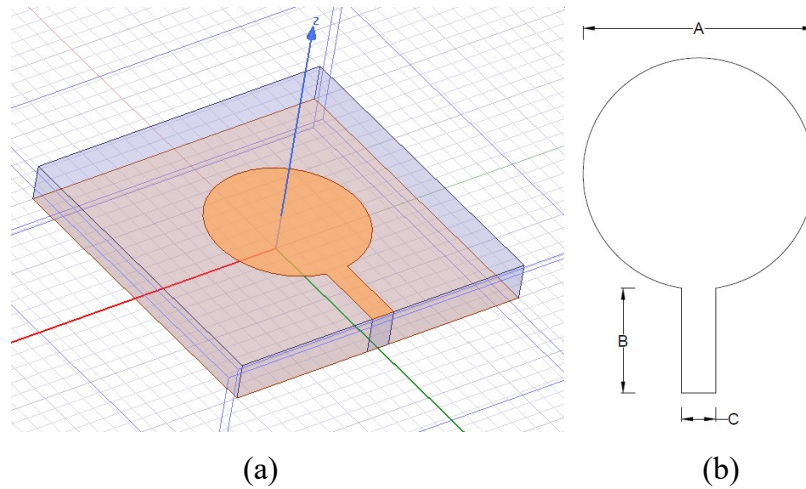


Figura 52: (a) Simulação no *software* HFSS®, (b) Dimensões da antena  
Fonte: Autoria própria

Para todos os projetos, as linhas de transmissão das antenas foram modeladas por otimização paramétrica. A Tabela 10 abaixo demonstra as dimensões das antenas fabricadas.

<b>Dimensões (mm)</b>	<b>Antena 1</b>	<b>Antena 2</b>	<b>Antena 3</b>
<b>A</b>	19,5	20,0	13,0
<b>B</b>	9,1	9,1	10,3
<b>C</b>	3,0	3,0	1,6

Tabela 10: Dimensões das antenas  
Fonte: Autoria própria

De posse dos projetos calculados, as antenas foram desenhadas e simuladas na faixa de frequência de 1 a 8,5 GHz com passo de 0,0067 (mesmas condições em que foram efetuadas as medições), no software Ansys HFSS® (*High Frequency Structural Simulator*) que possibilita a visualização dos principais parâmetros de projeto como perda de retorno, ganho, diagrama de radiação e densidade de corrente.

Para a implementação do projeto, o material condutor utilizado foi uma folha de cobre com condutividade de  $5,8 \times 10^7$  S/m e 0,05 mm de espessura. O cobre foi escolhido como condutor devido a sua baixa resistividade, com o intuito de fazer uma investigação mais específica sobre as perdas causadas pelo substrato cerâmico, além de ser amplamente utilizado na fabricação de antenas de microfita e permitir certa conformidade e adaptabilidade a superfícies curvas (HOLANDA, 2016). O *patch* e o plano de terra foram cortados por meio de uma fresa CNC modelo PCB 2020 que é mostrada na Figura 53.



Figura 53: Fresa CNC modelo PCB 2020  
Fonte: Autoria própria

Para a alimentação e teste das antenas foi utilizado um conector SMA do tipo fêmea reverso, com impedância de  $50\Omega$  e 10mm de diâmetro conforme é visto na Figura 54.



Figura 54: Conector SMA reto PCI  
Fonte: Autoria própria

O conector foi soldado utilizando material de solda à base de uma liga metálica de chumbo e estanho, com auxílio de um ferro de solda.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 RESULTADOS SIMULADOS *VERSUS* RESULTADOS MEDIDOS

Após definir as dimensões das antenas, a geometria aplicada no *patch* e o plano de terra, as antenas foram desenhadas e simuladas utilizando o software Ansys HFSS® (*High Frequency Structural Simulator*) versão 19.0, que utiliza o método numérico FEM, o que possibilita a visualização de parâmetros elétricos como, perda de retorno, diagrama de radiação e densidade de corrente superficial. Para o entendimento completo da origem dos comportamentos elétricos das amostras serão abordados inicialmente os resultados de difratometria de Raio X e posteriormente as características elétricas de cada item é importante registrar que a amostra 1 foi utilizada como substrato da antena 1 e assim para as demais amostras. A seguir na Figura 55 é possível observar os resultados da difratometria de Raio X da amostra 1.

Amostra 1:

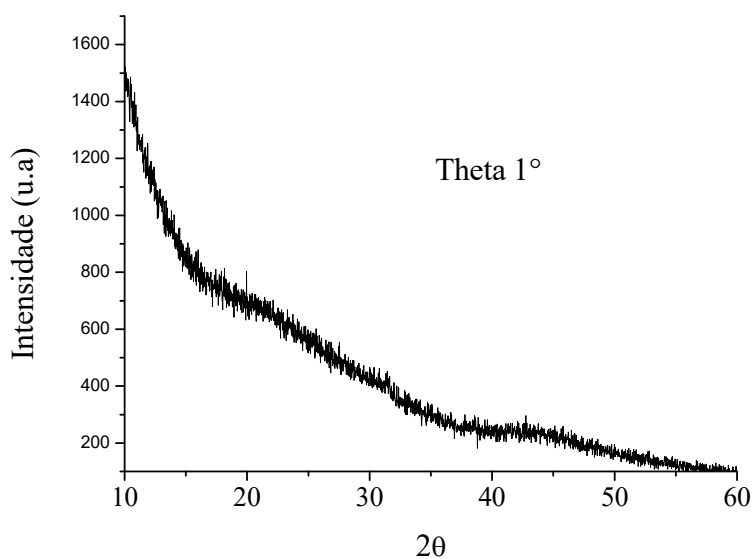


Figura 55: Difratometria de raios x da amostra 1  
Fonte: Autoria própria

Como foi exposto na seção 6.2.1, não foi possível observar formações cristalinas nesta amostra. Isto é possível notar pela ausência de picos na Figura 55 acima.

Para as características elétricas desta amostra, nota-se que possui valor de permissividade compatível com a operação na faixa de frequência de micro-ondas –  $\epsilon = 4,23$  – como é observado na Figura 56 a seguir.

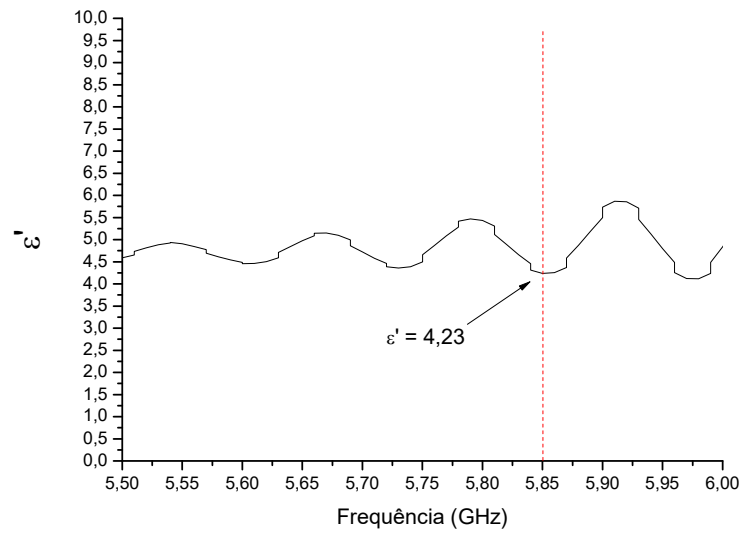


Figura 56: Parte real da permissividade elétrica da amostra 1  
 Fonte: Autoria própria

É possível notar que o comportamento da parte real da permissividade elétrica da amostra 1, Figura 56, apesar de variante ao longo da frequência estudada não possui grandes diferenças de valores superiores e inferiores.

A parte imaginária da permissividade elétrica, teve variação padronizada ao longo da faixa de 1GHz até 8,5GHz observado na Figura 57.

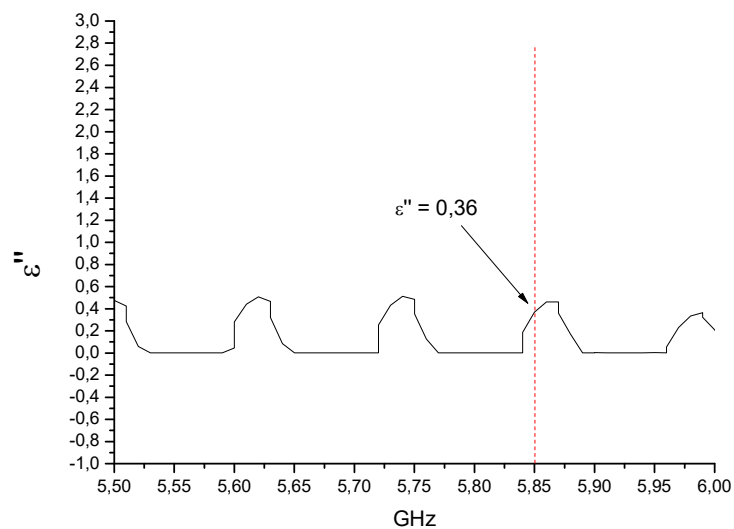


Figura 57: Parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 1  
 Fonte: Autoria própria

A Figura 58 exibe o comportamento da tangente de perdas da mostra 1. O valor mostrado abaixo é compatível para trabalho como dispositivo de micro-ondas.

