



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

CARLOS EDUARDO CHAVES CAVALCANTE

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DA CERA DE CARNAÚBA PARA
APLICAÇÃO NA FAIXA DE FREQUÊNCIA MICRO-ONDAS COMO SUBSTRATO DE
ANTENAS DE MICROFITA

MOSSORÓ

2019

CARLOS EDUARDO CHAVES CAVALCANTE

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DA CERA DE CARNAÚBA PARA
APLICAÇÃO NA FAIXA DE FREQUÊNCIA MICRO-ONDAS COMO SUBSTRATO DE
ANTENAS DE MICROFITA

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

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior, Prof. Dr.

Co-orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O 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 Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C376c Cavalcante, Carlos Eduardo Chaves.
Caracterização de Propriedades da Cera de
Carnaúba para Aplicação na Faixa de Frequência
Micro-ondas como Substrato de Antenas de
Microfita / Carlos Eduardo Chaves Cavalcante. -
2019.
94 f. : il.

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

1. Substrato dielétrico. 2. Cera de carnaúba.
3. Permissividade elétrica. 4. Tangente de
perdas. 5. Material orgânico. I. Queiroz Júnior,
Idalmir de Souza, orient. II. Fraga, Francisco
Edson Nogueira, 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.

CARLOS EDUARDO CHAVES CAVALCANTE


CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DA CERA DE CARNAÚBA PARA
APLICAÇÃO NA FAIXA DE FREQUÊNCIA MICRO-ONDAS COMO SUBSTRATO DE
ANTENAS DE MICROFITA

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

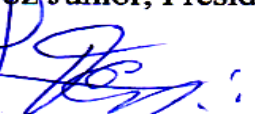
Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

Defendida em: 26 / 02 / 2019.


BANCA EXAMINADORA



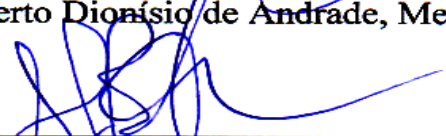
Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, Presidente e Orientador (UFERSA)



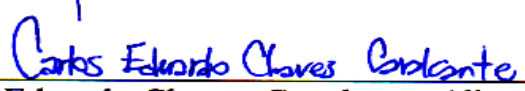
Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga, Co-Orientador (UFERSA)



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade, Membro Interno (UFERSA)



Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra, Membro Externo (UFC)



Carlos Eduardo Chaves Cavalcante (discente)

Ao meu avô, Carlos Galdino da Silva (In Memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado forças para enfrentar todos os problemas pessoais que surgiram durante este período de especialização e por ter me dado o dom da vida.

Agradeço aos bons espíritos que me guiaram para o caminho do bem, e me mostraram que tudo é possível, mesmo que muitas atribulações tentassem me impedir de caminhar na direção certa.

Agradeço aos meus pais, avó e irmãos, que por mais difícil que seja, nunca me deixaram faltar nada.

Agradeço ao meu Orientador Idalmir, por ter me acolhido e me motivado de uma forma incrível.

Agradeço à Banca Examinadora, que me ajudou a melhorar este trabalho, que há dois anos tenho me dedicado.

Agradeço a todos os meus amigos que de alguma forma contribuíram para levantar meu astral e mostrar o quão esforçado e batalhador eu sou.

Agradeço aos colegas de mestrado, do PPGEE, e aos professores da vida que me ajudaram a alcançar bons resultados.

“Ninguém vai bater mais forte do que a vida. Não importa como você bate e sim o quanto aguenta apanhar e continuar lutando; o quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.”.

Rocky Balboa

RESUMO

Devido ao grande avanço tecnológico, o estudo para o desenvolvimento de novos materiais para aplicações diversas torna-se uma área de grande interesse, principalmente no que concerne a limitações de matéria prima. Para a área de tecnologia, o estudo de novos materiais para aplicações diversas, sejam elas através de dopagem ou de misturas de compósitos, é uma das vertentes mais importantes. E, acreditando na abundância da cera de carnaúba proveniente de uma espécie de palmácea, a carnaubeira, que, por ser destaque na região Nordeste do Brasil, e possuir relevância social, econômica e cultural no cenário do semiárido nordestino, este trabalho aborda a aplicação da cera de carnaúba como substrato de antenas de microfita. Realizou-se a caracterização elétrica desta cera, bem como a caracterização química e mecânica. A amostra foi produzida a partir do aquecimento da cera de carnaúba sólida (produto proveniente do beneficiamento das folhas) através de um agitador magnético, no qual se adquiriu uma estrutura sólida cilíndrica para a realização das caracterizações do material. Diante disso, as caracterizações servirão como base de análise para aplicações do material orgânico em dispositivos que operem na faixa de frequência micro-ondas, a qual as antenas de microfita funcionam. A caracterização elétrica foi realizada através do método de transmissão/reflexão por sonda coaxial. As caracterizações mecânicas foram realizadas para a observação do material quando submetido a esforços de compressão diametral através da correlação digital de imagens e o método utilizado para a quantificação da microdureza foi a técnica Vickers. Estas caracterizações permitirão obter valores suficientes para o objetivo proposto. As antenas foram dimensionadas através dos modelos de cavidade e de linha de transmissão em programa desenvolvido na linguagem Fortran a partir das medidas de permissividade relativa e tangente de perdas. O desenho e a simulação foram feitos no *HFSS*[®] (*High Frequency Structural Simulator*) para a obtenção dos diagramas de radiação (2D e 3D), perda de retorno e ganho. Os resultados simulados foram implementados para a construção das antenas com altura do substrato de 3 mm para ressoar na frequência de 2,45 GHz. Posteriormente, o teste da antena foi feito para validar os dados de projeto, as quais representaram uma boa concordância com os resultados simulados, observados através do diagrama de coeficiente de reflexão e da carta de Smith.

Palavras-chave: Substrato dielétrico. Cera de carnaúba. Permissividade elétrica. Tangente de perdas. Material orgânico.

ABSTRACT

Due to greatest technological advancements, the study for the development of new materials for various applications set off an area of great interest, mainly in relation to raw material limitations. For the technology area, the study of new materials for various applications, whether through doping or composite blends, is one of the most important aspects. And, believing in the abundance of carnauba wax from a palmacea species, carnauba, which, for being prominent in the Northeast region of Brazil, and having social, economic and cultural relevance in the semi-arid Northeastern scenario, this work approaches the application of carnauba wax as substrate of microstrip antennas. The electrical characterization of this wax was carried out, as well as the chemical and mechanical characterization. The sample was produced from the heating of the solid carnauba wax (product from the beneficiation of the leaves) through a magnetic stirrer, in which a solid cylindrical structure was acquired to carry out the characterizations of the material. Therefore, the characterizations will serve as the basis of analysis for applications of the organic material in devices that operate in the frequency band microwave, to which the microstrip antennas work. The electrical characterization was performed using the coaxial probe transmission / reflection method. The mechanical characterizations were held to observe the material when submitted to diametrical compression efforts through the digital image correlation and the method used to quantify the microhardness was the Vickers technique. These characterizations will concede obtaining sufficient values for the proposed objective. The antennas were scaled through the models of cavity and transmission line in a program developed in the Fortran language from the relative permittivity and tangent losses. The design and simulation were done in the *HFSS*[®] (*High Frequency Structural Simulator*) to obtain the radiation diagrams (2D and 3D), loss of return and gain. The simulated results were implemented to construct antennas with substrate height of 3 mm to resonate at the 2.45 GHz frequency. Subsequently, the antenna test was done to validate the design data, which represented a good agreement with the simulated results, observed through the reflection coefficient diagram and the Smith chart.

Keywords: Dielectric substrate. Carnauba wax. Electrical permissiveness. Tangent of losses. Organic material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético: os limites entre as diversas bandas são ligeiramente abstratos.....	21
Figura 2 - Antena de microfita retangular	24
Figura 3 - Representações de alguns elementos de plaquetas de microfita.....	24
Figura 4 - Alimentação por cabo coaxial.....	25
Figura 5 - Alimentação por Linha de microfita.....	26
Figura 6 – Representação da antena de microfita para o Método de Linha de Transmissão ...	27
Figura 7 - Linhas de campo elétrico	27
Figura 8 – (a) Comprimento físico e efetivo de um patch retangular e (b) efeito do franjamento nas bordas.....	28
Figura 9 – Tratamento através do modelo de cavidade da geometria de uma plaqueta retangular de microfita.....	30
Figura 10 - Distribuição de cargas e densidade de corrente em uma antena de microfita.	30
Figura 11 – Método de casamento de impedância por <i>Inset Feed</i> aplicado ao <i>patch</i> de uma antena de microfita retangular	33
Figura 12 - Parâmetro $S_{1,1}$ (dB) e Largura de Banda (GHz).....	35
Figura 13 - Diagrama de radiação de uma antena de microfita.....	36
Figura 14 - Impedância característica normalizada de uma antena de microfita	37
Figura 15 - Carnaubeiras	39
Figura 16 - Mapa de ocorrência de carnaúba no Nordeste brasileiro.....	40
Figura 17 - Produtos artesanais obtidos a partir da carnaúba: (a) papel artesanal e (b) abajur.	41
Figura 18 - Etapas para a obtenção da cera de carnaúba tradicional.....	42
Figura 19 - Variação da constante dielétrica da cera de carnaúba em relação à temperatura. Frequência de operação: 10000 Hz	44
Figura 20 - Variação do fator de perdas dielétricas da cera de carnaúba. Frequência de operação: 10000 Hz.....	45
Figura 21 - Variação da constante dielétrica e do fator de perdas da cera de carnaúba à 26 °C e um intervalo de frequência de 0,1 a 100 kHz.....	46

Figura 22 - Exposição de um corpo de prova que será submetido a ensaio de tração indireta	51
Figura 23 - Colocação de frisos para o ensaio de tração por compressão diametral.....	51
Figura 24 - À esquerda observa-se a tensão média sob o corpo de prova e à direita se dá o comportamento das suas deformações no ensaio de compressão diametral	52
Figura 25 - Exemplificação da formação da fissura vertical durante o ensaio de compressão diametral e direção das tensões	53
Figura 26 - Esquematização dos processos envolvidos.....	55
Figura 27 - Porção da cera de carnaúba do tipo I utilizada no presente trabalho.....	56
Figura 28 - (a) Agitador Magnético com Aquecimento utilizado para a obtenção da pastilha de cera de carnaúba (b) Termostato utilizado na obtenção da temperatura de fusão da cera de carnaúba.....	57
Figura 29 - (a) Fotografia do Microscópio Eletrônico de Varredura pertencente à UFERSA (b) Metalizador para deposição de material condutor na superfície do corpo de prova	58
Figura 30 - Equipamento utilizado para a medição da microdureza da cera de carnaúba	59
Figura 31 - (a) Tintas utilizadas para a texturização de tonalidade cinza das amostras (b) Amostra final pós pintura	60
Figura 32 - Máquina de ensaio universal	60
Figura 33 - Câmera fotográfica EOS 60D	61
Figura 34 - Disposição dos equipamentos para a realização do ensaio.....	61
Figura 35 - Posicionamento dos <i>gauges</i> virtuais nos corpos de prova de cera de carnaúba	62
Figura 36 - Representação da interface do programa Correli Q4 ^{LMT}	63
Figura 37 - (a) Equipamento utilizado para medir a permissividade elétrica da cera de carnaúba (b) Amostra utilizada para a medição	64
Figura 38 Antena com substrato da cera de carnaúba com patch projetada (a) Vista frontal da antena com patch retangular (b) Vista frontal da antena com patch circular	65
Figura 39 - Obtenção dos substratos para as antenas	66
Figura 40 - Forno tipo mufla utilizado para resfriamento da cera de carnaúba diluída	66
Figura 41 - (a) Politriz Lixadeira Metalográfica utilizada para polir a cera de carnaúba sílica e (b) tipos de lixas utilizadas na máquina.....	66
Figura 42 - Paquímetro utilizado mostrando os valores das medidas de diâmetro e espessura após processo de lixamento	67

Figura 43 – Mini CNC 2020b de bancada utilizada para a obtenção das dimensões do <i>patch</i> e do plano de terra	67
Figura 44 - Conector SMA-KE fêmea reverso.....	68
Figura 45 - Antenas com substrato de cera de carnaúba circular (a) com <i>patch</i> retangular (b) <i>patch</i> circular (c) plano de terra.....	68
Figura 46 - Agitador Magnético com Aquecimento utilizado para a obtenção da pastilha de cera de carnaúba	69
Figura 47 - (a) Termostato utilizado na obtenção da temperatura de fusão da cera de carnaúba (b) Temperatura de fusão obtida no experimento.....	69
Figura 48 - Difratoograma da cera de carnaúba realizada na Ufersa	70
Figura 49 - Imagem obtida por MEV utilizando SE para a superfície do corpo de prova da cera de carnaúba (a) 500x; (b) 1kx; (c) 5kx.....	71
Figura 50 - Espectro no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) da cera de carnaúba obtido na região de 4000 a 400 cm ⁻¹	72
Figura 51 - Curvas com velocidades diferentes de ensaio para a obtenção da quantidade de imagens que seriam utilizadas no estudo da correlação de imagem digital	73
Figura 52 - Campos de deslocamento para os corpos de prova antes da ruptura	74
Figura 53 - Campo de deformações dos corpos de prova antes da ruptura.....	75
Figura 54 - Escala de erro do Correli Q4 ^{LMT} para os corpos de prova analisados	76
Figura 55 - Gráfico Tensão x Deformação para a cera de carnaúba obtida através da correlação digital de imagens	77
Figura 56 - Micrografia revelando uma indentação do teste de dureza Vickers na cera de carnaúba.....	78
Figura 57 - Constante dielétrica e tangente de perdas da cera de carnaúba	79
Figura 58 - Coeficientes de reflexão simulados para as antenas com <i>patches</i> circular e retangular com substrato de cera de carnaúba	81
Figura 59 - Diagramas de radiação 2D e 3D das antenas simuladas na frequência de 2,45 GHz	82
Figura 60 - Coeficientes de reflexão medido e simulado para antena com substrato de cera de carnaúba com <i>patch</i> circular	84
Figura 61 - Carta de Smith medida para a antena com <i>patch</i> circular.....	85

Figura 62 - Coeficientes de reflexão medido e simulado para antena com substrato de cera de carnaúba com patch retangular 86

Figura 63 - Carta de Smith medida para a antena com *patch* retangular..... 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designação das bandas de frequência obtido do IEEE e algumas aplicações.....	22
Tabela 2 - Materiais dielétricos e suas características elétricas: constante dielétrica e tangente de perdas	39
Tabela 3 - Classificação da cera de carnaúba pela Instrução Normativa SARC N° 10 (11 de dezembro 2002)	43
Tabela 4 - Valores das constantes dielétricas para alguns materiais	48
Tabela 5 - Comparativo dos picos observados no DRX entre autores.	70
Tabela 6 – Valores experimentais dos números de onda com seus valores correspondentes de atribuições das principais bandas obtidas por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR).....	72
Tabela 7 - Valores de velocidade de ensaio e a força máxima relacionada entre eles	74
Tabela 8 - Resultados obtidos na análise de microdureza da cera de carnaúba.	78
Tabela 9 - Características elétricas da cera de carnaúba na frequência de 2,45 GHz	79
Tabela 10 - Dimensões das antenas projetadas	80
Tabela 11 - Valores da largura de banda para as antenas simuladas	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras latinas

SARC - Secretaria de Apoio Rural e Cooperativismo;

BW – Largura de banda da antena;

f_{inf} – Frequência inferior;

f_r – Frequência de ressonância ou central;

f_{suo} – Frequência superior;

G – Ganho da antena;

h – Espessura do substrato;

J_o – Função de Bessel de primeira ordem;

J_b – Densidade de corrente na parte inferior;

J_t – Densidade de corrente na parte superior;

k_x , k_y e k_z – Número de onda nas direções x, y e z, respectivamente;

L – Comprimento do *patch*;

L_o – Comprimento da linha de microfita;

PR – Perda de retorno;

$S_{1,1}$ – Coeficiente de reflexão;

W – Largura do *patch*;

W_o – Largura da linha de microfita;

y_o – Comprimento do *inset feed*;

y_w – Largura do *inset feed*;

Z – Impedância de carga;

Z_o – Impedância característica da linha de transmissão;

Z_{in} – Impedância de entrada da antena;

LRT – Limite de resistência à tração.

Letras gregas

$\tan(\delta)$ – Tangente de perdas;

Γ – Coeficiente de reflexão;

ε – Permissividade elétrica complexa;

ε' – Constante dielétrica;

ε'' – Fator de Perdas;

ε_0 – Permissividade elétrica do vácuo;

ε_r – Permissividade elétrica relativa do material;

ε_{ref} – Constante dielétrica efetiva;

λ – Comprimento de onda;

δ – Variação do diâmetro final e inicial;

ε – Deformação.

Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global);

ASTM – American Society for Testing and Materials;

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora;

HFSS – High Frequency Structural Simulator;

PIB – Produto Interno Bruto;

TEM – Transversal Eletromagnético;

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais);

CAST - (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial – tradução em português);

CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (tradução em português);

PCDs - plataformas de coleta de dados;

TICs - Tecnologias da Informação e Telecomunicação;

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido;

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte;

IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba.

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa.....	19
1.2	Objetivo geral.....	19
1.3	Objetivos específicos	20
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Antenas de microfita.....	21
2.1.1	Aplicações, Vantagens e Desvantagens das Antenas de Microfita	21
2.1.2	Tipos de Antenas	23
2.1.3	Antenas de Microfita	23
2.1.4	Excitação das Antenas de Microfita	25
2.1.5	Métodos de Análise	26
2.1.6	Parâmetros da Antena.....	34
2.2	Substrato.....	37
2.2.1	Propriedade dos substratos dielétricos.....	38
2.2.2	Carnaúba.....	39
2.2.3	Cera de Carnaúba.....	41
2.2.4	Propriedades da Carnaúba	44
2.3	Propriedades Elétricas	46
2.3.1	Permissividade Elétrica	46
2.3.2	Tangente de Perdas	49
2.4	Propriedades mecânicas.....	49
2.4.1	Ensaio por compressão diametral	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.3	Caracterização do Substrato.....	56
3.1.1	Caracterização Física.....	57
3.1.2	Caracterização estrutural	57

3.4	Projeto e simulação da antena de microfita	64
3.3	Construção e medição da antena.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	Análises física, química e estrutural	69
4.1.1	Temperatura de fusão da cera de carnaúba.....	69
4.1.2	Difração de raios x.....	70
4.1.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	71
4.1.4	Técnica de espectroscopia	71
4.2	Análises mecânicas	73
4.2.1	Ensaio de tração por compressão diametral	73
4.2.2	Análise através dos campos de deslocamento e de deformação.....	74
4.2.2	Microdureza.....	77
4.2	Análises elétricas.....	78
4.3	Análises do projeto e simulações	80
4.4	Análise das antenas com substrato de cera de carnaúba	83
4.4.1	Antena circular	83
4.4.2	Antena retangular	85
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

Buscando meios mais eficazes e econômicos para a observação da Terra, o homem desenvolveu satélites de sensoriamento remoto. O Brasil, por se tratar de um país em desenvolvimento, possuía imagens fornecidas por meio de outras nações. Com o intuito de sanar com esta dependência, os governos do Brasil e da China fizeram um acordo em 06 de julho de 1988, em parceria com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a *CAST* (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial – tradução em português) para desenvolver um programa de dois satélites avançados em sensoriamento remoto, programa *CBERS*, que em português significa Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, a qual, os países envolvidos tiveram um investimento superior a US\$ 300 milhões. O Brasil, com domínio de 30% das responsabilidades divididas, junto à China, implantou um sistema completo de sensoriamento remoto a nível internacional (INPE, 2018).

O exemplo acima mostra que a área de Telecomunicações no Brasil tem mudado o modo de viver, produzir e de se relacionar da população nas últimas duas décadas. Mais de R\$ 850 bilhões já foram investidos nessa área, embora ainda haja muito a ser mudado, como políticas públicas, distorções tributárias e uma grande parcela da população que ainda não está digitalmente conectada (35%), já as Tecnologias da Informação e Telecomunicação (TICs) representam cerca de 10% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e o setor de Telecomunicação chega a empregar 500 mil pessoas, contribuindo com R\$ 60 bilhões em tributos, gerados pelos clientes que pagam (TELEBRASIL, 2018).

Diante disso, houve um crescente aumento desta área, principalmente no que condiz às antenas de microfita, as quais possuem fácil construção, propriedades simples e muitas aplicações (HOLANDA, 2016). As antenas de microfita foram inicialmente propostas por G. A. Deschamps no ano de 1953, mas tornaram-se populares na década de 70, quando um grupo de pesquisadores incluindo Robert E. Munson desenvolveram-nas quando utilizaram um substrato de baixa perda (MEHTA, 2015). De acordo com Balanis (2009), estas antenas são bastante utilizadas em aparelhos portáteis e móveis, consistindo em duas placas condutoras, que são separadas por um material dielétrico, o substrato.

O substrato é um material físico que possui espessuras que variam de micrometros até poucos centímetros, tendo formatos retangulares ou circulares, e deve possuir boa resistência mecânica, boa condutividade térmica e fácil manutenção (SOUZA, 2014). Quando se deseja dimensões de antenas com tamanhos reduzidos, há a possibilidade de empregar substratos com permissividade elevada, embora afete o ganho e a eficiência do dispositivo, devido a

maior concentração de linhas de campo no substrato, e não no ar; e quando se deseja maiores valores de dimensões da antena, a permissividade relativa do material é reduzida (CAPOVILLA, 2004).

Este trabalho tem o intuito de utilizar materiais regionais para a produção de substratos na fabricação de antenas de microfita. Callinan e Parks (1959) estudaram o comportamento das propriedades elétricas da cera de carnaúba (permissividade elétrica) em um intervalo de frequência abaixo das frequências de micro-ondas. Pretende-se estudar o comportamento das propriedades elétricas da cera de carnaúba para aplicação na frequência de micro-ondas. Neste contexto, a abundância da carnaúba no semiárido, e através do seu pó cerífero - obtido de suas folhas, possibilita o estudo. Vale ressaltar ainda, que a cera de carnaúba é 100% reaproveitável, garantindo assim, uma perda mínima de material.

1.1 Justificativa

O Nordeste do Brasil, em especial o semiárido nordestino, tem na carnaúba (*Copernicia prunifera*) uma fonte importante de renda, principalmente no período de estiagem. No qual, muitas famílias domiciliadas nas zonas rurais da região nordeste se mantêm economicamente através da exploração para produzir cera proveniente de suas folhas. O Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte são os estados que possuem em maior abundância a carnaúba.

Existem poucos estudos referentes à cera de carnaúba aplicada à área de antenas, alguns estudos importantes foram realizados na década de 50, onde se mediu sua permissividade para uma faixa de frequência baixa de algumas dezenas de Hz a poucas centenas de kHz (Callinan e Parks, 1959). Então, diante disso, é que se faz necessário ampliar ainda mais esta análise.

1.2 Objetivo geral

Realizar um estudo para caracterizar propriedades mecânicas, químicas e elétricas da cera de carnaúba, através da produção de amostras, obtidas a partir da cera de carnaúba para aplica-las às antenas de microfita como substrato.

1.3 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, serão realizadas algumas análises que são elencadas abaixo para possibilitar uma melhor compreensão dos resultados finais, a saber:

- Caracterizar a cera de carnaúba estruturalmente e quimicamente através dos métodos de: Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (TFIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Estabelecer valores médios para o Limite de Resistência à Tração (LRT) da cera de carnaúba, pelo método indireto de compressão diametral e medir sua microdureza pelo método Vickers;
- Caracterizar eletricamente a cera de carnaúba quanto às propriedades de Permissividade Elétrica Relativa (ϵ) e Tangente de Perdas ($\tan(\delta)$);
- Projetar e simular as antenas com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores, obtendo os valores de Perda de Retorno, Largura de Banda e Impedância;
- Analisar e comparar os resultados experimentais e simulados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos utilizados no desenvolvimento e análise do presente trabalho. Na seção 2.1 serão abordadas definições relativas ao estudo das antenas de microfita, suas aplicações, vantagens e desvantagens, suas estruturas, suas excitações, e alguns parâmetros importantes e seus métodos de análise. Na seção 2.2 o substrato e a cera de carnaúba são apresentados. E na seção 2.3 é apresentada as propriedades elétricas.

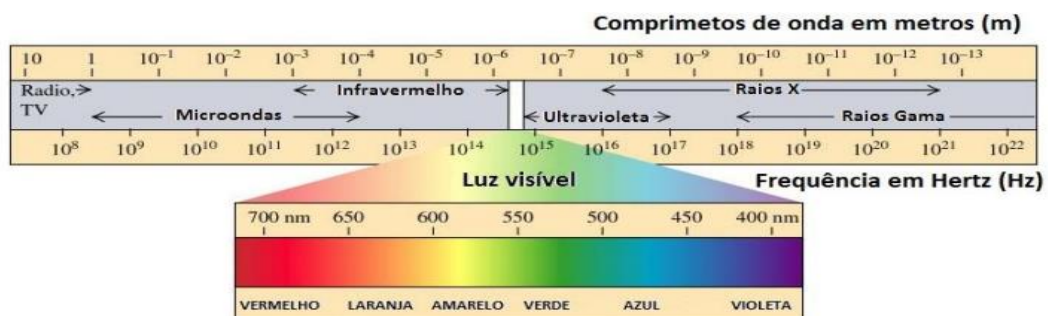
2.1 Antenas de microfita

Antena, de uma forma geral, é definida como uma estrutura intermediária entre o espaço livre e a linha de transmissão (ou dispositivo de guiamento) que serve para receber ou irradiar ondas eletromagnéticas (BALANIS, 2005), tendo como principal função a transmissão ou o recebimento de dados à determinadas faixas de frequências (HOLANDA, 2016).

2.1.1 Aplicações, Vantagens e Desvantagens das Antenas de Microfita

Young e Freedman (2009) mostram que as ondas eletromagnéticas foram detectadas cobrindo um espectro extremamente grande de comprimento de onda, com frequências que vão de 1 a 10^{24} Hz, na qual se pode ter transmissões por rádio e TV, luz visível, radiação infravermelha e ultravioleta, raios X e raios gama. Pode observar as faixas aproximadas de comprimento de onda e frequência na Figura 1.

Figura 1 - Espectro eletromagnético: os limites entre as diversas bandas são ligeiramente abstratos



Fonte: Adaptado de Young e Freedman (2009)

Para esse estudo, o foco principal são as micro-ondas na qual a faixa de frequência varia de 300 MHz a 300 GHz, entretanto, a maior parte da engenharia de micro-ondas acontece entre 1 e 40 GHz, como pode ser observado na Tabela 1 as bandas de micro-ondas de maior interesse e algumas aplicações (WENTWORTH, 2006). A faixa de frequência foi a banda S, que além de possuir aplicações em forno de micro-ondas e comunicação pessoal, também pode ser utilizada para satélites de sensoriamento remoto (INPE, 2018).

Tabela 1 - Designação das bandas de frequência obtido do IEEE e algumas aplicações

Banda	Faixa	Algumas aplicações
L	1 - 2	Satélites de posicionamento global (GPS), comunicação pessoal
S	2 - 4	Forno de micro-ondas (2,45 GHz), comunicação pessoal
C	4 - 8	Comunicação via satélite
X	8 - 12,5	Radar terrestre
Ku	12,5 - 18	Radar e rádio ponto a ponto
K	18 - 26,5	Radar e rádio ponto a ponto
Ka	26,5 - 40	Radar e rádio ponto a ponto

Fonte: Adaptado de Wentworth (2006)

Segundo Rios (2002), para um bom funcionamento de uma antena ela deve estar conectada com uma linha de transmissão de forma que haja o casamento de impedância. Há cinco fatores que são necessários, no mínimo, para uma construção de uma antena, a saber:

- a) Frequência de uso;
- b) Diagrama de irradiação;
- c) Ganho;
- d) Impedância desejada para o casamento dela com a alimentação;
- e) Polarização.

Esses pontos acima são os principais para o funcionamento de uma antena, apesar de que ainda existem fatores secundários que podem interferir também. Os pontos supracitados serão abordados mais à frente.

2.1.2 Tipos de Antenas

Existem diversos tipos e modelos de antenas para as mais diversas aplicações e resultados na qual dependem da potência de transmissão, ganho e frequência de trabalho (OLIVEIRA, 2012), antenas filamentosas, de aberturas e de microfita são alguns exemplos (BALANIS, 2005).

Por Balanis (2005), temos que:

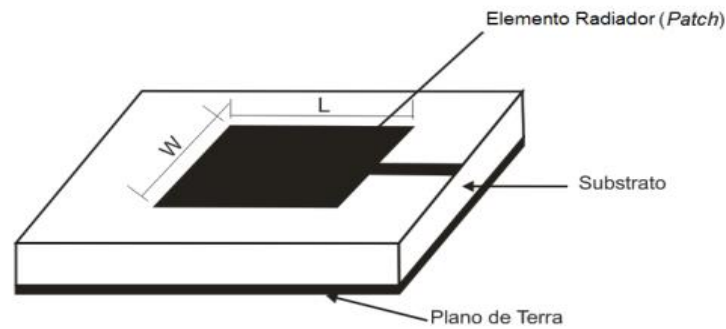
- As antenas filamentosas são as mais comuns de antenas por serem as que estão em prédios, navios, automóveis, e podem ser de vários formatos: retangular, quadrada, elipse;
- Antenas de abertura são mais sofisticadas que as filamentosas e utilizadas em frequências mais elevadas, são utilizadas em aplicações aeronáuticas e espaciais;
- Antenas de microfita são bastante úteis hoje em dia principalmente para aplicações governamentais e comerciais, e utilizadas também em aeronaves de alto desempenho, naves espaciais e até mesmo em telefones celulares.

As antenas de microfita serão abordadas com mais detalhes na seção a seguir.

2.1.3 Antenas de Microfita

Antenas de microfita consistem basicamente em uma plaqueta metálica ou *patch* (elemento de irradiação), um plano de terra e um substrato, como mostra a Figura 2. Estas antenas, como cita Balanis (2005) são discretas, simples e de baixo custo de fabricação, sendo compatível com a tecnologia de circuitos impressos; além de ser moldáveis, também são utilizadas principalmente em larga escala nos sistemas de micro-ondas hoje em dia, ou seja, em altas frequências, porém tem pequena largura de banda e baixa potência. A constante dielétrica do substrato a ser usado nestes tipos de antenas varia de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$, pois o modelo empírico funciona melhor para essas limitações, uma vez que valores menores ou maiores os erros podem aumentar.