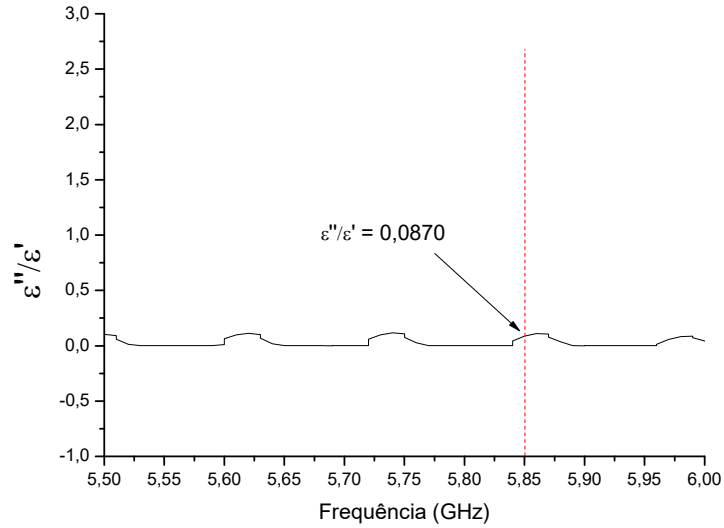


Figura 58: Tangente de perdas da amostra 1  
Fonte: Autoria própria

A amostra 1 obteve maior valor de permissividade observado, o tamanho do *patch* e linha de transmissão são compatíveis com o tamanho da amostra e obteve performance similar ao simulado. Abaixo é demonstrada a antena e seus respectivos detalhes construtivos.



Figura 59: Detalhe construtivo da antena 1  
Fonte: Autoria própria

A medição realizada com o analisador vetorial de redes *Rohde & Schwarz* modelo ZND e sonda DAK 3.5 pode ser visto na Figura 60 abaixo.

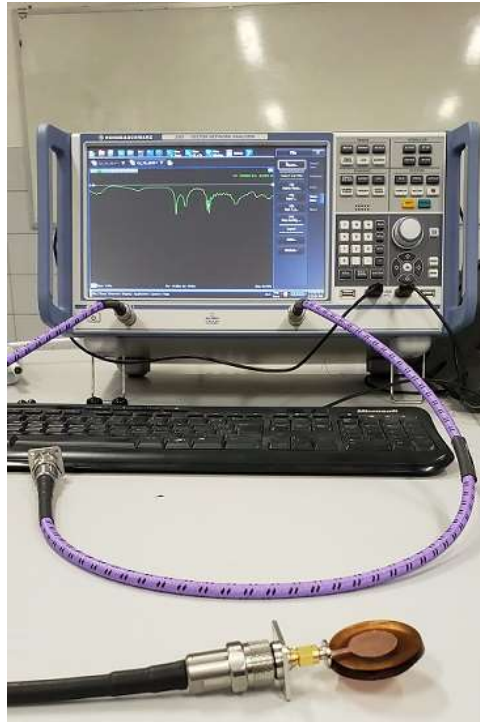


Figura 60: Medição da Antena 1  
Fonte: Autoria própria

Observa-se que, em simulação a antena 1 tem largura de banda (BW) de aproximadamente 1GHz e perda de retorno de aproximadamente -38dB como é mostrado na Figura 61.

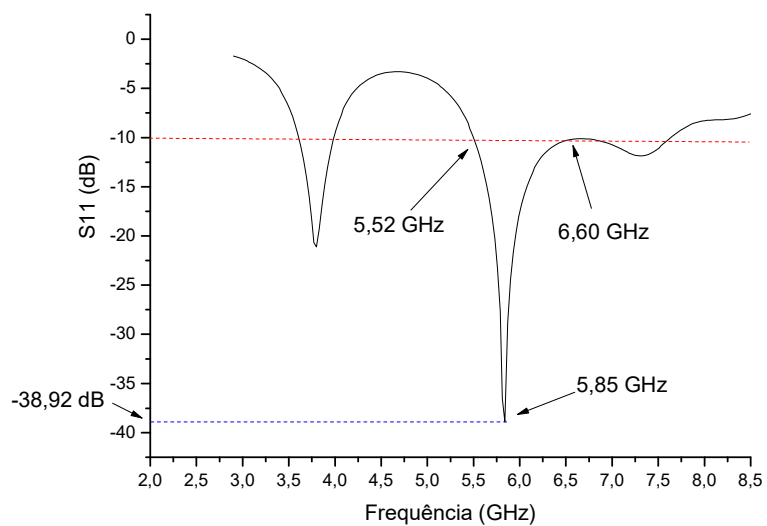


Figura 61: Resultados de perda de retorno e largura de banda simulados da antena 1  
Fonte: Autoria própria

Para o caso medido o comportamento teve mudança. A largura de banda medida é de aproximadamente 280MHz e a perda de retorno de -20dB.

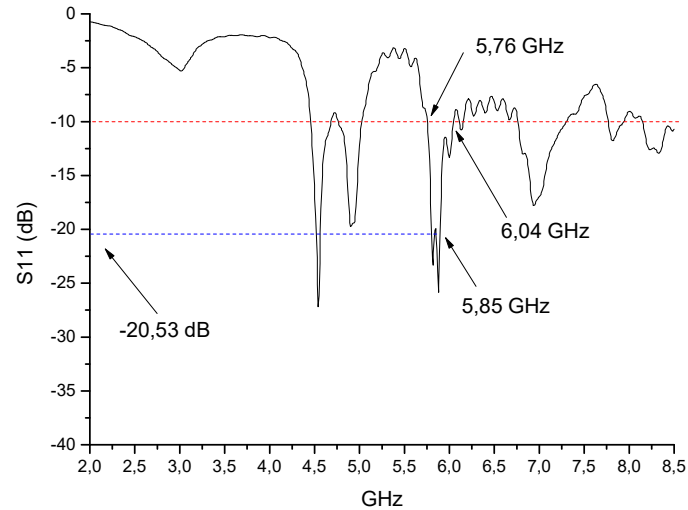


Figura 62: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos da antena 1  
Fonte: Autoria própria

Apesar de serem menores os valores de largura de banda e perda de retorno da antena 1, o comportamento foi semelhante ao comportamento simulado tendo frequência central de acordo com o projeto de 5,85GHz, como é possível ver na Figura 63 abaixo onde é plotada a comparação entre os valores medidos e simulados.

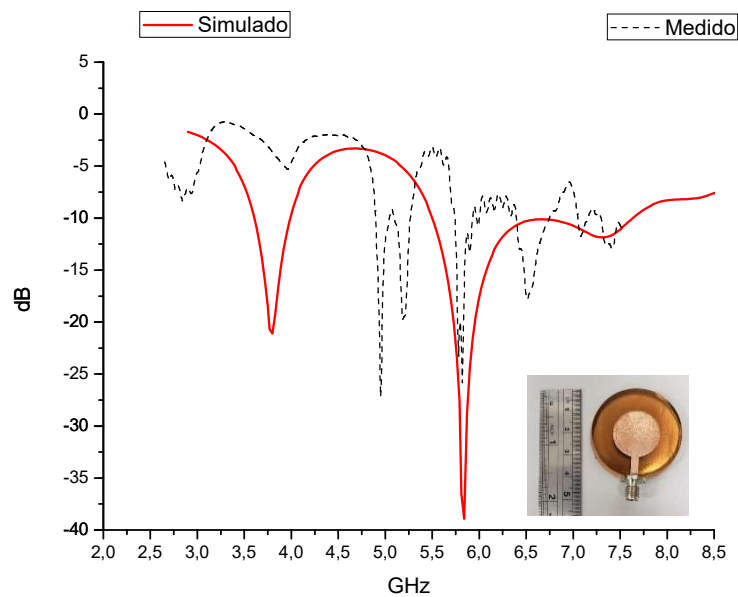


Figura 63: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos versus simulados da antena 1  
Fonte: Autoria própria



Na carta de *Smith* é possível analisar a impedância de entrada da linha de transmissão, o interessante é que este valor esteja mais próximo de  $50\Omega$  para que não haja reflexão de sinal na antena. Abaixo é mostrado o resultado medido da carta de *Smith* desta antena.