Figura 2 - Antena de microfita retangular

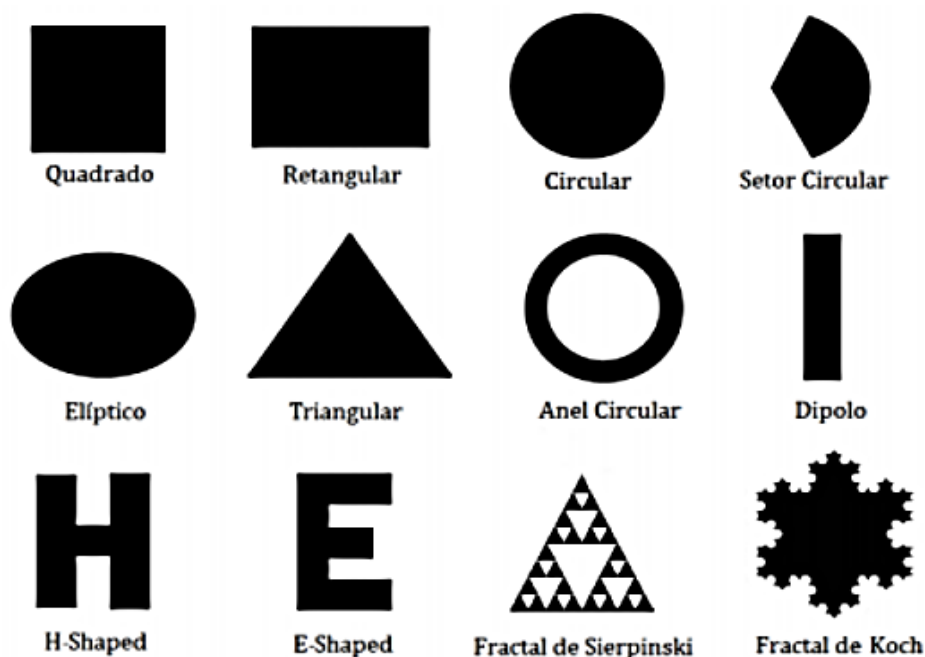


Fonte: Filho (2010)

A fita metálica do elemento radiador (*patch*) tem pequena espessura, e é projetada de forma que a radiação tenha um máximo normal (radiação *broadside*) (BALANIS, 2005) ou na direção axial ao *patch* (radiação *end-fire*), a depender do modo de excitação (FILHO, 2010). Geralmente, utiliza-se o cobre, mas existem projetos os quais utilizam alumínio, ouro ou prata para a construção delas (FATIMAH, 2015).

De acordo com Balanis (2009) os elementos radiantes e as linhas de alimentação, são, geralmente, fotogravados no substrato dielétrico; e estas plaquetas podem ser de vários tipos, como mostra a Figura 3. É importante salientar que o formato do *patch* influencia na distribuição de corrente, logo interfere também na distribuição do campo na superfície da antena (FILHO, 2010).

Figura 3 - Representações de alguns elementos de plaquetas de microfita



Fonte: Filho (2010)

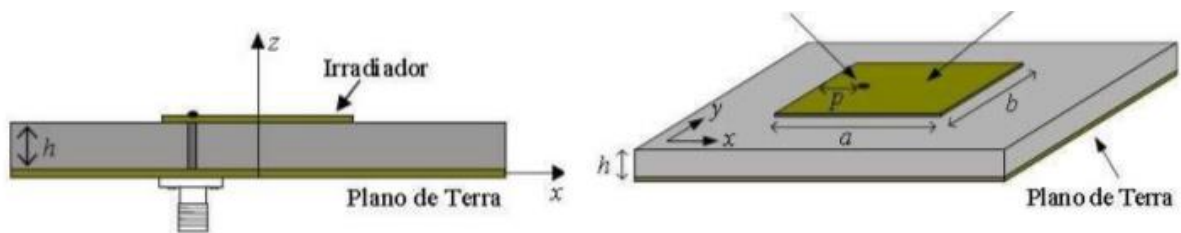
2.1.4 Excitação das Antenas de Microfita

As técnicas de alimentação (ou excitação) são parâmetros do projeto as quais influenciam em várias características de uma antena de microfita, principalmente na impedância de entrada (HOLANDA, 2016).

2.1.4.1 Cabo Coaxial

A alimentação por cabo coaxial possui uma parte ativa da ponta de prova, que transpassa o substrato e está conectada ao irradiador, e o conector externo está ligado ao plano de terra (HOLANDA, 2016). A Figura 4 mostra o exemplo de uma antena de microfita sendo alimentada por um cabo coaxial.

Figura 4 - Alimentação por cabo coaxial

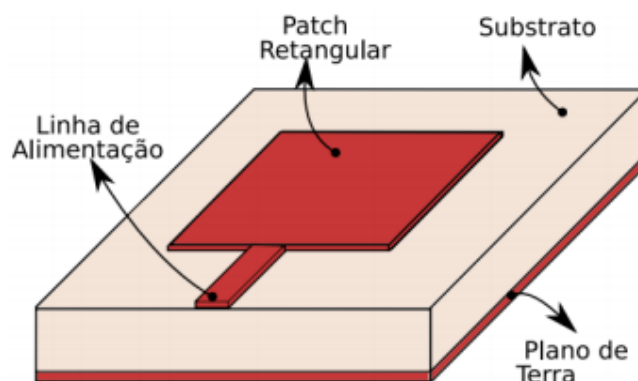


Fonte: Nascimento (2007)

2.1.4.2 Linha de Microfita

A estrutura da linha de microfita (Figura 5) compõe-se de uma fita condutora impressa que está sobre o plano do substrato, e no mesmo plano que o *patch*. Abaixo do substrato encontra-se o plano de terra, esta configuração garante com que a antena possua uma estrutura inteiramente planar, o que a torna adequada para aplicações de circuitos integrados de micro-ondas (HOLANDA, 2016).

Figura 5 - Alimentação por Linha de microfita



Fonte: Aquino (2008)

2.1.5 Métodos de Análise

Os métodos de análise servem para a caracterização da antena. Existem dois grupos que lidam com isso: os métodos numéricos e os modelos aproximados. No primeiro grupo, obtêm-se resultados mais precisos, e se baseiam na distribuição de corrente elétrica no *patch* e no plano de terra. O segundo, faz uso de técnicas como Método dos Momentos, Elementos Finitos, Diferenças Finitas no Domínio do Tempo, etc. E se baseia na distribuição de corrente magnética ao redor das margens do *patch*, e simplifica o mecanismo de radiação das antenas de microfita, o Método da Linha de Transmissão e da Cavidade são exemplos dele (FILHO, 2010).

Os Métodos da Cavidade e o da Linha de Transmissão serão descritos sucintamente nos dois próximos tópicos, devido ao emprego neste trabalho. Outro método importante para o projeto das antenas deste trabalho é o de Casamento de Impedância através de *Inset Feed*, que melhora o desempenho da antena.

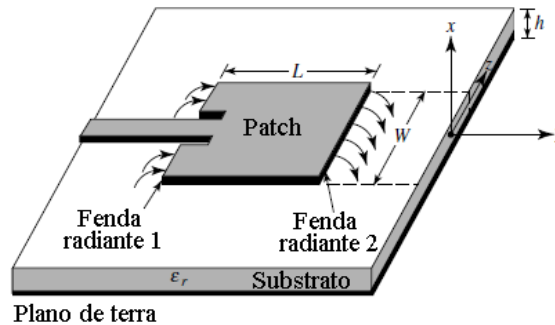
2.1.5.1 Método da Linha de Transmissão

O Método da Linha de Transmissão é um método simples e pouco exato, mas produz resultados satisfatórios, assim como, facilita a obtenção do casamento de impedância da estrutura. Antenas que tenham o *patch* quadrado ou retangular são recomendadas para sua utilização (HOLANDA, 2016), já que são de geometria simples.

Segundo Balanis (2005), neste modelo, a antena de microfita é separada por duas fendas que estão separadas por uma baixa impedância Z_c e comprimento L (Figura 6), as

dimensões do *patch* para este modelo, são finitas em largura e comprimento, e a partir disso, os campos sofrerão o efeito de franjamento nas bordas do elemento radiador.

Figura 6 – Representação da antena de microfita para o Método de Linha de Transmissão

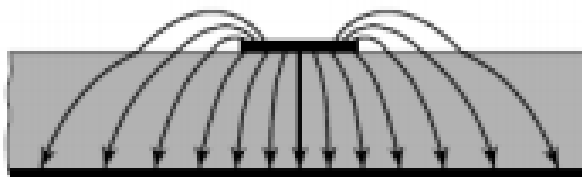


Fonte: Adaptado de Balanis (2005)

Existe uma relação entre a espessura do substrato e as dimensões do *patch* que pode quantificar o efeito de franjamento. De acordo com Balanis (2005), no plano x-y (E principal), o franjamento depende do comprimento L do *patch*, da espessura h do substrato e da constante dielétrica (ϵ_r) do substrato, e deve ser levada em conta, apesar de que esse efeito, para antenas de microfita, seja reduzido, pois afeta a sua frequência de ressonância.

A partir da Figura 7, observa-se que as linhas de campo percorrem tanto o ar quanto o substrato e, a partir disso, é necessário que se faça uma nova modelagem para a permissividade, chamando de efetiva, levando em consideração tanto a permissividade relativa do substrato quanto do ar.

Figura 7 - Linhas de campo elétrico



Fonte: Balanis (2005)

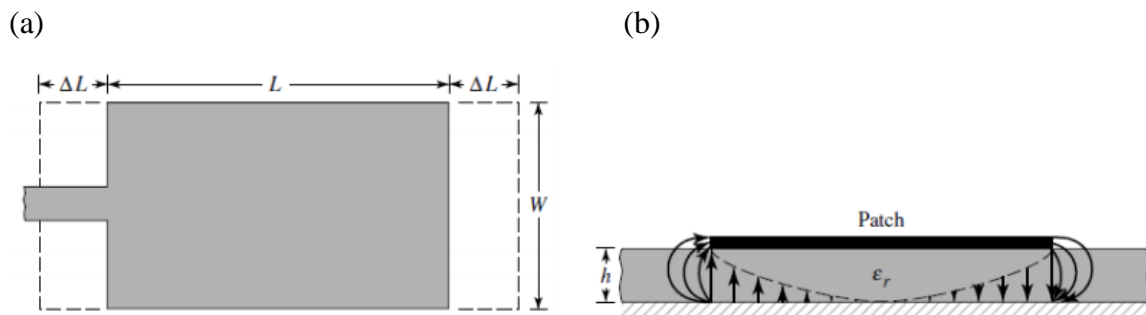
De acordo com Balanis (2005), a constante dielétrica efetiva é dada pela Equação 1.

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

para $W/h > 1$, onde W é a largura do *patch*.

A Figura 8, ilustra as dimensões do *patch* estendidas ao longo do seu comprimento em cada extremidade por uma distância ΔL , uma vez que, devido ao franjamento dos campos pelas bordas, as dimensões elétricas são maiores que as dimensões físicas, e é por isso que se deve calcular a constante dielétrica efetiva da Equação 1 (BALANIS, 2005).

Figura 8 – (a) Comprimento físico e efetivo de um patch retangular e (b) efeito do franjamento nas bordas



Fonte: Balanis (2005)

Hammerstad (1975) definiu uma equação analítica na qual se pode calcular o valor da variação de comprimento da antena (ΔL) a partir da Equação 2.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} + 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (2)$$

Obtendo ΔL , os demais parâmetros de projeto de antenas de microfita para *patch* retangular podem ser calculados, quando são conhecidos os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), espessura do substrato (h) e constante dielétrica do substrato (ϵ_r). O comprimento da antena de microfita e a sua largura podem ser encontrados a partir da Equação 3 e 4, respectivamente:

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} - 2\Delta L \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (4)$$

onde: L – comprimento do *patch*; f_r – frequência de ressonância; c – velocidade das ondas eletromagnéticas no espaço livre e W – largura do *patch*.

Para o casamento de impedância, pode-se levar em consideração a alimentação através de linha de microfita (SILVA, 2014). A partir da permissividade efetiva, o comprimento da linha de microfita tem que ser igual ou inferior a 1/4 do comprimento de onda da maior frequência de ressonância da antena (POZAR, 1998), como está mostrado na Equação 5:

$$L_0 = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{\text{ref}}}} \quad (5)$$

Por Balanis (2005), a largura W_0 da linha de microfita é obtida a partir da Equação 6.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}}} \ln \left(\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right), & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases}, \quad (6)$$

onde W_0 é a largura da linha de microfita, L_0 é o comprimento da linha de microfita e Z_0 a impedância da linha de microfita.

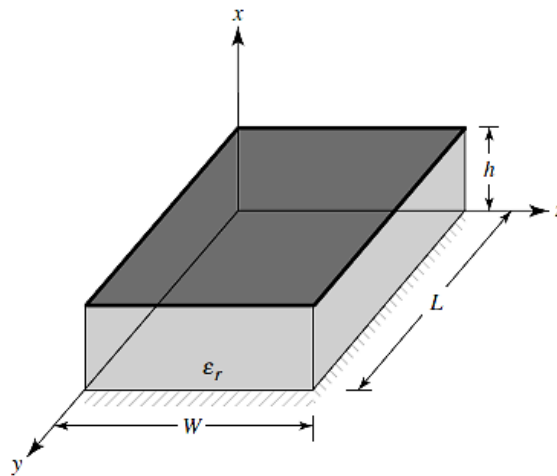
Para a solução da Equação 06, considera-se o valor da impedância de entrada Z_0 igual a 50Ω .

2.1.5.2 Método da Cavidade

O Método da Cavidade assemelha a antena às cavidades com cargas dielétricas, onde, dentro do substrato, os campos normalizados são encontrados com maior precisão do que o método da linha de transmissão, pois, a cavidade é circundada por paredes elétricas, no topo e na base, e por paredes magnéticas ao longo do perímetro do *patch* (MORAIS, 2011). De acordo com Holanda (2016), este modelo pode ser utilizado para diversos tipos de geometria regulares, quando não é desejável alta precisão e altas frequências.

A representação do *patch* com geometria retangular, através do modelo de cavidade, é mostrada na Figura 9, onde se tem um conjunto de duas aberturas (fendas) radiantes, cada uma com largura W e altura h , separadas por uma distância L .

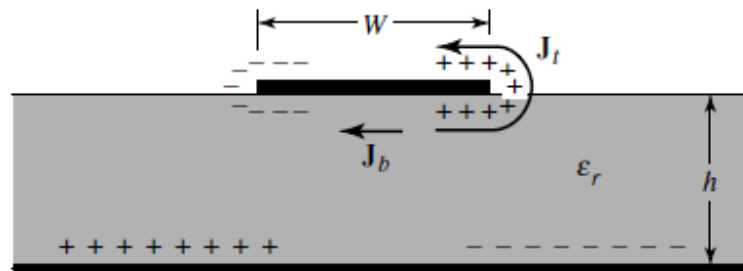
Figura 9 – Tratamento através do modelo de cavidade da geometria de uma plaqueta retangular de microfita



Fonte: Balanis (2005)

Quando o *patch* é energizado, estabelece-se uma distribuição de cargas e de densidade de corrente em suas superfícies inferior (J_b) e superior (J_t), e na superfície do plano de terra (Figura 10).

Figura 10 - Distribuição de cargas e densidade de corrente em uma antena de microfita.



Fonte: Balanis (2005)

Isto ocorre devido às forças de atração entre as cargas de sinais opostos que existem entre o plano de terra e a parte inferior do *patch*; e às forças de repulsão, entre as cargas de mesmo sinal na superfície inferior do *patch*, que direciona as cargas para as bordas de sua face superior (HOLANDA, 2016). Balanis (2005) explica que a razão entre a espessura e a largura da maioria das microfitas é muito pequena, o que faz com que o mecanismo atrativo domine, assim, a maior parte da concentração de cargas é estabelecida na superfície superior do *patch*, e atenua-se, à medida que a razão entre a espessura e a largura diminui.

Através do potencial vetorial, as configurações de campo no interior da cavidade podem ser descritas, satisfazendo a Equação 7.

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] \quad (7)$$

onde k_x , k_y e k_z são os números de onda ao longo das direções x , y e z , respectivamente.

A relação entre os campos elétricos e magnéticos no interior da cavidade com o vetor potencial é apresentada através da Equação 8, ao utilizar as condições de contorno mostradas na Equação 9 (BALANIS, 2005):

$$\begin{aligned} E_x &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x & H_x &= 0 \\ E_y &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right) & H_y &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \\ E_z &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right) & H_z &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (8)$$

$$E_y(x'=0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = E_y(x'=h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0$$

$$H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=0) = H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=W) = 0 \quad (9)$$

$$H_z(0 \leq x' \leq h, y'=0, 0 \leq z' \leq W) = H_z(0 \leq x' \leq h, y'=L, 0 \leq z' \leq W) = 0$$

sendo x' , y' e z' , usadas para representar os campos no interior da cavidade.