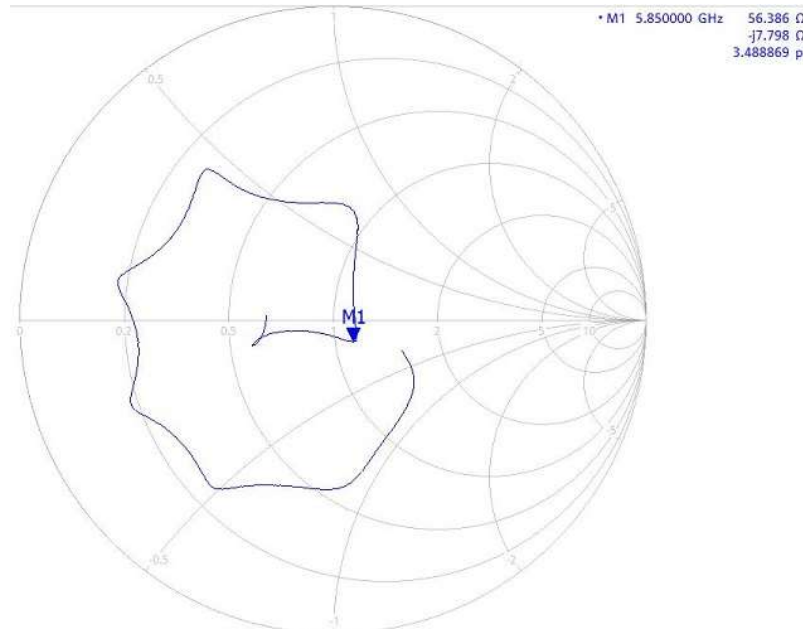


Figura 64: Carta de Smith da antena 1  
Fonte: Autoria própria

É possível observar que o valor da impedância a 5,85GHz é de aproximadamente  $56\Omega$ , o que junto com os comportamentos observados anteriormente de largura de banda e perda de retorno denotam que o dispositivo é operacional na faixa de frequência proposta. A seguir nas Figuras 65 e 66 observam-se os diagramas de radiação 2D e 3D da antena 1.

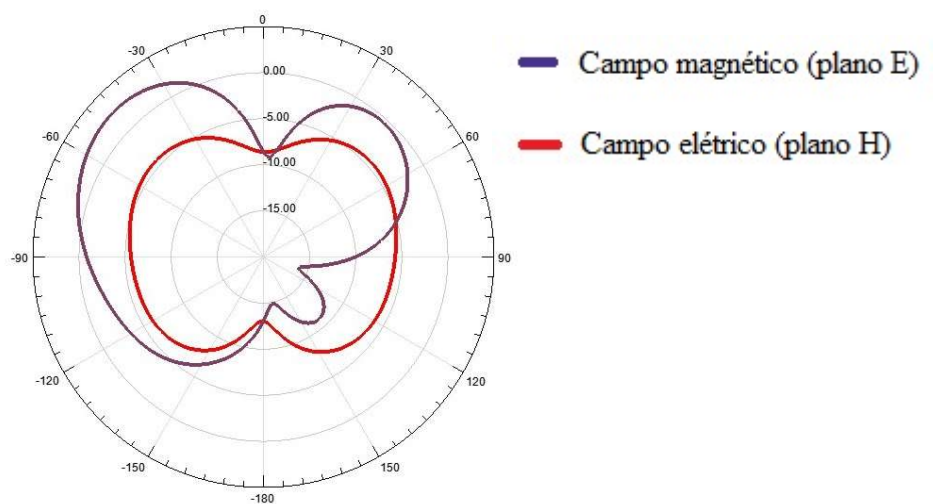


Figura 65: Diagrama de radiação 2D, Plano E e Plano H, da antena 1  
Fonte: Autoria própria

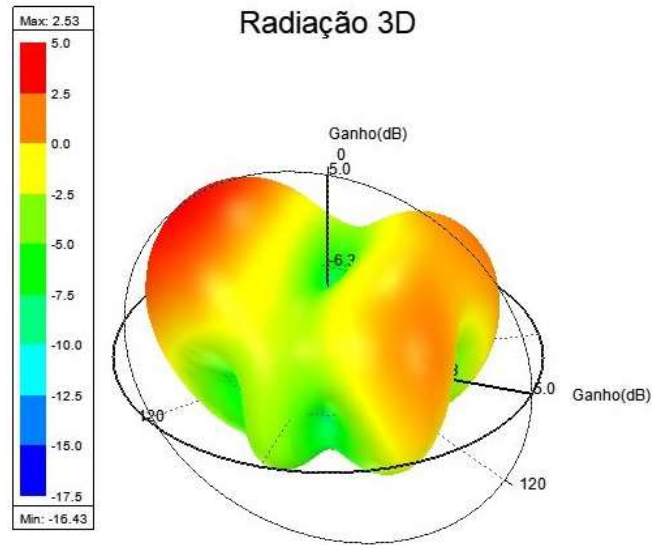


Figura 66: Diagrama de radiação 3D da antena 1  
 Fonte: Autoria própria

Nota-se que está presente a característica *broadside*. Este comportamento é causado devido às dimensões do plano de terra serem iguais às do substrato da antena, provocando a radiação da potência transmitida na direção do vetor normal do plano do patch da antena.

A Figura 67 mostra a densidade linear superficial de corrente da antena 1 simulada. É possível notar que a densidade linear de corrente na antena para ocorrer nas extremidades do *patch* da antena em especial na linha de transmissão, isto ocorre devido ao efeito de franjamento ser mais intenso devido a pequena espessura do local.

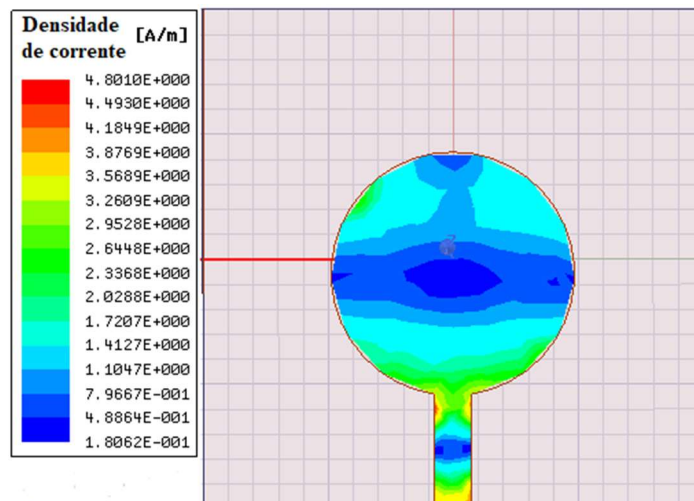


Figura 67: Densidade de corrente simulada da antena 1  
 Fonte: Autoria própria

Amostra 2:

Como foi exposto na seção 6.2.1, na amostra 2 pode-se observar presença bem elevada e cristalina apenas do composto  $\text{SiO}_2$  (dióxido de silício) o que demonstra que a cristalização deste elemento é bem mais rápida que o  $\text{CaCO}_3$  também presente na amostra. Esta amostra tem fase cristalina pequena como é possível observar na Figura 68.

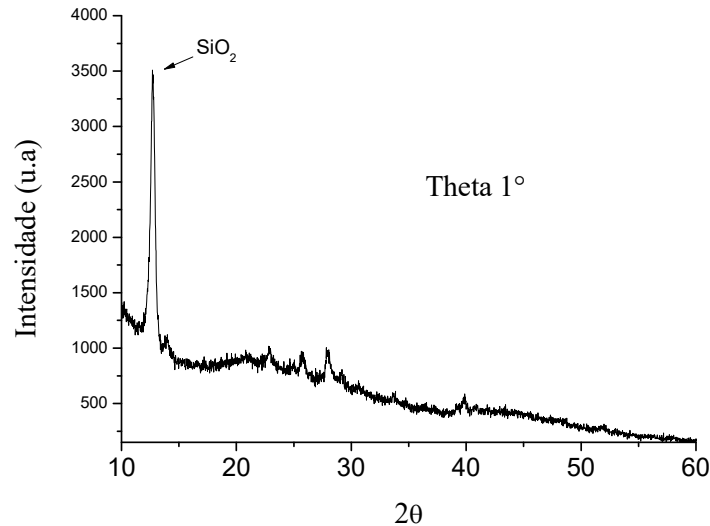


Figura 68: Difractometria de raios x da amostra 2  
Fonte: Autoria própria

Para as características elétricas desta amostra, nota-se que possui valor de permissividade compatível com a operação na faixa de frequência de micro-ondas –  $\epsilon = 4,13$  – como é observado na Figura 69 a seguir.

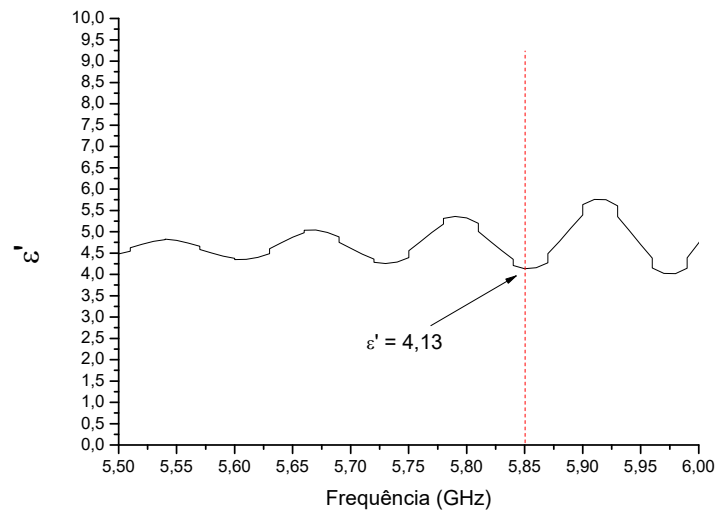


Figura 69: Parte real da permissividade elétrica da amostra 2  
Fonte: Autoria própria

A parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 2 observada na Figura 70, teve variação padronizada ao longo da faixa de 1GHz até 8,5GHz, assim como ocorreu na amostra 1.