Os números de onda são obtidos a partir da Equação 10 (BALANIS, 2005):

$$\begin{aligned} k_x &= \left(\frac{m\pi}{h} \right), m=0, 1, 2, \dots \\ k_z &= \left(\frac{p\pi}{W} \right), p=0, 1, 2, \dots \\ k_y &= \left(\frac{n\pi}{L} \right), n=0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

para m , n , p diferentes de zero e representam o número de meios-ciclos ao longo das direções x , y , z , respectivamente. E disso, por Balanis (2005), as frequências de ressonância da cavidade são dadas pela Equação 11:

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (11)$$

Para o projeto de uma antena de microfita com patch circular, tem-se que o procedimento é o mesmo da antena retangular – utiliza-se o modelo de cavidade, porém aquela utiliza coordenadas cilíndricas. Na qual, a cavidade é composta por dois condutores elétricos perfeitos nas faces inferior e superior, e representa o plano de terra e a plaqueta, assim como por uma parede cilíndrica condutora magnética perfeito em torno da periferia circular da cavidade. É importante dizer também que se considera o material dielétrico da cavidade truncado até a extensão da plaqueta (BALANIS, 2005).

Após a análise, encontra-se a Equação 12 para a obtenção do raio a do *patch* circular. Lembrando que para projetar a antena com *patch* circular, os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), espessura do substrato (h) e constante dielétrica relativa (ϵ_r) (BALANIS, 2005).

$$a = \frac{F}{\sqrt{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1,7726\right]\right\}}} \quad (12)$$

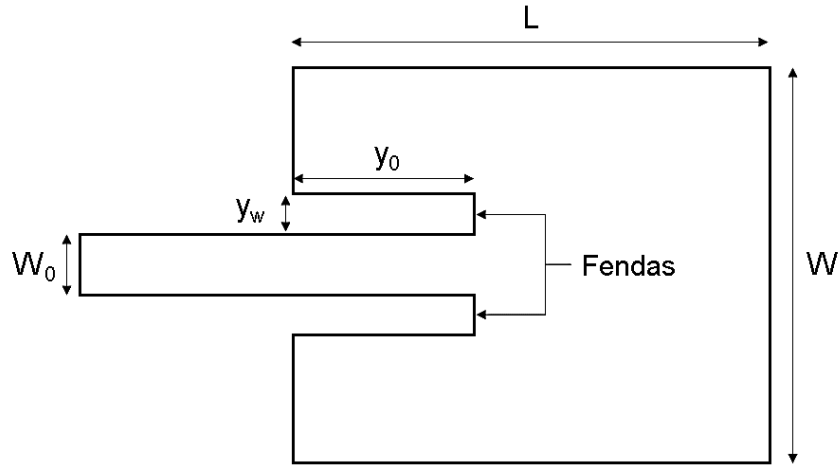
com

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

2.1.5.3 Casamento de Impedância através de Inset Feed

O método de casamento de impedância por *inset feed*, a partir de Guerra (2016) é a inserção de duas fendas retangulares que são paralelas à linha de alimentação, como observado na Figura 11.

Figura 11 – Método de casamento de impedância por *Inset Feed* aplicado ao *patch* de uma antena de microfita retangular



Fonte: Holanda (2016)

onde y_0 = comprimento do *inset feed*, y_w = largura do *inset feed*, W_0 = comprimento da linha de microfita, L = comprimento do *patch* e W = largura do *patch*.

A utilização deste método só é possível para valores de permissividade relativa entre $2 \leq \epsilon_r \leq 10$, e o comprimento y_0 do *inset feed*, é obtido a partir da Equação 12, quando deseja-se aproximar a impedância de entrada da linha de microfita à 50Ω (RAMESH e YIP, 2003).

$$y_0 = 10^4 \left(\frac{0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2}{-4043\epsilon_r + 6697} \right) \frac{L}{2} \quad (12)$$

Através de (Balanis, 2005), qualquer que seja o valor de impedância pode-se utilizar a Equação 13:

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} [R_{in} 2(G_1 \pm G_{12})] \quad (13)$$

sendo R_{in} a impedância de entrada, G_1 a autocondutância da antena e G_{12} a condutância mútua, decorrente dos campos eletromagnéticos emitidos pelo ressonador, então, obtêm-se seus

valores a partir das Equações 14, 15 e 16, respectivamente. Pode-se observar que a impedância depende dos resultados de condutância. Portanto, sendo,

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (14)$$

calcula-se, primeiramente,

$$G_1 = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \text{sen}^3 \theta}{120\pi^2} d\theta \quad (15)$$

e

$$G_{12} = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \text{sen}^3 \theta}{120\pi^2} J_0(K_0 L \text{sen}\theta) d\theta \quad (16)$$

onde k_0 - número de onda no espaço livre, W e L são, em ordem, a largura e o comprimento do *patch*, e J_0 é a função de Bessel de primeira ordem e argumento x .

Para a obtenção da dimensão da largura (y_w), Matin e Sayeed (2010) mostrou que pode ser calculada através da Equação 17.

$$y_w = \frac{c}{\sqrt{2\varepsilon_{ref}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f_r} \quad (17)$$

Apesar da Equação 17, alguns autores trabalham com a obtenção da largura do *inset feed* em relação à largura da linha de transmissão. Segundo Silva (2015), a mesma largura da linha de transmissão (W_m) foi utilizada para a obtenção do valor da largura do *inset feed*, mas também obteve resultados com *inset feeds* assimétricos. Luna et al. (2013), utilizou a largura do *inset feed* com dimensão igual a metade da largura W_m da linha de transmissão da antena.

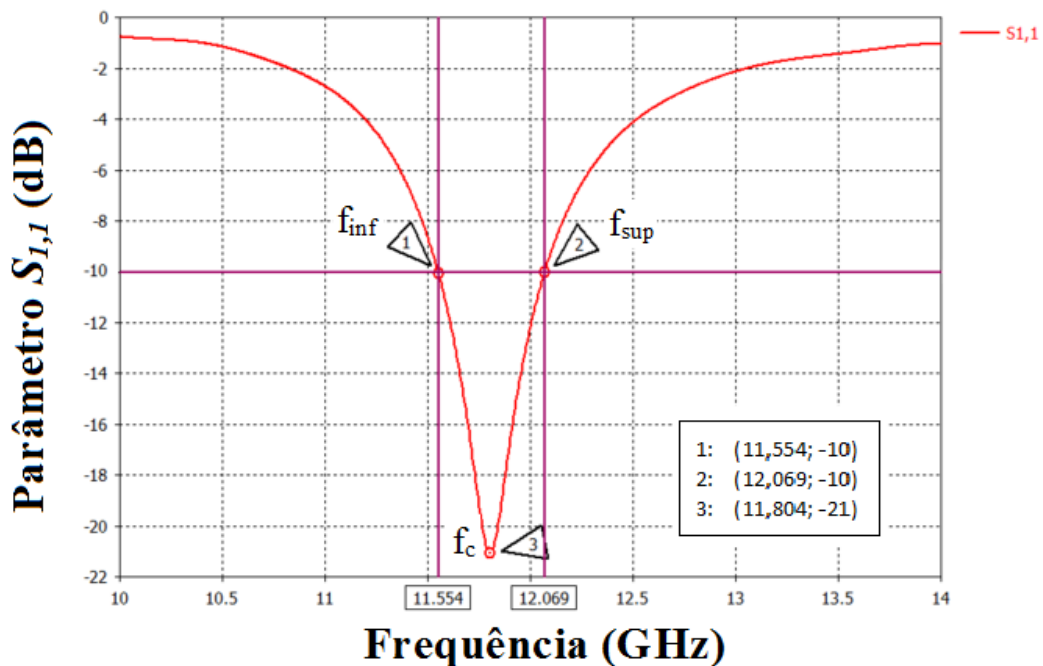
2.1.6 Parâmetros da Antena

Existem vários parâmetros que são importantes para entender o funcionamento de uma antena. Dentre tantos, os que serão abordados nesse estudo são: frequência de ressonância e largura de banda, diagrama de radiação e impedância característica.

2.1.6.1 Largura de Banda

Na conexão entre a antena e a linha de transmissão, geralmente ocorre dispersão de energia transmitida e, para que um dispositivo seja considerado uma antena, é importante que o valor da Perda de Retorno (PR) (ou *Return Loss*), ou parâmetro de espalhamento $S_{1,1}$ ($PR = -20 \cdot \log |S_{1,1}|$), esteja abaixo de -10 dB para delimitar a largura de banda (*Bandwidth – BW*). Balanis (2005) afirma que o intervalo de frequência, ao considerar uma linha imaginária na qual a perda de retorno tem valor -10 dB, e que está entre a frequência central (f_c) ou frequência de operação, possui características como: impedância de entrada, ganho e eficiência de radiação, por exemplo, valores que estão dentro de um limite aceitável em relação à frequência de operação, ou de funcionamento, na qual possui o menor valor de perda de retorno, que está representado pela seta 3, Figura 12.

Figura 12 - Parâmetro $S_{1,1}$ (dB) e Largura de Banda (GHz)



Fonte: Adaptado de FPV Portugal (2015)

Diante disso, pode-se encontrar o valor de BW (Largura de Banda), conforme apresentado na Figura 13, pela diferença entre o marcador2, frequência superior (f_{sup}) e o marcador 1, frequência inferior (f_{inf}), como mostrado na Equação 18.

$$BW = f_{sup} - f_{inf} \quad (18)$$

Em Ghavami (2004), há a classificação da largura de banda quanto a banda ser estreita ou ser larga. Primeiramente, encontra-se o valor em percentual com base nos valores de frequência superior e frequência inferior em relação a frequência de funcionamento, como mostrado na Equação 19:

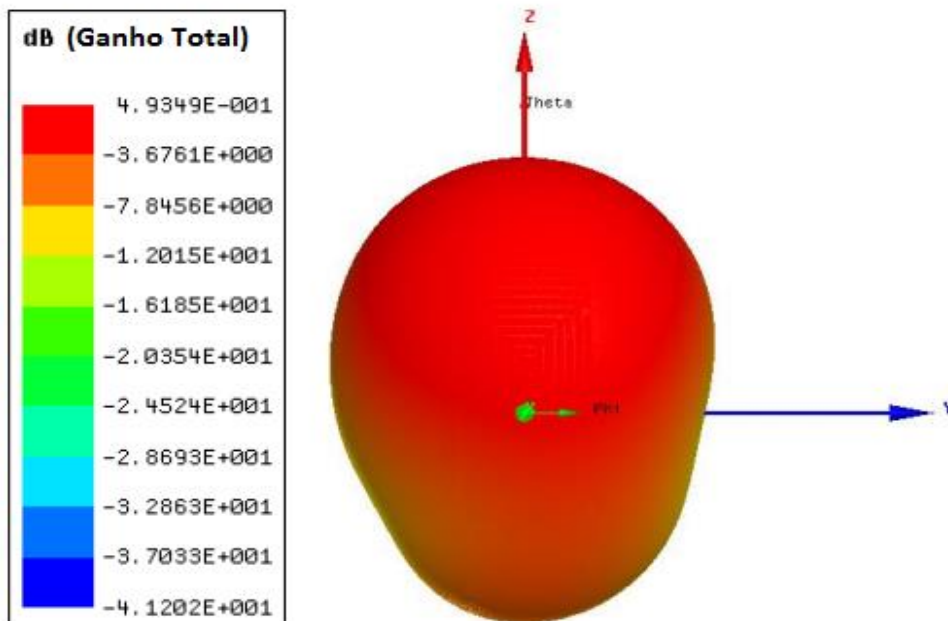
$$BW = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_c} * 100\% \quad (19)$$

A partir do valor obtido na Equação 19, pode-se classificar as antenas em: Banda Estreita ($0\% < BW < 1\%$), Banda Larga ($1\% \leq BW \leq 20\%$) e Banda Ultra Larga ($BW \geq 20\%$) (FILHO, 2010).

2.1.6.2 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação da antena de microfita é um parâmetro que indica a intensidade de radiação das ondas eletromagnéticas radiadas pela antena, além das direções em que as mesmas são radiadas, como mostrado na Figura 13 a seguir.

Figura 13 - Diagrama de radiação de uma antena de microfita

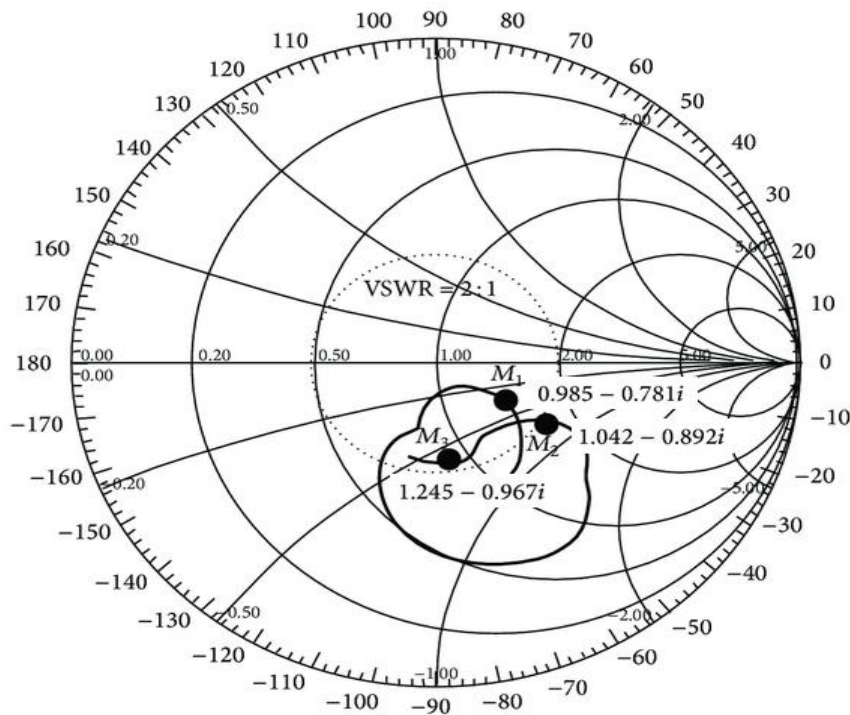


Fonte: Adaptado de Magno (2016)

2.1.6.3 Impedância de entrada

A impedância de entrada de uma antena está intimamente ligada às técnicas de alimentação, pois uma antena com mesma impedância, ou impedância próxima da linha de alimentação (50Ω), indica um bom casamento de impedância, e menos perda de sinal por reflexão. Na Figura 14 é apresentada uma medida típica da impedância de uma antena pela técnica conhecida como carta de Smith, onde os pontos M_1 a M_3 , indicam as medidas das impedâncias normalizadas em 50Ω .

Figura 14 - Impedância característica normalizada de uma antena de microfita



Fonte: Adaptado de Ullah (2014)

2.2 Substrato

Callister (2000) define um material dielétrico como sendo um isolante elétrico, que é não metálico, e que possui uma estrutura de dipolo elétrico, isto justifica dizer que existe uma separação entre as entidades eletricamente carregadas, positivas e negativas, em um nível atômico ou molecular, que torna estes materiais dielétricos bastante utilizados e conhecidos como substratos.

Para as antenas de microfita, o substrato é bastante fundamental. Sendo encontrado, normalmente, entre o *patch* e o plano de terra, de acordo com Barros (2012), a geometria, as propriedades eletromagnéticas e as características mecânicas influenciam, de forma expressiva, o confinamento dos campos, a radiação, o acoplamento, as perdas e a largura de banda da antena e, quando se tem várias combinações entre materiais dielétricos e elementos metálicos, pode existir um comportamento não homogêneo, o qual faz existir fenômenos eletromagnéticos importantes, tais como: comportamento anisotrópico, surgimento das ondas de superfície e propagação em modo quase-TEM (Transversal Eletromagnético).

2.2.1 Propriedade dos substratos dielétricos

Quando se deseja utilizar um substrato, é importante saber que ele não depende apenas das propriedades térmicas e mecânicas, mas também das propriedades eletromagnéticas. E para isso, apesar de existir diversos materiais que podem ser utilizados como dielétricos, dois critérios são bastante importantes para avaliar o material: a permeabilidade magnética (para materiais magnéticos) e a permissividade elétrica (BARROS, 2012). Neste trabalho estudaremos substratos dielétricos não magnéticos, por isso nosso interesse está na permissividade elétrica do material.

Ao projetar uma antena de microfita, deve-se observar algumas propriedades para a fabricação de um substrato: baixa tangente de perda e elevada taxa de homogeneidade (CAETANO, 2014). Os substratos mais usados atualmente utilizam constantes dielétricas entre $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ (BALANIS, 2005).

Para melhorar o desempenho de uma antena, substratos espessos, que possuem constantes dielétricas mais baixas, são desejáveis por proporcionar alta eficiência e maior largura de banda, apesar de serem dispendiosos em sua produção porque há maior consumo de material, por outro lado, substratos mais finos, que possuem constantes dielétricas elevadas, são adequados para circuitos que trabalham na faixa de micro-ondas por demandarem limites de campo para reduzir irradiações e acoplamentos indesejáveis, apesar de serem úteis, por proporcionarem menores dimensões dos elementos constituintes da estrutura, eles se tornam menos eficientes e com uma largura de banda estreita (CAETANO, 2014).

Holanda (2016), lembra que em eletrônica e micro-ondas, a constante dielétrica relativa dos materiais determina as dimensões do dispositivo a ser projetado. De acordo com

Moliton (2007), o comprimento de onda (λ) de uma onda eletromagnética num meio dielétrico é dado pela Equação 20.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (20)$$

sendo, λ_0 o comprimento de onda da onda no vácuo.

Podem-se observar materiais dielétricos aplicados em micro-ondas a partir da Tabela 2 com seus valores de permissividades elétricas relativas, ϵ_r , e tangente de perdas.

Tabela 2 - Materiais dielétricos e suas características elétricas: constante dielétrica e tangente de perdas

Materiais	Constante Dielétrica (ϵ_r)	Tangente de Perdas ($\tan \delta$)
Alumina	9,2	0,008
RT/DUROID 5880	2,2	0,0009
FR-4 Epóxi	4,4	0,02
PTFE	2,5	0,002

Fonte: Adaptado de Caetano (2014)

2.2.2 Carnaúba

Figura 15 - Carnaubeiras



Fonte: Autoria própria (2018)

A carnaúba (Figura 15), da família *Arecaceae* e espécie *Copernicia prunifera* é uma palmeira nativa da Região Nordeste do Brasil e está distribuída em sua grande maioria em três Estados: Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009 e SOUSA, 2015), encontrada especialmente nos vales dos rios Acaraú, Apodi, Jaguaribe e Parnaíba, pode também ser encontrada nos estados do Tocantins, Pará, Maranhão e Goiás (ALVES e COELHO, 2006), e a sua distribuição no território nordestino brasileiro pode ser observada a partir da Figura 16.

Garantindo um vasto potencial paisagístico, como afirma Bauermann et al. (2010), a carnaúba possui grande valor ornamental e econômico. E no Ceará, foi instituída, a partir do Decreto-Lei nº 27413, de 30/03/2004, a carnaúba como símbolo do Estado, encontrando-a em seu brasão e a partir do artigo 2º afirma que a derrubada e o corte da carnaúba está condicionada à autorização dos órgãos e entidades estaduais competentes (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009), porque há uma crise na atividade devido aos problemas tecnológicos no campo, afetando diretamente a qualidade do produto, e as relações sociais (ALVES e COELHO, 2006).

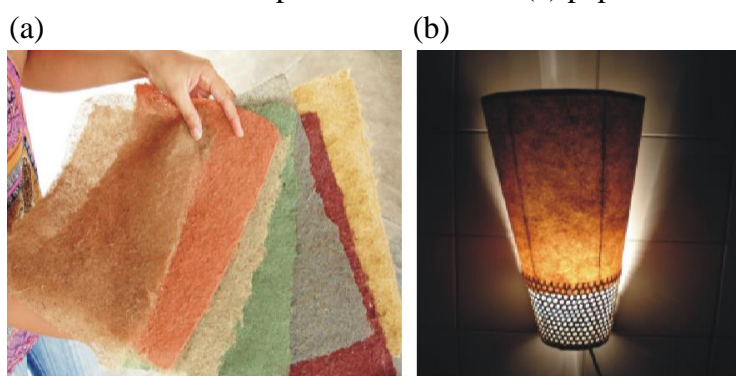
Figura 16 - Mapa de ocorrência de carnaúba no Nordeste brasileiro



Fonte: Adaptado de Câmara Setorial da Carnaúba (2009)

Da carnaúba tudo se aproveita, por isso é chamada de “árvore da vida”, pois da planta muitos produtos são obtidos (ALVES e COELHO, 2006). Utiliza-se a fibra da palha para a obtenção de papel artesanal; a palha para a fabricação de produtos artesanais, tais como chapéus, abajures, esteiras, vassouras e; a bagana da carnaúba é usada para proteger e resfriar os solos (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009), na Figura 17 pode-se observar exemplos de utilização da carnaubeira, e diante desses exemplos é que a palmeira se tornou ao longo da história uma fonte de renda e ocupação para uma parcela da população rural do Nordeste. De acordo com Alves e Coelho (2006), a cera é o principal produto da carnaubeira.

Figura 17 - Produtos artesanais obtidos a partir da carnaúba: (a) papel artesanal e (b) abajur.



Fonte: Adaptado de Câmara Setorial da Carnaúba (2009)

2.2.3 Cera de Carnaúba

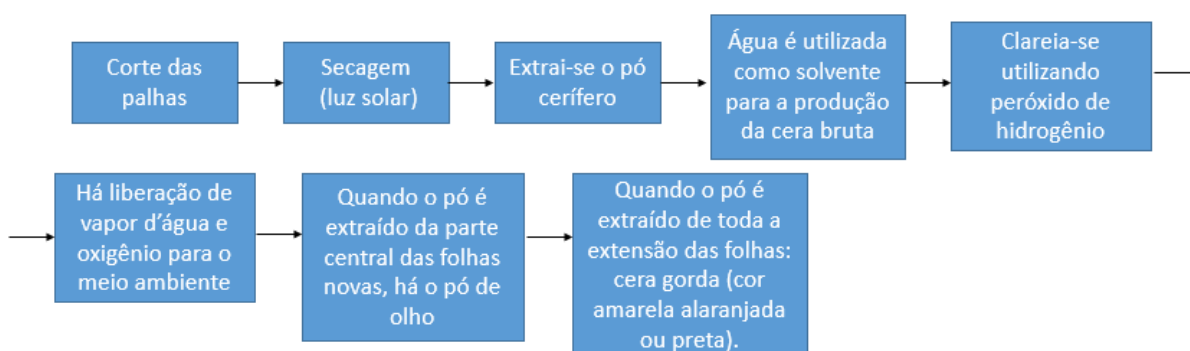
A cera de carnaúba é uma mistura complexa majoritariamente formada por compostos alquílicos (grupos de carbono e hidrogênio) de cadeia longa, exercendo uma grande importância na interação entre o ambiente e as plantas (BATISTA, 2010). De acordo com Miranda (2015), a cera de carnaúba possui uma estrutura lipídica complexa, na qual, através de Miranda (2015, apud Vandenburg e Wilder, 1970) é composto por:

- Éster de melissil ceronato (38- 40%);
- Diésteres p-idroxicinâmico alifático (20-23%);
- Ésteres Z-hidroxi-alifático (12-14%);
- Álcoois mono-hídricos (10-12%);
- Diésteres p-metoxicinamato alifático (5-7%)
- Combinações de hidrocarbonetos (5-7%).

De acordo com Li e Parish (1997), a cera de carnaúba tem um valor de acidez de 2,9 a 9,7, um valor de éster de 39 a 55, um valor de saponificação de 79 a 95, um valor de iodo de 7 a 14, e uma faixa de fusão de 78 a 85°C.

De uma forma geral, a cera de carnaúba pode ser obtida de acordo com as seguintes etapas, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Etapas para a obtenção da cera de carnaúba tradicional



Fonte: Autoria própria (2018)

Sendo considerado um produto nobre, e devido ao apelo atual para o desenvolvimento sustentável e a preservação ambiental, a utilização de produtos naturais se torna bastante importante e, pensando nisso, como a extração da cera não causa danos ao meio ambiente, uma vez que a extração das folhas sempre são repostas no ano seguinte (ALVES e COELHO, 2006), temos que a produção da cera de carnaúba tem alto valor econômico e social (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009) além de ser atóxico (NASCIMENTO et al., 2013).

Do Nascimento et al. (2013) afirma que há duas formas de se extrair a cera de carnaúba: industrial e artesanal. A primeira possui três tipos, a saber: I, III e IV; a segunda, também três: amarela ou cera olho, arenosa e gorda. Sendo as indústrias química fina, farmacêutica, alimentícia, informática e cosmética, um dos maiores consumidores de ceras do tipo I e tipo III, por possuírem maior grau de pureza.

Existem várias classificações para a cera de carnaúba, entre elas, há a classificação a partir da Instrução Normativa SARC N° 10 (11 de dezembro de 2002), que a classifica pela coloração e qualidade da cera de carnaúba, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da cera de carnaúba pela Instrução Normativa SARC N° 10 (11 de dezembro 2002)

Tipo	Cor	Nome popular	Impureza (%)	Umidade (%)
1	branco/amarelo claro	Flor ou olho	1	2
2	amarela/acinzentada/esverdeada	Mediana	1	2
3	castanho claro/amarela/esverdeada	Cauipe ou gorda clara	2	2
4	castanho escuro/verde escuro/preto	Gorda escura ou gorda batida	2	2
5	esbranquiçada/acinzentada/esverdeada	Arenosa	2	6

Fonte: Adaptado de Ferreira (2009)

É importante saber que a presença de cera nas folhas da carnaúba existe apenas no nordeste do Brasil, uma vez que a planta teve que se adaptar a estas regiões secas para que não houvesse a perda de água por transpiração e a proteção da planta contra o ataque de fungos (DO NASCIMENTO et al., 2013).

Outro ponto que se deve mencionar a partir de Do Nascimento et al., (2013) é que a cera de carnaúba é utilizada em várias áreas, e suas principais aplicações são as que seguem:

- Informática (chips, código de barras, tonners);
- Polidores (pisos, móveis, couro e carros);
- Tintas, papel carbono, filmes plásticos e;
- Outros.

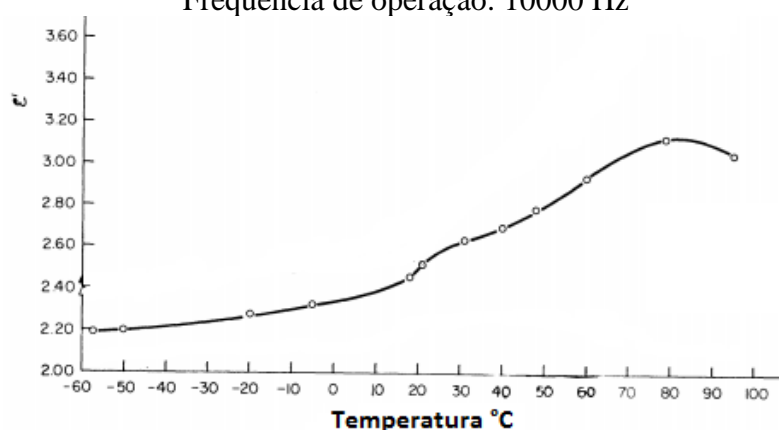
A cera de carnaúba é obtida quando do corte das palhas, há a secagem, na qual este processo é feito à luz solar. Quando há a extração do pó cerífero, tem-se que o rejeito se transforma em adubo; e na produção da cera bruta, a água é utilizada como solvente. Depois disso, ocorre o clareamento, onde age o peróxido de hidrogênio, o qual libera para o ambiente vapor d'água e oxigênio.

Quando o pó é extraído da parte central das folhas novas, tem-se o que se conhece por “pó de olho”, a cera do tipo I, de cor amarelo ouro. E quando se obtém o pó de toda a extensão das folhas, há a produção de cera gorda, que possui cor amarela alaranjada ou preta.

2.2.4 Propriedades da Carnaúba

De acordo com Callinan e Parks (1959), através de uma ampla faixa de temperatura e frequência, pode-se observar a mudança da constante dielétrica (Figura 19) e das curvas de perdas de determinadas substâncias. E a partir disso, podem-se fazer observações sobre como se dá o comportamento delas. Quando se tem moléculas polares, estas podem ser divididas em duas classes, cristalina e amorfa; no caso de amorfa, a constante dielétrica vai aumentando muito lentamente quando há um acréscimo de temperatura, pois ocorre a diminuição da viscosidade e a conseqüente facilidade de orientação das moléculas quando se tem um campo aplicado.

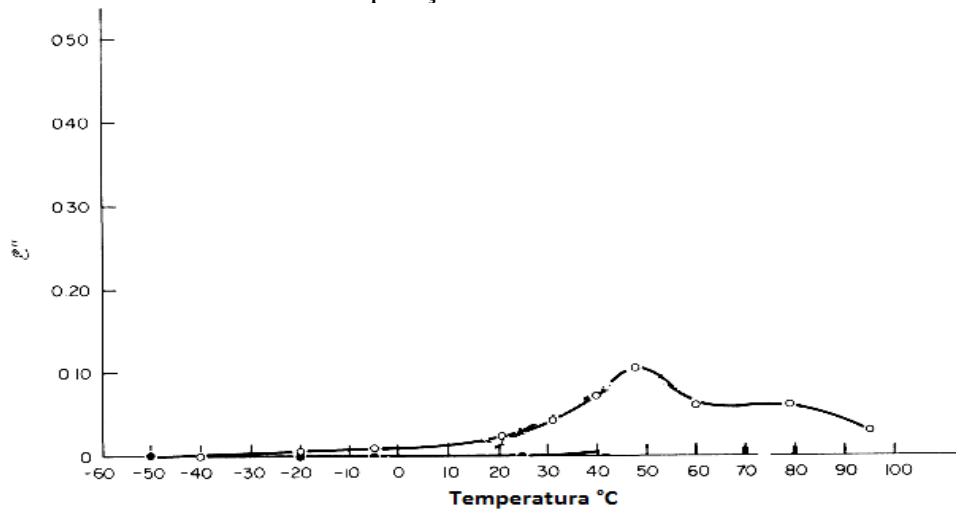
Figura 19 - Variação da constante dielétrica da cera de carnaúba em relação à temperatura. Frequência de operação: 10000 Hz



Fonte: Adaptado de Callinan e Parks (1959)

Quando o material está completamente líquido, a constante dielétrica diminui devido à diminuição da densidade de moléculas polarizáveis e pelo grau de orientação permitido quando se aumenta o movimento térmico. E quando se tem valores máximos nas curvas de perda, isso quer dizer que está ocorrendo o relaxamento de grupos polares e segmentos de corrente quando o material está em seu estado líquido, como observado na Figura 20. Já para um material cristalino, observará um aumento abrupto na constante dielétrica no ponto de fusão.