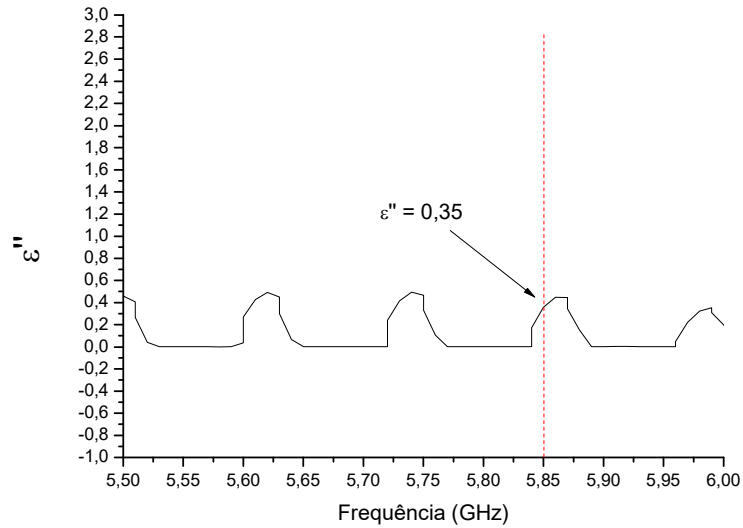


Figura 70: Parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 2  
Fonte: Autoria própria

A Figura 71 exibe o comportamento da tangente de perdas da amostra 2. O valor mostrado abaixo é compatível para trabalho como dispositivo de micro-ondas e seu comportamento é semelhante ao da amostra 1.

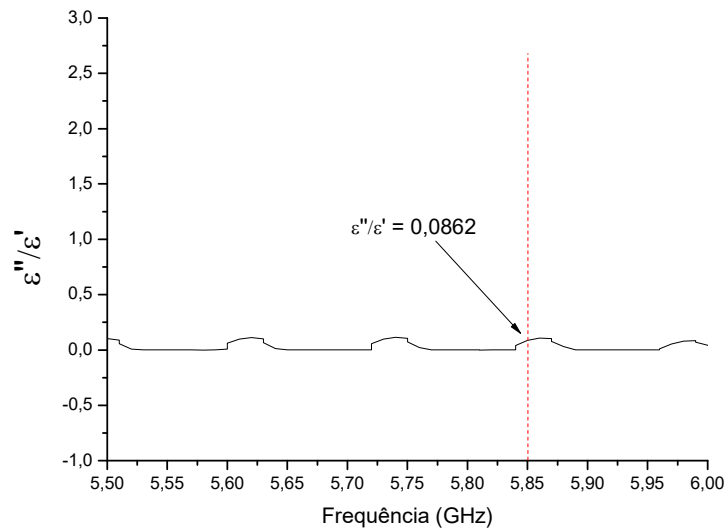


Figura 71: Tangente de perdas da amostra 2  
Fonte: Autoria própria

A antena 2 obteve valor de permissividade próximo ao observado na antena 1, o tamanho do *patch* e linha de transmissão são compatíveis com o tamanho da amostra e obteve performance similar ao simulado. Abaixo é demonstrada a antena e seus respectivos detalhes construtivos.

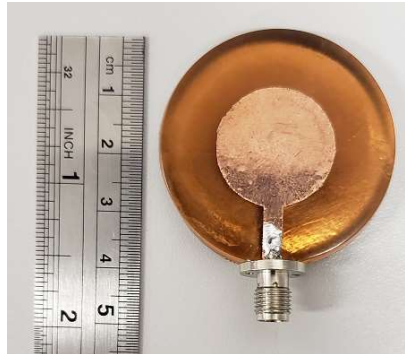


Figura 72: Detalhe construtivo da antena 2  
Fonte: Autoria própria

A medição realizada, assim como na antena 1 foi feita com o analisador vetorial de redes *Rohde & Schwarz* modelo ZND e sonda DAK 3.5 como pode ser visto na Figura 73 abaixo.



Figura 73: Medição da antena 2  
Fonte: Autoria própria

Observa-se que, em simulação a antena 2 tem largura de banda (BW) de 960MHz e perda de retorno de -36dB, valores bem próximos ao projeto da antena 1. Na Figura 74 abaixo, são demonstrados a largura de banda (BW) e perda de retorno desta antena.

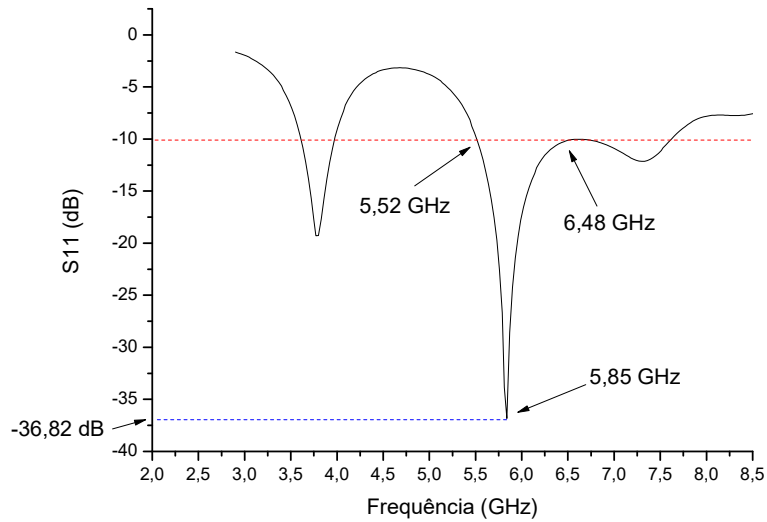


Figura 74: Resultados de perda de retorno e largura de banda simulados da antena 2  
Fonte: Autoria própria

Para o caso medido o comportamento também teve mudança. A largura de banda obteve valor menor que os simulados, porém maior perda de retorno. A largura de banda medida é de aproximadamente 170MHz e a perda de retorno de -40dB mostrados na Figura 75.

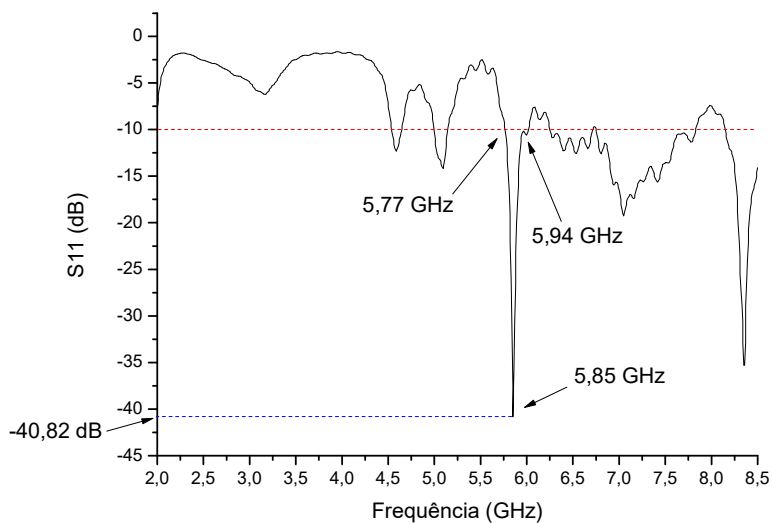


Figura 75: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos da antena 2  
Fonte: Autoria própria

Apesar da diferença nos valores de largura de banda e perda de retorno da antena 2, o comportamento foi semelhante ao comportamento simulado tendo frequência central de acordo com o projeto de 5,85GHz, como é possível ver na Figura 76 abaixo onde é plotada a comparação entre os valores medidos e simulados.

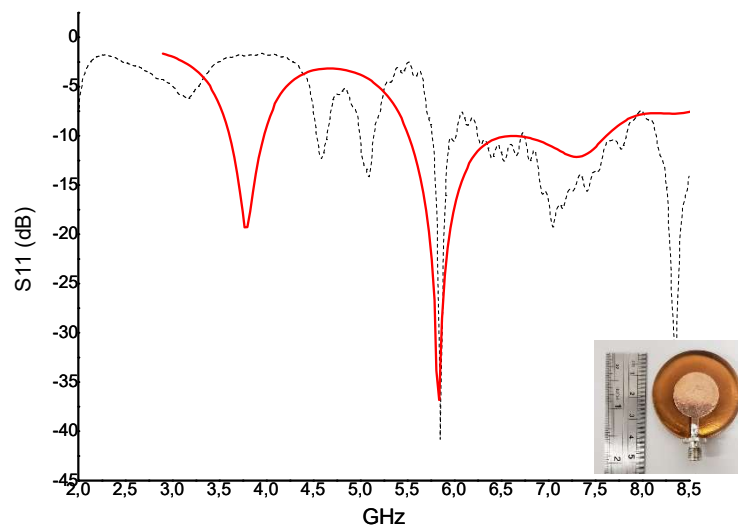


Figura 76: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos *versus* simulados da antena 2

Fonte: Autoria própria

É possível observar que o valor da impedância a 5,85GHz é de aproximadamente  $50\Omega$ , o que junto com os comportamentos observados anteriormente de largura de banda e perda de retorno denotam que o dispositivo é operacional na faixa de frequência proposta.

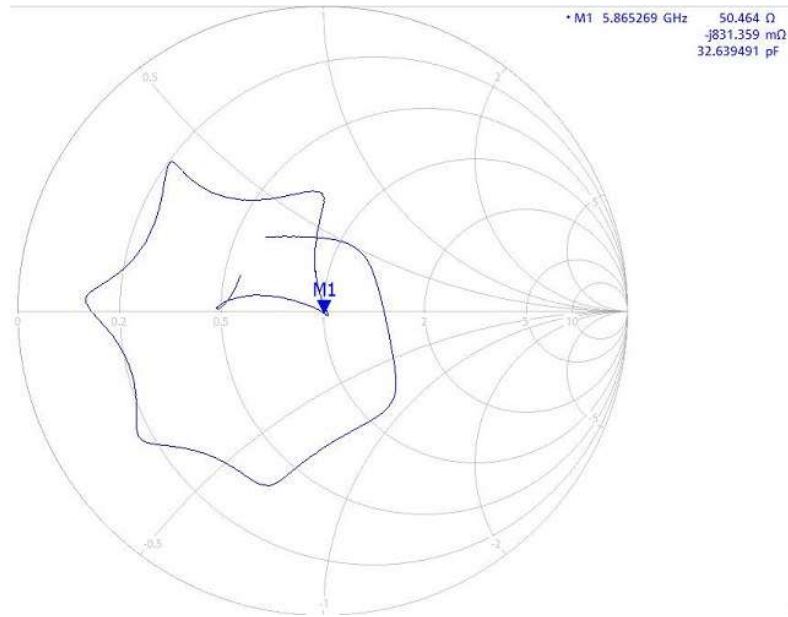


Figura 77: Carta de Smith da antena 2  
 Fonte: Autoria própria

As Figuras 78 e 79 a seguir mostram os diagramas de radiação 2D (Plano E e Plano H) e 3D da antena 2. É possível notar que também está presente a característica *broadside* assim como na antena 1.

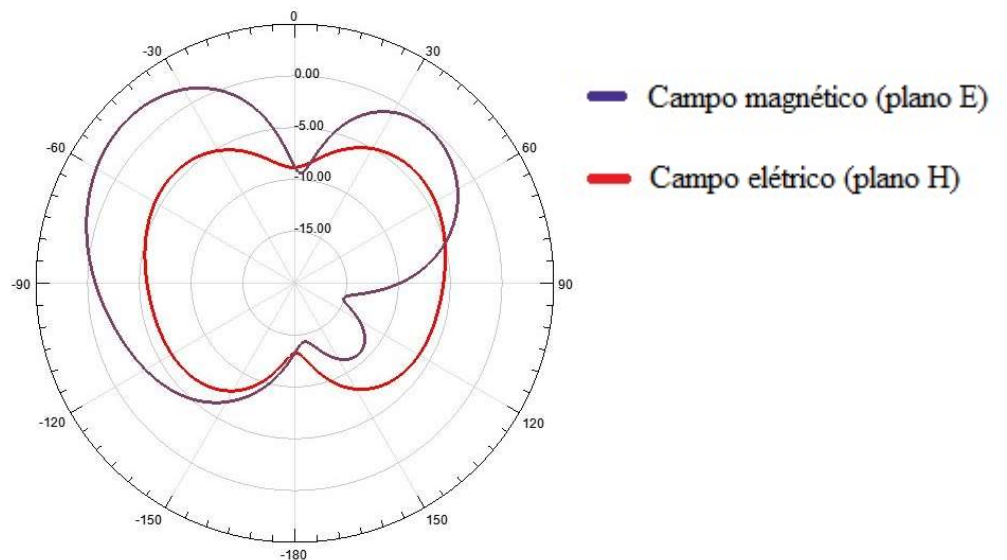


Figura 78: Diagrama de radiação 2D, Plano E e Plano H, da antena 2  
 Fonte: Autoria própria



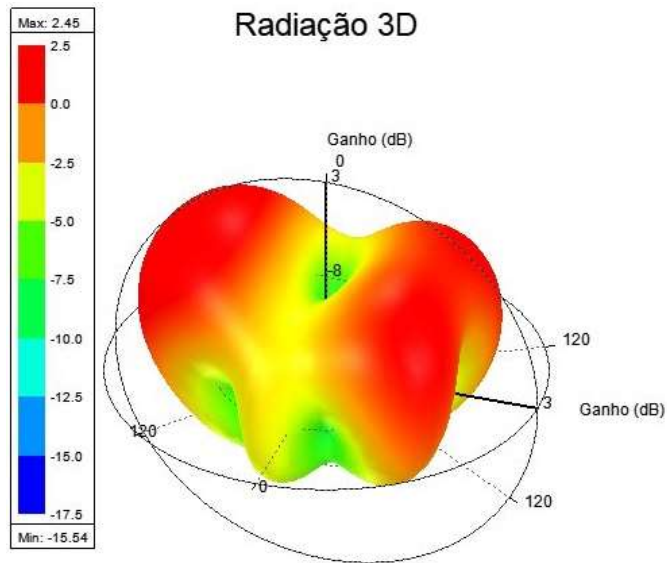


Figura 79: Diagrama de radiação 3D da Antena 2  
 Fonte: Autoria própria

A Figura 80 mostra a densidade linear superficial de corrente, simulada, da antena 2. É possível notar semelhanças com a antena 1 em que a densidade linear de corrente na antena para ocorre nas extremidades do *patch* da antena em especial na linha de transmissão, isto ocorre devido ao efeito de franjamento ser mais intenso devido a pequena espessura do local.

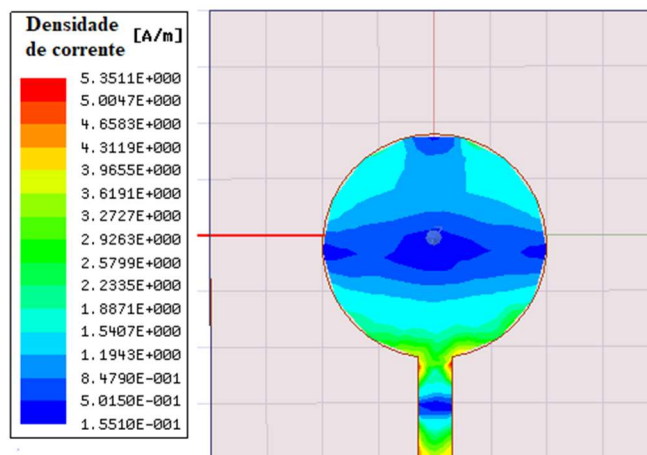


Figura 80: Densidade de corrente simulada da antena 2  
 Fonte: Autoria própria

Amostra 3:

Foi observado na seção 6.2.1 que a amostra 3 tem presença de dois tipos de cristal, o cristal  $\text{SiO}_2$  e o cristal  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$ , visto na Figura 81 a seguir.

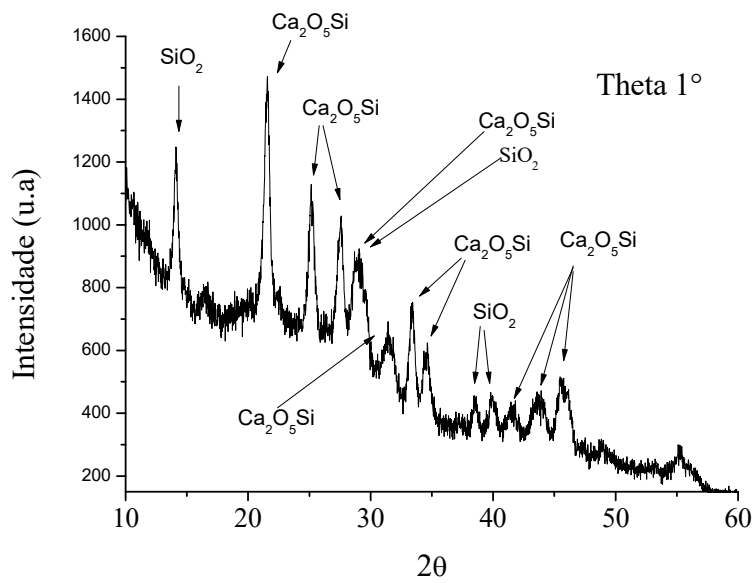


Figura 81: Difractometria de raios x da amostra 3  
 Fonte: Autoria própria

Para as características elétricas desta amostra, nota-se que possui valor de permissividade compatível com a operação na faixa de frequência de micro-ondas –  $\epsilon = 3,01$  – como é observado na Figura 82 a seguir.

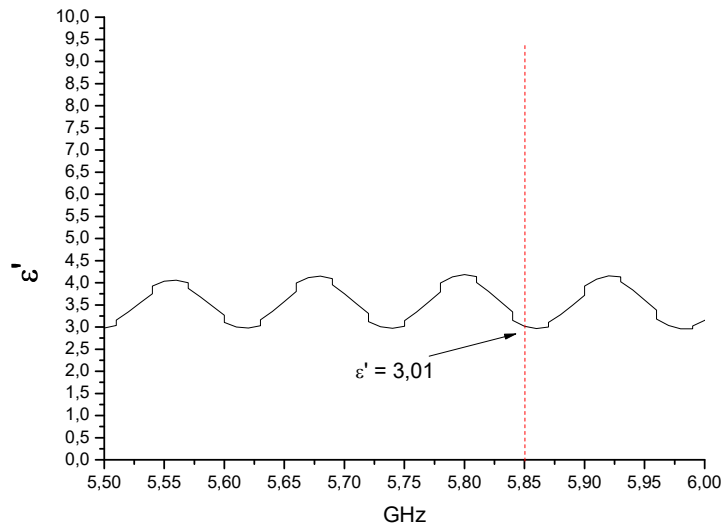


Figura 82: Parte real da permissividade elétrica da amostra 3  
 Fonte: Autoria própria

A parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 3 observada na Figura 83, teve comportamento variante ao longo da faixa de 1GHz até 8,5GHz, sendo diferente das amostras 1 e 2 mostrados anteriormente neste capítulo.