Figura 20 - Variação do fator de perdas dielétricas da cera de carnaúba. Frequência de operação: 10000 Hz

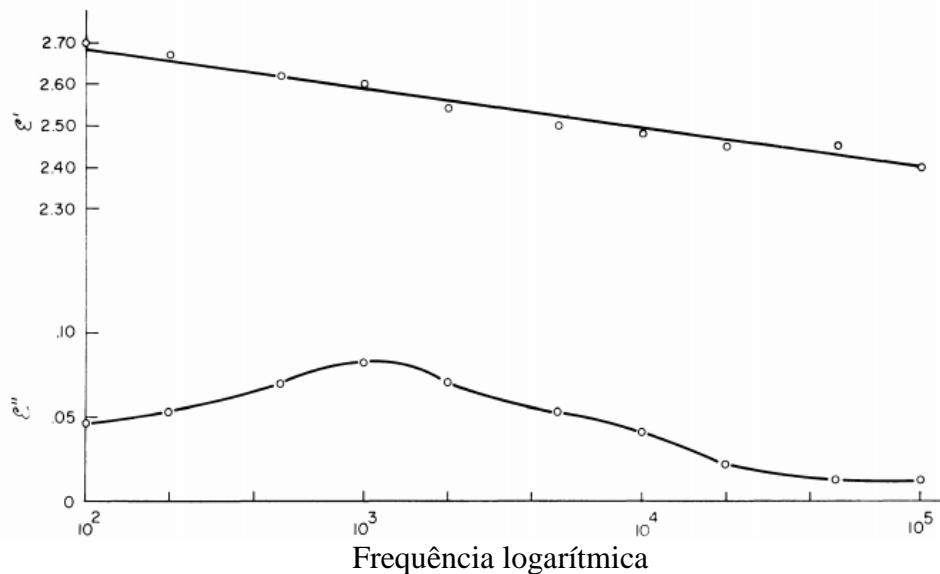


Fonte: Adaptado de Callinan e Parks (1959)

A cera de carnaúba, objeto de estudo do presente trabalho, está em uma classe intermediária, e ainda de acordo com Callinan e Parks (1959), as moléculas têm a capacidade de girar no estado sólido a temperaturas bem abaixo do ponto de fusão, sem que haja a destruição da estrutura de cristal.

A Figura 21 mostra como se dá o comportamento da constante dielétrica e do fator de perda dielétrica da cera de carnaúba à temperatura de 26 °C numa faixa de frequência que varia de 0,1 kHz a 100 kHz. Observa-se um decréscimo da constante dielétrica à medida que a frequência aumenta e um aumento das perdas até certa faixa de frequência, com posterior decréscimo.

Figura 21 - Variação da constante dielétrica e do fator de perdas da cera de carnaúba à 26 °C e um intervalo de frequência de 0,1 a 100 kHz



Fonte: Callinan e Parks (1959)

2.3 Propriedades Elétricas

2.3.1 Permissividade Elétrica

De acordo com Landau e Lifshitz (1960), para reduzir o campo elétrico total no interior do material, utiliza-se a permissividade elétrica, que é uma medida para saber o quanto um campo elétrico afeta e é afetado por um meio dielétrico, e é determinada pela capacidade de um material em polarizar-se eletricamente em resposta a um campo aplicado, para que haja um cancelamento parcial do campo dentro do material. Para Callister (2000), este parâmetro é importante no estudo de materiais dielétricos, e é dada por $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$, no vácuo é representada por ϵ_0 e tem valor igual a $8,85 \times 10^{-12}$ C²/Nm², sendo ϵ_r a permissividade relativa, ϵ_r' a constante dielétrica (parte real da permissividade relativa) e ϵ_r'' corresponde ao fator de perda. O que a torna importante é a sua utilização quando se deseja saber a permissividade relativa de um material isolante quando submetido a um meio, e sendo este valor sempre maior em magnitude que ϵ_0 , é obtida a partir da Equação 21, representando o aumento na capacidade de armazenamento de cargas pela inserção do meio dielétrico, por exemplo, entre duas placas. Logo, a permissividade elétrica relativa é a razão entre a quantidade de energia armazenada em um determinado material e a

contida no vácuo. Vale salientar também que o valor de permissividade é totalmente dependente da frequência de trabalho.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (21)$$

A interação que existe entre os campos e a matéria é dada através da polarização, podendo esta ser permanente ou induzida, assim como pelos momentos de dipolo atômicos ou moleculares de um corpo ao ser submetido a um campo externo (MORAIS, 2015).

Existem três tipos de polarização: polarização iônica, eletrônica e dipolar. De uma forma geral, Callister (2000) afirma que a polarização é o alinhamento de momentos dipolares moleculares ou atômicos, quando externamente, aplica-se um campo elétrico, e cada material dielétrico exibe pelo menos um desses tipos de polarização, pois depende da forma que o campo externo é aplicado, assim como do tipo de material que está sendo trabalhado.

De Callister (2000):

- A **polarização eletrônica** é observada em todos os materiais dielétricos, e só ocorre enquanto houver um campo elétrico presente. E resulta do deslocamento da nuvem eletrônica carregada negativamente em relação ao núcleo positivo de um átomo por um campo elétrico;
- A **polarização iônica** só ocorre em materiais iônicos, na qual origina um momento dipolar resultante devido ao campo que desloca os cátions em uma direção e dos ânions no sentido inverso;
- A **polarização dipolar** é encontrada somente em substâncias que possuem momentos de dipolo permanentes, que resulta na rotação dos momentos permanentes na direção do campo aplicado.

A permissividade relativa, então, tem relação direta com a frequência, devido aos tipos de polarização existentes, e devido a estas polarizações pode-se determinar o comportamento dielétrico do material, porque os dipolos orientados criam um campo que se sobrepõe ao campo externo (MORAIS, 2015). De acordo com Callister (2000), muitas situações práticas trabalham com corrente alternada (CA), e isto faz com que o campo elétrico ou a tensão elétrica que são aplicados mudem de direção ao longo do tempo. A Tabela 4 mostra valores de constante dielétrica para alguns materiais em determinadas frequências.

Tabela 4 - Valores das constantes dielétricas para alguns materiais

Material	Constante Dielétrica	
	60 Hz	1 MHz
	<i>Cerâmicas</i>	
		15 –
Cerâmicas à base de titanato	-	10000
Mica	-	5,4 - 8,7
Esteatita	-	5,5 - 7,5
Vidro de cal de solda	6,9	6,9
Porcelana	6	6
Sílica fundida	4	3,8
	<i>Polímeros</i>	
Fenol-formaldeído	5,3	4,8
Náilon 6,6	4	3,6
Poliestireno	2,6	2,6
Polietileno	2,3	2,3
Politetrafluoroetileno	2,1	2,1

Fonte: Adaptado de Callister (2000)

De acordo com Balanis (2005), quando se tem substratos finos e que possuem valores elevados de constante dielétrica, eles são desejáveis nos circuitos de micro-ondas, já que possuem pouco espaço e um melhor confinamento dos campos, o que faz minimizar radiação, além de acoplamentos indesejáveis, apesar de que irão possuir banda mais estreita e perdas maiores, diferindo dos substratos espessos e de menor constante dielétrica, os quais são mais adequados para antenas de bom desempenho, garantindo maior eficiência, maior largura de banda e possuindo campos mais soltos, o que facilita a propagação no espaço, mas a custo de elementos de maiores dimensões.

Barros (2012) afirma que alguns materiais com valores de permissividades relativas intermediárias, como alumina, fibra de vidro e o RT-Duroid são bastante utilizados na fabricação de antenas, havendo uma relação direta entre a constante dielétrica de propagação e as perdas na antena, uma vez que, como o substrato funciona como um capacitor, quanto maior for a capacidade de armazenamento, maior será a quantidade de energia perdida. E ainda o mesmo autor afirma que a espessura do substrato também interfere no desempenho da antena, e introduz as ondas de superfície na estrutura.

2.3.2 Tangente de Perdas

Pozar (1998), define a tangente de perdas, como a relação entre a parte imaginária efetiva da permissividade e a sua parte real, como observado na Equação 22.

$$\tan(\delta) = \frac{\omega\epsilon'' + \sigma}{\omega\epsilon'} \quad (22)$$

onde,

σ = condutividade elétrica do meio;

ω = frequência angular da tensão aplicada;

ϵ' = parte real da permissividade ϵ ;

ϵ'' = parte imaginária da permissividade.

Quando se tem valores de frequência elevados, foco do nosso estudo (frequência micro-ondas), o produto $\omega\epsilon'' \gg \sigma$, e isto faz com que possa ser feita uma aproximação para o cálculo da tangente de perdas como mostra a Equação 23, espera-se que esses valores de tangente de perdas sejam baixas.

$$\tan(\delta) \approx \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (23)$$

2.4 Propriedades mecânicas

As antenas de microfita podem estar sujeitas a solicitações mecânicas variadas, as quais estas podem ser do tipo trativas, compressivas, flexoras, cisalhantes ou compostas, um exemplo disto encontra-se no trabalho de Holanda (2016) ao trabalhar com um dispositivo flexível com fibras têxteis. Um método bastante utilizado é o ensaio de tração, a qual se pode quantificar o limite de resistência a tração (LRT) do material dielétrico. Este resultado é encontrado através da padronização de amostras, e de acordo com a Norma Brasileira (NBR) 6152 (2002): “os corpos de prova devem ser presos por meios adequados, como por exemplo, cunhas, extremidades rosqueadas ou ombreadas”. Apesar deste ensaio, há outros métodos que

quantificam o LRT médio de materiais demasiados frágeis, conhecido por ensaio de compressão diametral.

2.4.1 Ensaio por compressão diametral

Antes de comentar sobre o ensaio por compressão diametral, precisa-se introduzir a importância da deformação, que através de Souza (1982) conceitua-a como a variação de uma dimensão qualquer de um determinado corpo, por uma unidade da mesma dimensão, quando este corpo é submetido a um esforço qualquer até a sua ruptura, tal qual a Equação 24.

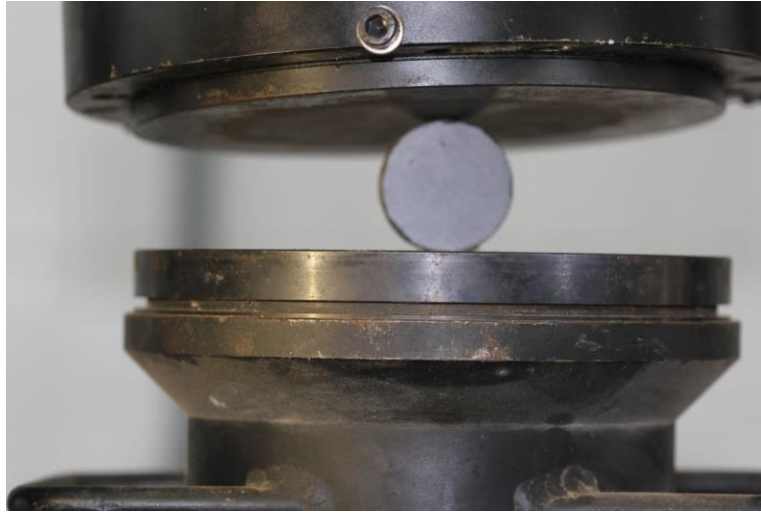
$$\varepsilon = \frac{\delta}{D_0} \quad (24)$$

onde, δ é a variação da dimensão inicial e final do diâmetro da amostra e D_0 é o diâmetro inicial.

O ensaio por compressão diametral foi descoberto pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, brasileiro, na época da segunda Guerra Mundial, em 1943, para analisar a resistência à tração do concreto de forma indireta. Esse ensaio é conhecido mundialmente por “ensaio brasileiro”, e é um dos ensaios mais utilizados por ser de fácil execução e moldagem (FALÇÃO e SOARES, 2002).

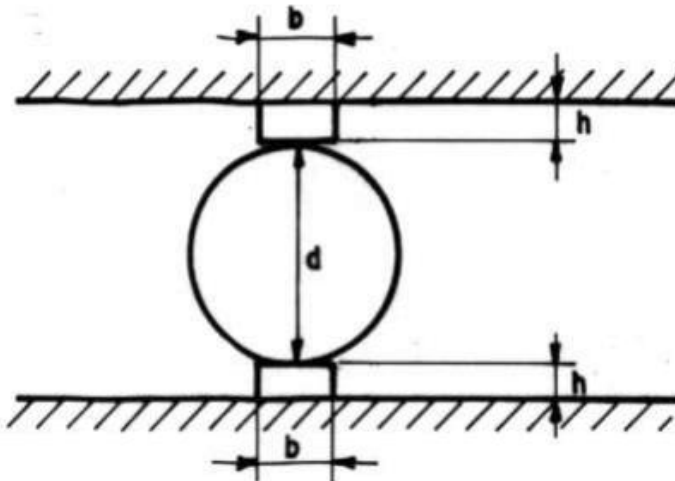
A NBR 7222 (2011) afirma que esse ensaio consiste na colocação do corpo de prova cilíndrico entre os pratos da máquina de ensaio, da forma como se encontra na Figura 22, que será submetido a cargas diametraes. Além disso, pode-se colocar ou não frisos para a realização do ensaio (Figura 23), a fim de que a distribuição da carga aplicada seja uniforme ao longo de todo o comprimento da amostra. Onde h é a altura do friso, b é a largura e d é o diâmetro da amostra.

Figura 22 - Exposição de um corpo de prova que será submetido a ensaio de tração indireta



Fonte: Autoria própria (2018)

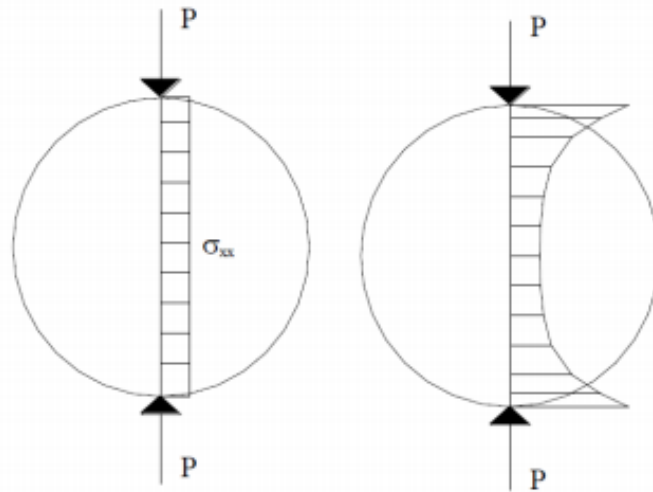
Figura 23 - Colocação de frisos para o ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: NBR 7222 (1994)

A colocação dos frisos interferirá nos resultados obtidos para os resultados de tensão e deformação horizontal, como cita Falcão e Soares (2002) - neste estudo, trabalhar-se-á sem a utilização deles – pois o modelo não é o mais utilizado. Para o ensaio de compressão diametral, a distribuição da tensão normal média na direção horizontal, σ_{xx} , e das deformações axiais pontuais horizontais não uniformes, devido às cargas concentradas, são mostradas na Figura 24.

Figura 24 - À esquerda observa-se a tensão média sob o corpo de prova e à direita se dá o comportamento das suas deformações no ensaio de compressão diametral



Fonte: Adaptado de Falcão e Soares (2002)

Através de Souza (2015), embora o ensaio tenha sido desenvolvido inicialmente para avaliar a resistência à tração do concreto, estudos posteriores utilizaram-se do ensaio para determinar o LRT de maneira indireta de solos, rochas e materiais cerâmicos, os quais todos possuíam corpos com formato cilíndrico. Souza (2015) ainda mostra que este ensaio é normatizado pela Associação ASTM (D 3967-95a), entretanto, também é possível encontrar padronizações de outras normas.