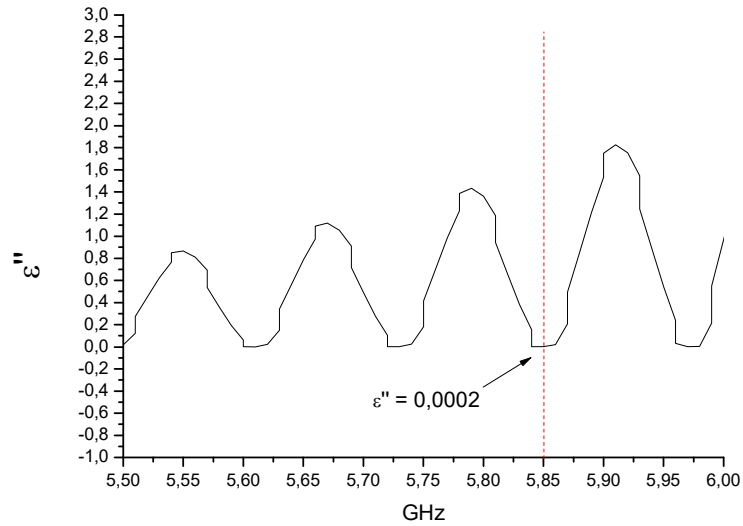


Figura 83: Parte imaginária da permissividade elétrica da amostra 3  
 Fonte: Autoria própria

A Figura 84 exibe o comportamento da tangente de perdas da mostra 3. O valor mostrado abaixo é compatível para trabalho como dispositivo de micro-ondas porém seu valor foi menor que o das outras duas amostras porém com comportamento semelhante ao longo da faixa de frequência estudada.

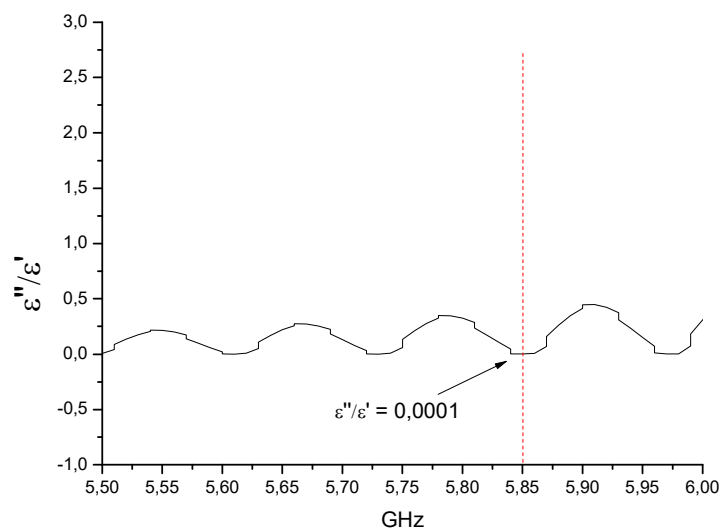


Figura 84: Tangente de perdas da amostra 3  
 Fonte: Autoria própria

A antena 3 obteve menor valor de permissividade observado dentre todos os projetos, o tamanho do *patch* e linha de transmissão também são compatíveis com o tamanho da amostra e obteve performance similar ao simulado. Abaixo é demonstrada a antena e seus respectivos detalhes construtivos.



Figura 85: Detalhe construtivo da antena 3  
Fonte: Autoria própria

A medição realizada, assim como nas antenas anteriores foi feita com o analisador vetorial de redes *Rohde & Schwarz* modelo ZND e sonda DAK 3.5 como pode ser visto na Figura 86 abaixo.

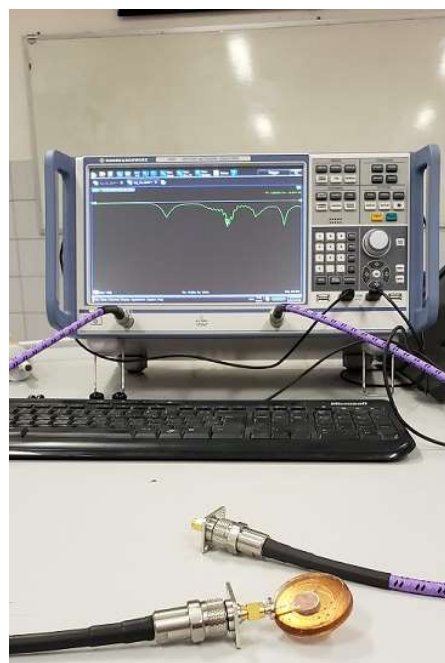


Figura 86: Medição da antena 3  
Fonte: Autoria própria

Observa-se que, em simulação a antena 3 tem largura de banda (BW) de aproximadamente 400MHz e perda de retorno de -25dB, valores não próximos aos outros dois projetos anteriores. Na Figura 87 abaixo, são demonstrados a largura de banda (BW) e perda de retorno desta antena.

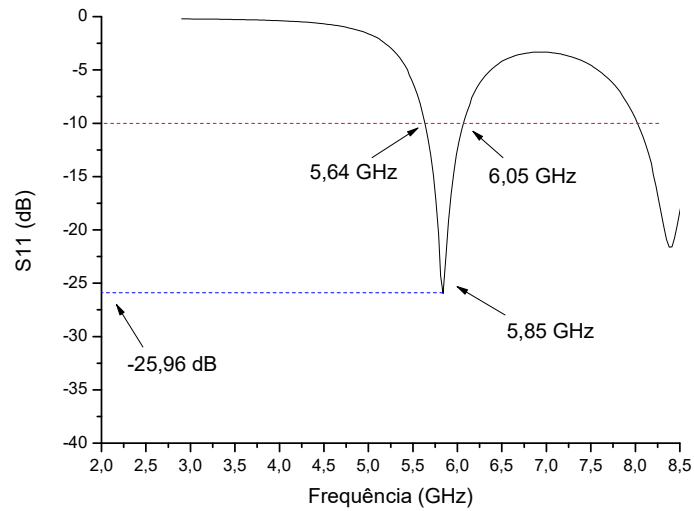


Figura 87: Resultados de perda de retorno e largura de banda simulados da antena 3  
Fonte: Autoria própria

Para o caso medido o comportamento praticamente não teve mudança. A largura de banda e perda de retorno medidos são praticamente iguais aos simulados, aproximadamente 400MHz e a perda de retorno de -25dB, respectivamente, como é possível observar na Figura 88.

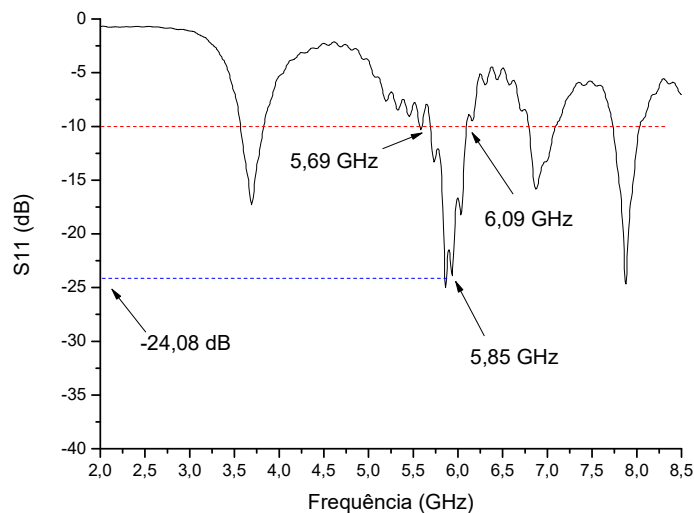


Figura 88: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos da antena 3  
Fonte: Autoria própria

Como foi observado nos gráficos anteriores o comportamento foi semelhante ao comportamento simulado tendo frequência central de acordo com o projeto de 5,85GHz, como é possível ver na Figura 89 abaixo onde é plotada a comparação entre os valores medidos e simulados.

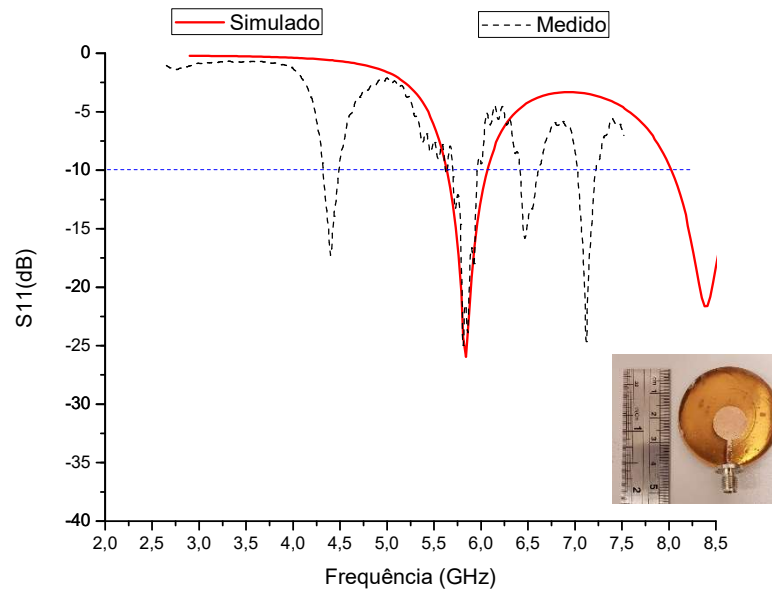


Figura 89: Resultados de perda de retorno e largura de banda medidos *versus* simulados da antena 3  
 Fonte: Autoria própria

É possível observar que o valor da impedância a 5,85GHz é de aproximadamente  $45\Omega$ , o que junto com os comportamentos observados anteriormente de largura de banda e perda de retorno denotam que o dispositivo também é operacional na faixa de frequência proposta.

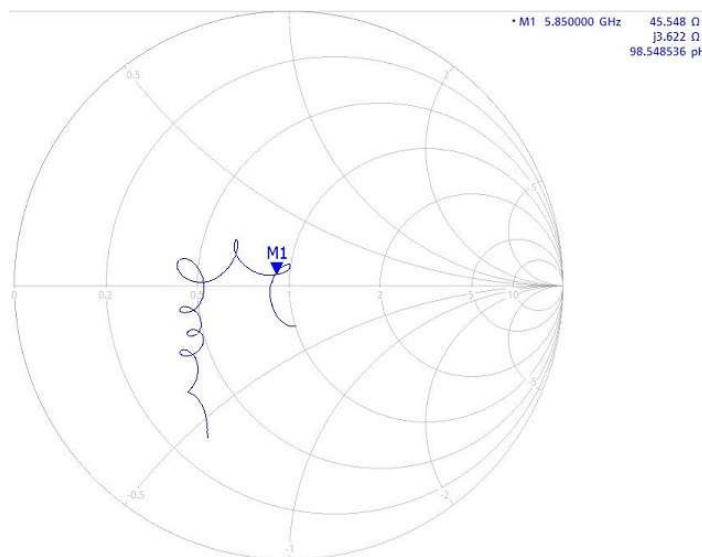


Figura 90:Carta de Smith da antena 3



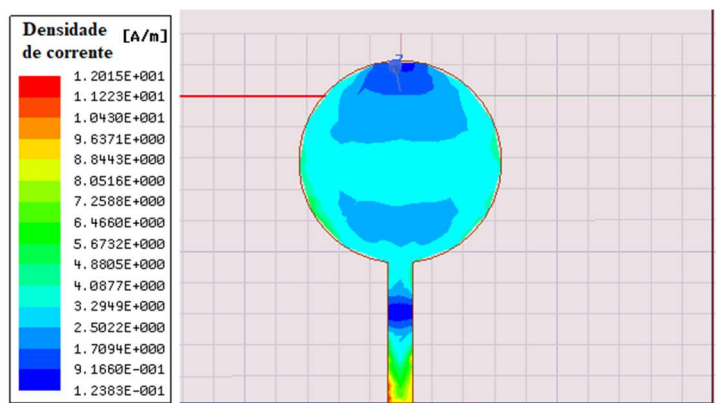


Figura 93: Densidade de corrente simulada da antena 3  
Fonte: Autoria própria

É possível notar semelhanças com as antenas 1 e 2 em que a densidade linear de corrente na antena para ocorre nas extremidades do *patch* da antena em especial na linha de transmissão, isto ocorre devido ao efeito de franjamento ser mais intenso devido a pequena espessura do local.

Por fim, é possível observar a comparação entre a perda de retorno das 3 antenas na Figura 94.

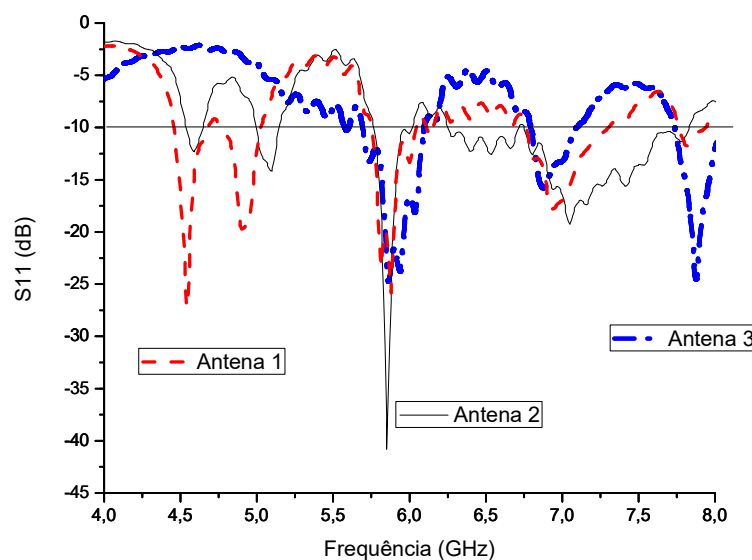


Figura 94: Comparação de perda de retorno das antenas 1, 2 e 3  
Fonte: Autoria própria

É visto que a antena que possui maior perda de retorno é a antena 2 com valor de -40dB em detrimento dos valores de -20dB e -24dB das antenas 1 e 3 respectivamente. É interessante destacar também que todas as antenas obedeceram ao critério de projeto para operação na



frequência estabelecida de 5,85GHz o que denota estas amostras como possível material para dispositivos de micro-ondas, como por exemplo substrato de antenas de microfita que foi a proposta desta pesquisa.

## 8 CONCLUSÕES

Nas etapas de caracterização do material estudado foi possível obter os parâmetros essenciais para o desenvolvimento da fase de projeto e simulação, que, por sua vez, permitiu a correlação dos parâmetros de operação da antena dimensionada com as propriedades elétricas e químicas de cada amostra.

Desta forma, diante desses resultados foi possível construir os protótipos e testá-los posteriormente. Com a relação observada entre os valores de permissividade elétrica relativa e os parâmetros de fabricação das amostras foi possível constatar que as propriedades de cristalografia observada mediante variação no tempo de resfriamento, influenciam na performance dos dispositivos modificando assim as características de projeto de cada antena.

Diante destas observações dos resultados experimentais, foi possível constatar a possibilidade de utilizar o *blend* de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  proposto como substrato de antenas de microfita individualmente. Apesar de terem comportamentos distintos e permissividade elétrica  $\epsilon$  diferente em alguns casos, todas as amostras operaram bem na região da banda C em 5,85GHz.

Quanto à caracterização química e sua influência na performance dos dispositivos, as amostras 1 e 2 tiveram comportamento bastante semelhante com fase cristalina bem pequena e sem a presença do composto  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$  presente apenas na amostra 3, isso se refletiu no comportamento elétrico destas duas amostras que foi bem semelhante com respostas de largura de banda e perda de retorno similares, bem como as dimensões da antena.

Na antena que utilizou a amostra 3 foi observada a presença do composto  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$  que influenciou as características elétricas desta amostra, amostra esta que teve maior tempo de cristalização. Assim, por consequência pode-se concluir que os maiores tempos de cristalização facilitam a entrada do Cálcio (Ca) na rede cristalina do Silício (Si) o que é benéfico para o dispositivo pois, apesar de a permissividade ser aproximadamente 28% menor, teve sua tangente de perdas reduzidas a um valor próximo de zero ( $\epsilon''/\epsilon' = 0,0001$ ) que é interessante para os projetos que operam na faixa de micro-ondas. Se comparado as outras duas, a presença deste composto fez com que a antena da amostra 3 tivesse a menor das dimensões e pouca variação de comportamento medido *versus* simulado para largura de banda e perda de retorno, demonstrando assim ser o melhor substrato para esta aplicação.

Desta forma é possível concluir que os resultados obtidos neste trabalho foram satisfatórios, uma vez que o *blend* proposto de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  se mostrou eficaz em todos os modos analisados sendo assim compatíveis para o trabalho como dispositivo de micro-ondas.