A norma NBR 7222 (2011) mostra que a resistência à tração por compressão diametral (ou tensão de ruptura, já que se trata de um material frágil) uniforme σ_R na direção-x positiva é dada pela Equação 24.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (24)$$

onde:

F é a força máxima aplicada em Newtons (N);

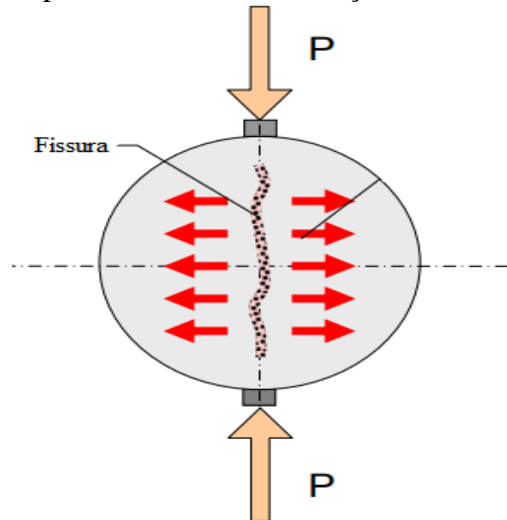
D é o diâmetro do cilindro (corpo de prova) em milímetros (mm) e;

H é a altura do corpo de prova em milímetros (mm).

Falcão e Soares (2012) lembra ainda que o cilindro que está submetido ao ensaio de compressão diametral se encontra em um estado multiaxial de tensões de modo que os pontos

sobre o diâmetro solicitado não estão unicamente submetidos a tensões de tração como mostrados na Figura 25.

Figura 25 - Exemplificação da formação da fissura vertical durante o ensaio de compressão diametral e direção das tensões



Fonte: Adaptado de Thomaz (2019)

Souza (2015) evidencia que a máquina de ensaio de tração, com seus acessórios, não identifica deformações perpendiculares ao movimento dos pratos da máquina e que é possível a utilização do ensaio de compressão diametral para obtenção do LRT médio aproximado.

Através de técnicas computacionais, pode-se obter estas deformações através da extensometria óptica por correlação de imagens. O próximo subtópico adentrará neste ponto, que será objeto de estudo para este trabalho.

2.4.1.1 Extensometria óptica por correlação de imagens

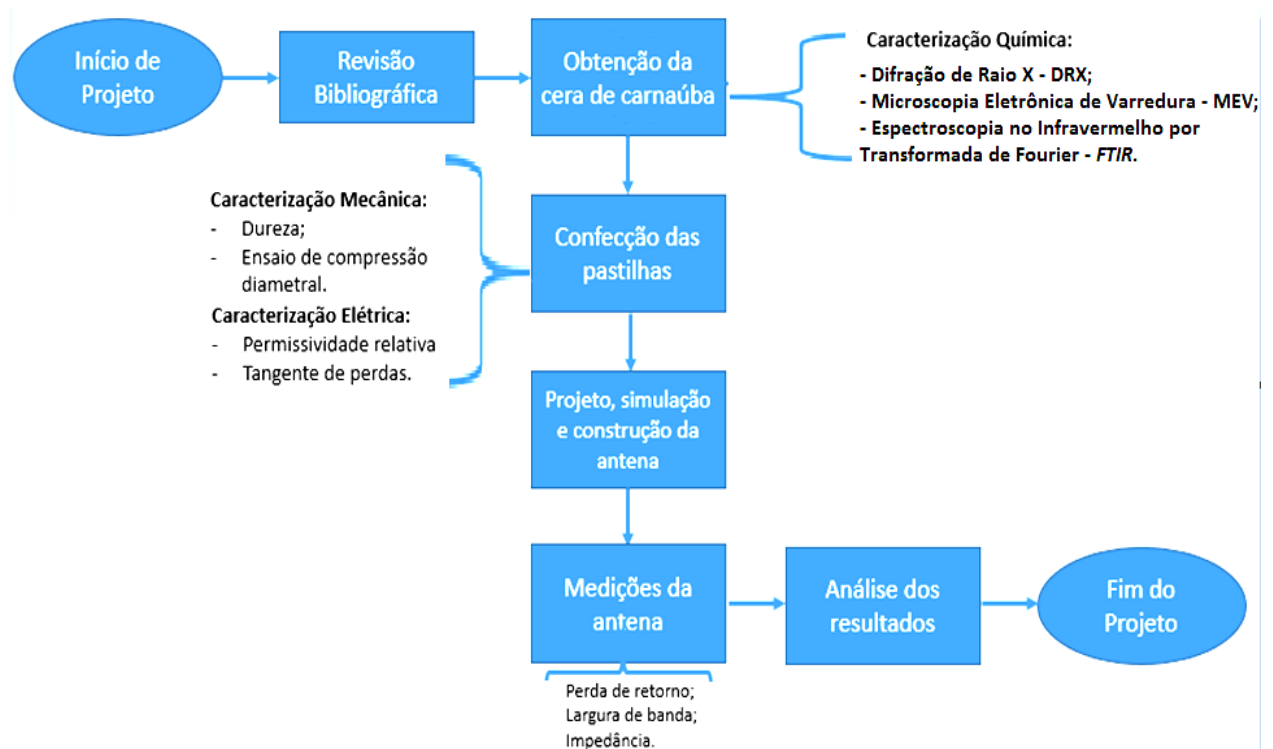
A extensometria óptica pelo método de correlação de imagens garante alta precisão e confiabilidade nos resultados em todas as direções do plano estudado (SENA, 2013). A obtenção dos dados neste método é realizada através do programa computacional Correli $Q4^{LMT}$. Sendo este um programa implementado no software Matlab[®], tem como função medir os deslocamentos e deformações em materiais por correlação digital de imagem. Na correlação de imagens, utiliza-se várias fotografias por segundo durante todo o ensaio com uma câmera de alta definição. Para uma efetiva análise deste método, a amostra deve ser texturizada homogeneamente com níveis de cinza (FRANÇA, 2011). A Figura 22 exemplifica um corpo de prova com níveis de cinza.

Sena (2013), explica como fazer a análise da correlação de imagem no Correli $Q4^{LMT}$: uma imagem de referência do material sem deformação é comparada com as outras diversas imagens durante o ensaio (corpo está sofrendo deformação). Os cálculos para a obtenção da deformação ocorrida durante o ensaio são realizados ao escolher uma área quadrada de importância, chamada de região de interesse (ROI), em pequenas regiões dessa área é gerado diretrizes chamadas de zonas de interesse (ZOI). A partir disto, o programa reconhece cada zona escolhida e baseia-se na escala de cinza para diferencia-las para posteriormente, a partir dessa diferença e da distorção sofrida entre a zona de referência e a do material já deformado, é obtido o cálculo dos campos de deslocamento em pixels.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão descritos os materiais e métodos que foram empregados para a realização de todo o projeto - desde a etapa de caracterização do material, até o teste com a antena de cera de carnaúba. A Figura 26 mostra de forma sucinta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

Figura 26 - Esquemática dos processos envolvidos



Fonte: Autoria própria (2018)

Na etapa inicial do projeto, estudou-se a possibilidade de utilizar a cera de carnaúba como substrato para antenas de microfita. Sabendo de sua funcionalidade como dielétrico, iniciou-se as caracterizações da cera de carnaúba do tipo I, a qual foi doada de uma empresa que está localizada na cidade de Mossoró, como mostra a Figura 27.

Figura 27 - Porção da cera de carnaúba do tipo I utilizada no presente trabalho



Fonte: Autoria própria (2018)

A fase de caracterização da cera de carnaúba foi realizada para obter as propriedades elétricas, químicas, físicas, térmicas e mecânicas. Através do MEV, pôde-se observar a superfície do material, a aparência das partículas e observar a homogeneidade da cera, e do DRX para saber sua microestrutura e FTIR para observar os grupos funcionais da cera. Concomitantemente, realizou-se a caracterização elétrica do material com o intuito de obter os parâmetros de permissividade elétrica e tangente de perdas. Após essas etapas, a obtenção dos parâmetros elétricos e físicos foram utilizados para calcular as dimensões das antenas de microfita, através do programa em Fortran, o método da cavidade e o modelo de linha de transmissão, tendo obtido esses valores, as antenas foram simuladas utilizando o software Ansys HFSS® (*High Frequency Structural Simulator*) para a aquisição dos principais parâmetros de operação da antena – coeficiente de reflexão, diagramas 2D e 3D e ganho.

Foram simulados dois tipos diferentes de antenas de microfita, a com *patch* retangular e a outra com *patch* circular, e a partir da obtenção dos dados simulados, ambas foram construídas para posterior comparação entre o medido e o simulado.

3.3 Caracterização do Substrato

As seções que seguem servirão para compreender melhor os procedimentos adotados nas etapas de caracterizações da cera de carnaúba de forma detalhada, visando a aplicação e ainda a obtenção dos parâmetros elétricos para o projeto da antena.

3.1.1 Caracterização Física

Um agitador magnético com aquecimento disponível no Laboratório de Processos Químicos – UFERSA, foi empregado no aquecimento do material até seu ponto de fusão. (Figura 28 – (a)). O termostato (Figura 28 - (b)), foi utilizado para obter o valor real da Temperatura de Fusão da cera de carnaúba

Figura 28 - (a) Agitador Magnético com Aquecimento utilizado para a obtenção da pastilha de cera de carnaúba (b) Termostato utilizado na obtenção da temperatura de fusão da cera de carnaúba

(a)



(b)



Fonte: Autoria própria (2018)

3.1.2 Caracterização estrutural

3.1.2.1 Caracterização por Difração de Raios-X

Uma amostra da cera de carnaúba em escama foi caracterizada por difração de raio X, num difratômetro marca XRD-6000 da SHIMADZU.

As varreduras foram feitas no range de 10° a 80° , com passo de 2 graus por minuto.

No procedimento, foi retirado material da região central da amostra, a fim de evitar indicações de contaminações pelo equipamento.

Esse procedimento experimental foi executado no Laboratório de Difração de Raios X, localizado no CITED - UFERSA.

3.1.2.2 Caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a análise da homogeneidade da cera de carnaúba, uma amostra da cera em escama foi feita para que pudesse ser observada em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), fabricante TESCAN, modelo Veja 3LMU (Figura 29 (a)). Utilizou-se elétrons secundários para análise.

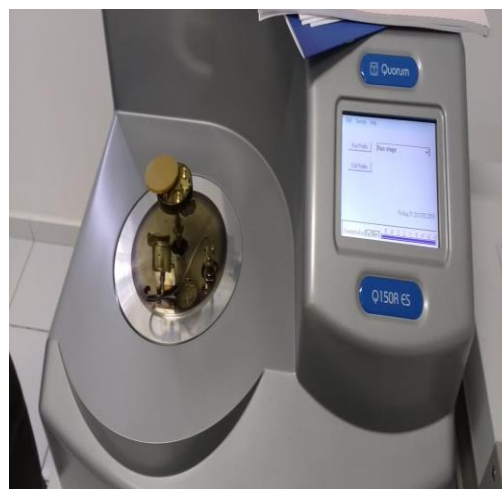
Para uma melhoria da qualidade das imagens obtidas, utiliza-se o equipamento de metalização de superfícies, a partir de plasma, que deposita uma fina camada condutora de ouro na superfície do material. O metalizador utilizado, da marca Quorum, modelo Q150RES está mostrado na Figura 29 (b).

Figura 29 - (a) Fotografia do Microscópio Eletrônico de Varredura pertencente à UFERSA (b) Metalizador para deposição de material condutor na superfície do corpo de prova

(a)



(b)



Fonte: Autoria própria (2018)

3.1.2.3 Caracterização por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier-TFIR

A técnica de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) é utilizada quando se deseja identificar as bandas características dos grupos funcionais presentes nos materiais. O espectro vibracional para a região de infravermelho da cera de carnaúba foi obtido na região de 4000 a 400 cm^{-1} . Na obtenção do infravermelho foi utilizado

o Equipamento Shimadzu modelo IRTracer-100. As medidas foram realizadas por *ATR* (Refletância Total Atenuada) com cristal de seleneto de zinco e resolução 8 cm^{-1} com passo de $2,8\text{ mm/s}$. A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMat localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.3.1 Medidas Mecânicas

3.3.1.1 Medição de microdureza Vickers

Através de experimentos realizados no Grupo de Estudos de Tribologia & Integridade Estrutural (GET) - UFRN foi possível, a partir do equipamento de microdureza PANTEC MV2000A (Figura 30), medir a microdureza do material utilizado no presente trabalho.

Figura 30 - Equipamento utilizado para a medição da microdureza da cera de carnaúba

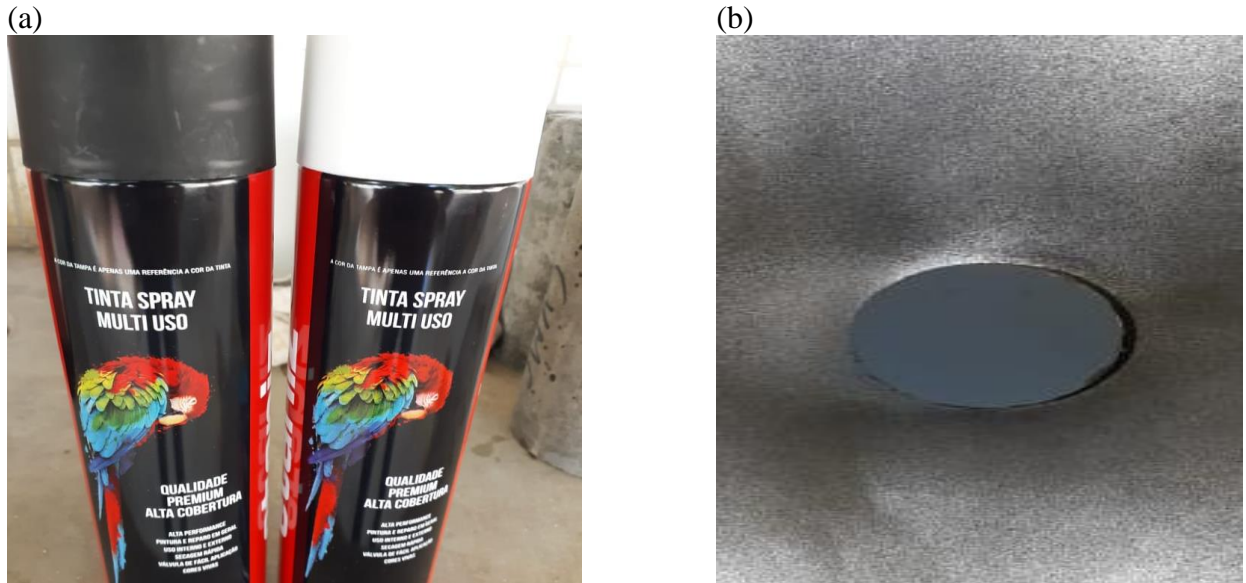


Fonte: Autoria própria (2018)

3.3.1.2 Preparação das amostras para a correlação de imagens

Com os corpos de prova obtidos para a realização do ensaio de compressão diametral, com superfície lisa e plana e no total de seis amostras, foi possível obter uma texturização de tonalidade cinza através da pintura de uma camada de tinta preta seguida de gotículas de tinta branca antes de realizar o ensaio, Figura 31, esta textura garante o funcionamento adequado do programa Correli $Q4^{LMT}$.

Figura 31 - (a) Tintas utilizadas para a texturização de tonalidade cinza das amostras (b) Amostra final pós pintura



Fonte: Autoria própria (2019)

Para a realização dos ensaios, utilizou-se a máquina de ensaio universal da marca EMIC, modelo DL10000 com capacidade de 100 kN. A máquina é conectada ao software TESC que recebe os dados do ensaio e fornece o gráfico Força x Deslocamento da célula de carga, além de especificar os dados de tensão de escoamento e carga, tensão de ruptura, alongamento percentual, entre outros. A Figura 32 mostra o exemplo utilizado no presente trabalho.

Figura 32 - Máquina de ensaio universal



Fonte: Autoria própria (2019)

A câmera fotográfica utilizada para a obtenção das imagens foi a Canon, do tipo EOS 60D, Figura 33.