## 9 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das observações feitas neste trabalho, ficam como sugestão para os próximos trabalhos:

- Analisar maiores tempos de cristalização e observar a presença do composto  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$  e sua influência no comportamento elétrico das amostras;
- Fazer microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras;
- Estudar a aplicação deste tipo de material para o desenvolvimento de outros tipos de dispositivos de micro-ondas;
- Testar temperaturas diferentes de fusão das amostras;
- Dopar o material com outros compostos à base de Cálcio (Ca) e observar a formação do composto  $\text{Ca}_2\text{O}_5\text{Si}$  e o comportamento elétrico das amostras;

## REFERÊNCIAS

- AQUINO, B. L. A. “**Antenas de Microfita com Substrato Metamaterial**”. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2008.
- BALANIS, C. A. “**Antenna theory analysis and design**”. Nova York. John Wiley & Sons. 2005.
- BELATO, Mariana Natale. “**Análise da geração de poluentes na produção de cimento portland com o coprocessamento de resíduos industriais**”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2013.
- BERNAL, José Ignacio Marulanda. “**Dispositivos de Micro-ondas Utilizando Filmes de Alta Constante Dielétrica**”. Rio de Janeiro. Tese de doutorado. 2010.
- BERNARDO, A. C. S. M. “**Otimização estocástica multi-objetivos na produção de cimento Portland com coprocessamento de resíduos e adição de mineralizadores**”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2009.
- BOCH P., NIEPCE J. C., “**Ceramic Materials Processes, Properties and Applications**”. 2007.
- BRITO, Bruno Marcel de Carvalho, “**Desenvolvimento de antena de microfita baseada no fractal de cantor com plano de terra truncado**”. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da UFRSA. Mossoró. 2018.
- CALLISTER JR. William D. “**Materials science and engineering: an introduction**”. 7 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2007.
- CARTER. C. Barry, NORTON. M. Grant. “**Ceramic Materials - Science and Engineering**”. Springer, 2007.
- CARVER, K.; MINK, J. “**Microstrip antenna technology**”. IEEE transactions on antennas and propagation, IEEE, v. 29, n. 1, p. 2–24, 1981.
- CHEN, Y., CHEN, L., YU, J., SHI, X., MEMBER, S. “**A C -Band Flat Lens Antenna With Double-Ring Slot Elements**”. Antennas and Wireless Propagation Letters. vol. 12, pp. 341–344. 2013.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria, “**Indústria brasileira de cimento**” Encontro da Indústria para a Sustentabilidade. Brasília. 2012.
- DESHMUKH, A. A. “**Crescent Shape Microstrip Antenna for Dual polarized Multi-band Response**”. Vol. 18, no. 1, pp. 18–32, 2019.
- DIALLO. A. O., CZARNY. R., LOISEAUX. B., HOLÉ. S., “**Comparison between a thin lens antenna made of structured dielectric material and a conventional lens antennas, in**

**Q - band in a compact volume**". Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 1225, no. 2, pp. 9–12, 2017.

DIONÍSIO DE ANDRADE, Humberto. **“Desenvolvimento de um ressoador retangular de fenda com múltiplas camadas de substrato e com utilização material PBG para sistemas de comunicação sem fio”**. Natal, 2013, 100 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

EDWARDS, P. **“Global Cement Top 100 Report 2017 - 2018”**. Global Cement Magazine. 2017.

EDWARDS, Terry. STEER, Michael. **“Foundations for Microstrip Circuit Design”**. John Wiley & Sons. Inglaterra. 2016.

ELETROMAGNETISMO. **MSPC Engenharia**, 2020. Disponível em: <[https://www.mspc.eng.br/dir10\\_ndx.php](https://www.mspc.eng.br/dir10_ndx.php)>. Acesso em: 01 de dezembro de 2019.

FILHO, Ranilson C. **“Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO4 para antenas de microfita de sistemas de comunicação sem fio”**. Natal, 2010, 98 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

FONSECA, N. J. G., SOMBRIN, J. **“Multi-Beam Reflector Antenna System Combining Beam Hopping and Size Reduction of Effectively Used Spots”**. Antennas and Propagation Magazine, vol. 54, 2012.

GODARA. L. C. **“Handbook of Antennas in Wireless Communications”**. Nova York. 2002.

GURGEL, Diêgo Pires. **“Estudo e desenvolvimento de material absorvedor de micro-ondas baseado em Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com Mo via metalurgia do pó”**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da UFERSA. Mossoró, 2016.

HAN, Y. **“Dual-Band Spiral Printed Quadrifilar Helical Antenna Miniaturized by Surface and Inner Dielectric Loading”**. vol. 7, 2019.

HOLANDA S. M. DE, **“Estudo e desenvolvimento de antenas de microfita utilizando tecido de malha a base de fibras têxteis compostas”**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da UFERSA. 2016.

HUANG, G. C., ISKANDER, M. F., HOQUE, M., GOODALL, S. R., BOCSKOR, T. **“Antenna Array Design and System for Directional Networking”**. Antennas Wireless Propagation Letters, 2015.

**JOURNAL OF ENGINEERING, COMPUTERS & APPLIED SCIENCES (JEC&AS)**  
Vol. 2, Nº 6, junho 2013.

KERR, J. L. **“Microstrip polarization techniques. In: Annales d’Astrophysique”**. [S.l.: s.n.], 1978.

KRETLY, L. C.; ALMEIDA, A. F. L.; FECHINE, P. B. A.; DE OLIVEIRA, R. S. **“Dielectric permittivity and loss of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (CCTO) substrates for microwave devices and antenas”**. Journal of materials science: materials in electronics. [s.l]: n. 15, p. 657-663, 2004. Artigo.

KUMAR, Girish; RAY, K. P. **“Broadband Microstrip Antennas”**. Boston: Artech House, 2003. Ltd. Pro Global Media. **“Global Cement Magazine”**. Ed. Janeiro. 2019.

MOLDSVOR, A., KILDAL, P. S. **“Analysis of aperture blockage in reflector antennas by using obstacle-located blockage currents”**. Antennas Propagation. vol. 40, no. 1, pp. 100–102, 1992.

MUNSON, R. **“Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays”**. IEEE Transactions on Antennas and propagation, IEEE, v. 22, n. 1, p. 74–78, 1974.

NAGASAKA, M., NAKAZAWA, S., TANAKA, S., **“Prototype of a Dual-Circularly Polarized Parabolic Reflector Antenna with Microstrip Antenna Array for 12-GHz Band Satellite Broadcasting Reception”** Science & Technology Research Laboratories. Japão. 2016.

PEREIRA, Thomas Tadeu de Oliveira **“Estudo e desenvolvimento de antena de microfita aplicada à veículos aéreos não tripulados para inspeção em linhas de transmissão”**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da UFERSA. Mossoró. 2018.

PETOSA, A., GAGNON, N., ITTIPIBOON, A., **“Effects of Fresnel lens thickness on aperture efficiency”**. Symp. Antenna Techniques and applications EM e URSI Conf. 2004.

RATHOD, S. M. Awale, R. N and Ray, K. P. **“A 50  $\Omega$  Microstrip Line Fed Shorted Hexagonal Microstrip Antennas with Reduced”**. Vol. 18, no. 2, 2019.

SADIKU, M. N. O. **“Elementos de eletromagnetismo”**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SAMPAIO, S. L. M. ALMEIDA, J. A. **“Calcário e Dolomito”**. Rochas e Minerais Ind., pp. 363–391, 2008.

SANTOS, R. C. **“Estudo da interferência de uma metasuperfície no desempenho das antenas de microfita”**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da UFRN. Natal, 2016.

SARKAR, S. **“Design of a Compact Microstrip Antenna using Application”** Int. J. Sci. Res. Publ., vol. 3, no. 6, pp. 1–5, 2013.

SOUZA, Danilo de. **“Uso do pentóxido de Nióbio para aplicação como substrato de antena de microfita”**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica da UFERSA. Mossoró. 2015.

SOUZA, Jorge A. Mitriane. **“Efeitos do Uso de Substrato de Alta Permissividade Dielétrica em Diversos Tipos de Antenas de Micro-ondas”**. Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2014.

TOMAZ, Antonio & Barroso, Joaquim & J. Castro, P & J. Faro Orlando, Alberto. **“Experimental investigation on the radiation pattern of a horn antenna loaded by a wire médium”**. IEEE International Symposium Antennas and Propagation and National Radio Science Meeting (APS-URSI), Orlando, 2013.

TOMAZ, A. **“Estudo de uma Antena Corneta Acoplada a uma Estrutura de Dielétrico Artificial”** 16º SBMO - Simpósio Bras. micro-ondas e optoeletrônica, pp. 329–333, 2014.

VAN VLACK, LAWRENCE H. **“Princípio de Ciência dos Materiais”**. Departamento de Engenharia Química e Metalúrgica. Universidade de Michigan, 13ed, 2000.

VILAR, R., CZARNY, R., LEE, M. S. L., LOISEAUX, B., SYPEK, M., MAKOWSKI M., MARTEL, C., CREPIN, T., BOUST, F., JOSEPH, R., HERBERTZ, K., BERTUCH, T., MARTI, J., **“Q-Band Millimeter-Wave Antennas: An Enabling Technology for MultiGigabit Wireless Backhaul”** IEEE Microw. Mag., vol. 15, no. 4, pp. 121–130. 2014.

YARMAN, Binboga Siddik. **“Design of Ultra Wideband Antenna Matching Networks: Via Simplified Real Frequency Technique (Signals and Communication Technology)”**. Istanbul: Springer, 2008.

YANG, Z., JINGHUI, Q., LIN, S., **“Design of a Novel Ultrawideband Wire Antenna”**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 11, pp. 624–627, 2012.

ZARIFI, D., FARAHBAKHSI, A., ZAMAN, A. U., **“A Ridge Gap Waveguide Fed Aperture-Coupled Microstrip Antenna Array for 60 GHz Applications”**, European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), vol. 1, pp. 953–955, 2017.

ZHU, Y. S. Baoqing, LIU, X. Y. Xinrong. **“CaCO<sub>3</sub>-Templated Microcapsules to Carry Heparin via Layer-by-layer Self-assembly”**. China. 2009.