Figura 33 - Câmera fotográfica EOS 60D



Fonte: Autoria própria (2019)

Organizou-se os equipamentos para o ensaio de tração por compressão diametral da seguinte forma: o corpo de prova foi posto na parte central do prato inferior, sendo este um prato fixo e o prato superior sendo móvel. Antes de iniciar o ensaio, montou-se a câmera fotográfica, em um tripé, na posição em que o obturador da câmera se localizasse de frente ao diâmetro do corpo de prova. A Figura 34 mostra o esquema dos equipamentos utilizados para a realização do ensaio e a posição a qual o corpo de prova se encontrava na máquina entre os pratos.

Figura 34 - Disposição dos equipamentos para a realização do ensaio



Fonte: Autoria própria (2019)

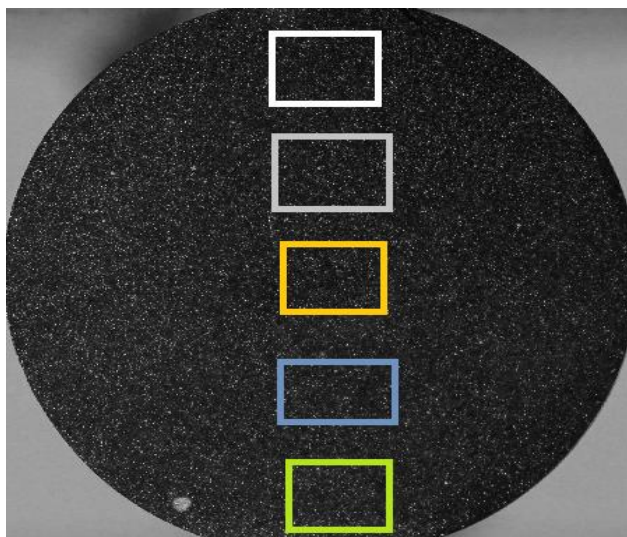
Para o ensaio, inicialmente utilizou-se cinco amostras da cera de carnaúba para a obtenção da velocidade de ensaio que fosse capaz de obter uma quantidade mínima de fotos,

além de que garantisse a observação do gráfico da força-tempo gerado pela máquina. Realizou-se uma pré-carga para adequar bem o corpo de prova aos pratos. Então, utilizou-se duas amostras para fazer o experimento na velocidade que melhor atendesse o objetivo supracitado. Após o ensaio, a etapa seguinte foi analisar as imagens do ensaio no programa para aquisição das deformações. Vale salientar que a quantidade de imagens foi um parâmetro que variou entre os ensaios destas duas amostras, devido ao tempo de ensaio que mudou. É importante dizer que o software a qual a câmera estava conectada fazia disparos a cada 5 segundos, ou seja, uma foto era tirada a cada 5 segundos.

Com os dados, utilizando o programa Correli Q4^{LMT} e através da função *correli_q4*, como visto anteriormente, esse programa foi implantado no Matlab®, o deslocamento das imagens captadas durante o ensaio foram adquiridas a partir da primeira imagem, que é a de referência. Onde nessa função, foi obtido um arquivo contendo esses deslocamentos (SOBRINHO, 2015).

Ainda por Sobrinho (2015), existe uma outra função, a função *gauge*, que ao ser aplicada no arquivo gerado através da função *correli_q4*, pode-se adquirir a deformação média da parte texturizada em cinza, estes *gauges* podem se posicionar em qualquer parte que cobre a seção transversal do cilindro, e sua quantidade pode ser quantas o operador quiser, mas, é ideal que todas as amostras tenham a mesma quantidade de *gauges*, para facilitar a análise. Para este trabalho foram utilizados cinco *gauges* quadrados virtuais. A Figura 35 mostra o posicionamento e quantidade de virtual *gauges* utilizados para aquisição das deformações.

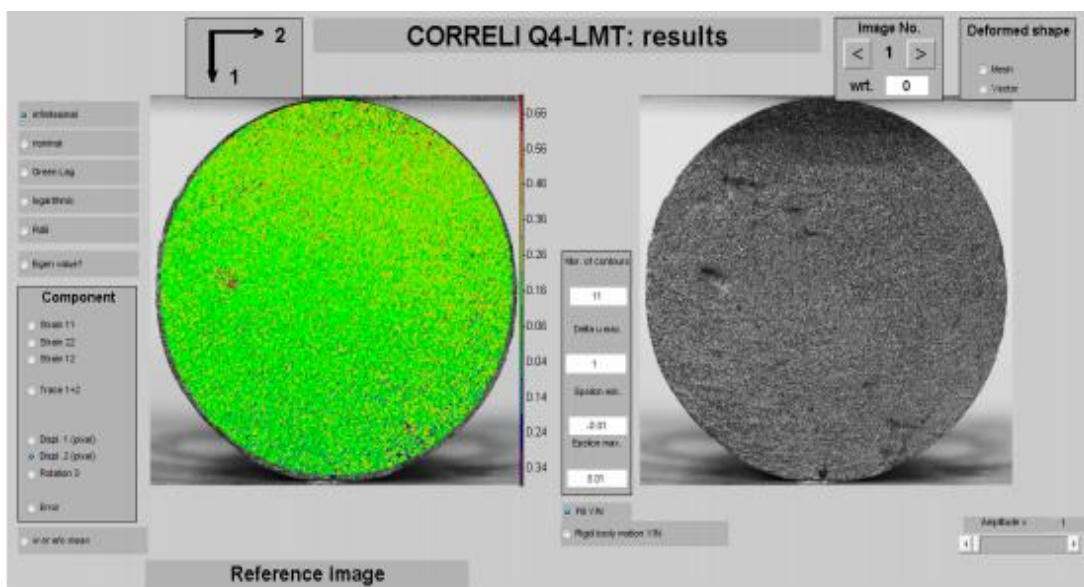
Figura 35 - Posicionamento dos *gauges* virtuais nos corpos de prova de cera de carnaúba



Fonte: Autoria própria (2019)

A interface do programa na função *correli_q4*, no item *Visualization* é mostrada na Figura 36, pode-se observar duas direções de análise: 1 e 2. A direção 1 para baixo e a direção 2 para a direita. A amostra à esquerda é a imagem a qual está sendo analisada, área texturizada computacionalmente, em relação à imagem da direita (de referência). De acordo com Sobrinho (2015), pode-se ver que ao lado esquerdo está selecionado Displ. 2, que indica o deslocamento na direção do eixo 22 (horizontal) - direção de interesse para analisar a tração por compressão diametral. Isto ocorre também para a análise da deformação.

Figura 36 - Representação da interface do programa Correli Q4^{LMT}



Fonte: Sobrinho (2015)

3.3.2 Medidas Elébricas

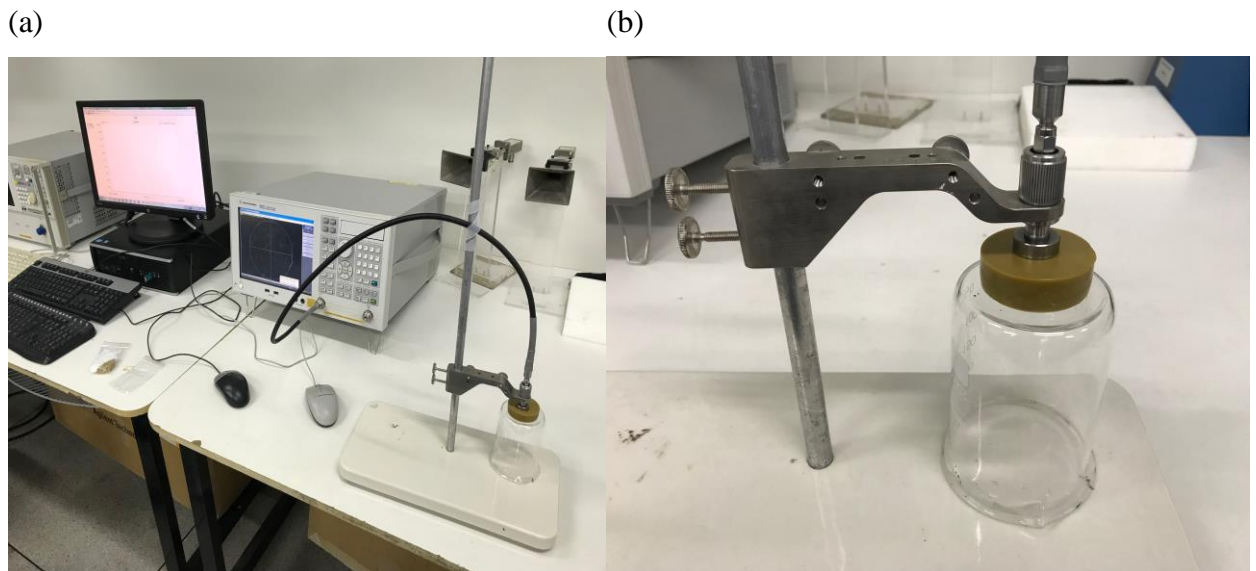
As medições dos parâmetros elétricos foram realizadas através do método de transmissão/reflexão com sonda coaxial e um kit para medição de impedâncias da Aligent E5071C, apresentado na Figura 37, disponível no Laboratório de Medidas em Telecomunicações, IFPB, João Pessoa. Neste método, a permissividade elétrica foi aferida através da medida dos campos eletromagnéticos, incidentes e refletidos, no material.

A amostra utilizada para o cálculo do valor da permissividade teve altura superior ao que está especificado por Aligent Technologies (2008), que considera o valor mínimo através da Equação 18.

$$h = \frac{20}{\sqrt{|\epsilon'|}} \quad (18)$$

A constante dielétrica foi estimada como o valor mínimo para os cálculos das equações do dimensionamento da antena, $\epsilon = 2,2$, obtendo o valor de $h = 13,51$ mm. Posteriormente, a sonda foi posicionada sob o elemento e foi efetuada a medição para o intervalo de 0,1 a 20,0 GHz. Por Holanda (2016), quando a sonda está em contato com a amostra, os campos presentes em sua extremidade sofrem alterações, havendo, desta forma, reflexão parcial do sinal enviado de acordo com o material analisado.

Figura 37 - (a) Equipamento utilizado para medir a permissividade elétrica da cera de carnaúba (b) Amostra utilizada para a medição

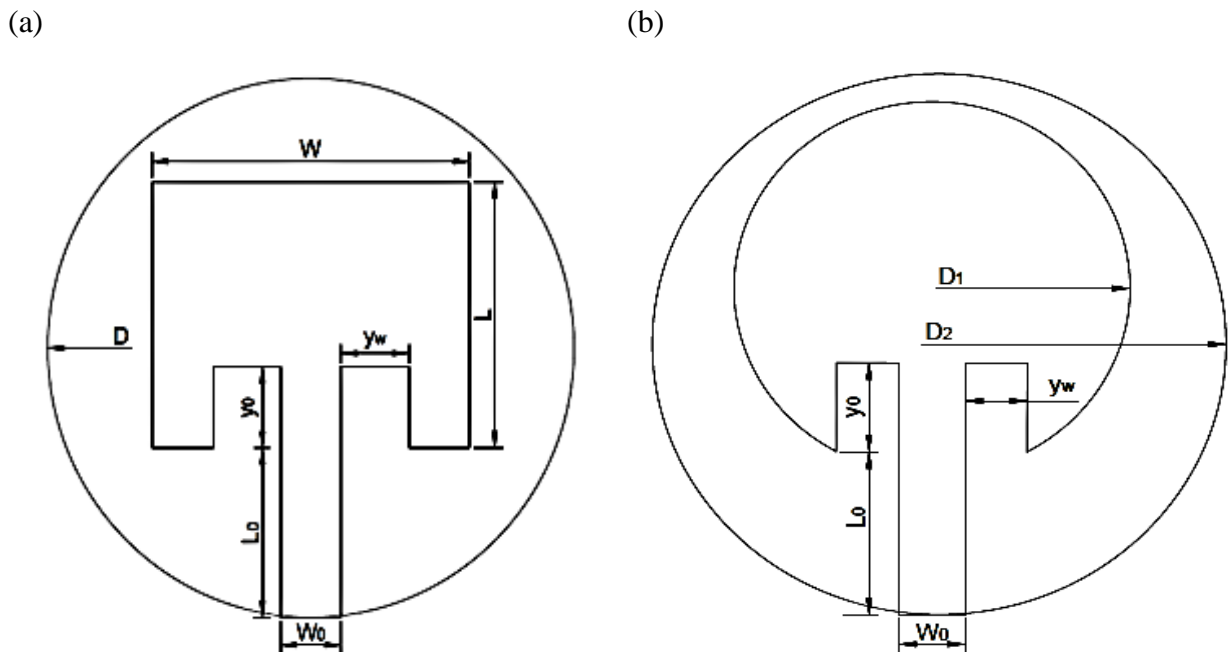


Fonte: Autoria própria (2018)

3.4 Projeto e simulação da antena de microfita

As propriedades elétricas adquiridas foram utilizadas para a simulação das antenas, e as dimensões delas foram obtidas através do programa desenvolvido em linguagem Fortran, utilizando os modelos da cavidade e da linha de transmissão. A Figura 38 ilustra as vistas frontais das antenas para o projeto final, com uma frequência de ressonância de 2,45 GHz, banda S.

Figura 38 Antena com substrato da cera de carnaúba com patch projetada (a) Vista frontal da antena com patch retangular (b) Vista frontal da antena com patch circular



Fonte: Autoria própria (2019)

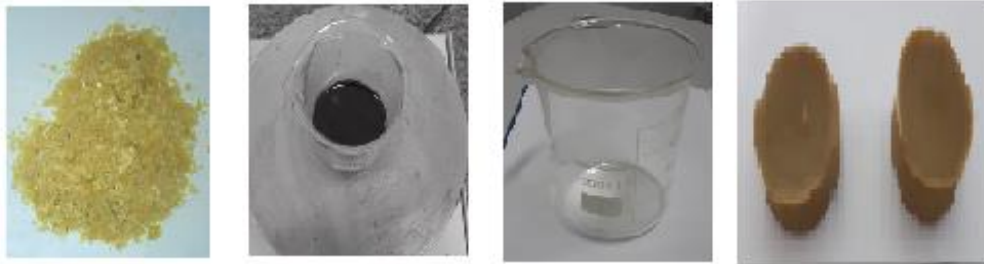
Um novo material foi criado com as propriedades elétricas encontradas, a permissividade relativa e tangente de perdas, para o substrato. A espessura do substrato usada foi definida para que o manuseio fosse possível e não houvesse fratura ou quebra do material para valores menores, uma vez que a cera de carnaúba é um material frágil, e então na simulação prezou-se por essa questão. O valor de permissividade relativa do material dielétrico utilizado na simulação foi a obtida da medição em laboratório. O material utilizado para o *patch* e o plano de terra foi o cobre. A simulação realizada no *software* Ansys HFSS® (*High Frequency Structural Simulator*) na faixa de frequência de 2 a 4 GHz e os parâmetros obtidos através desta análise foram o coeficiente de reflexão e diagrama de radiação 2D e 3D.

3.3 Construção e medição da antena

As duas antenas foram fabricadas e analisadas. A fabricação do substrato foi feita de forma artesanal, o procedimento para sua obtenção é mostrado como segue na Figura 39. O pó cerífero foi aquecido até a sua temperatura de fusão e resfriado no béquer de aquecimento até o resfriamento em um forno do tipo mufla para evitar o rápido resfriamento caso estivesse sendo resfriado à temperatura ambiente (Figura 40); após o resfriamento, as amostras não estavam com as dimensões desejadas, então, através de uma lixadeira metalográfica (Figura

41 (a)), utilizando alguns tipos de lixas para deixar a superfície bem polida (Figura 41 (b)), foi possível obter a espessura e o diâmetro esperados para comportar o *patch* como mostrado na Figura 42.

Figura 39 - Obtenção dos substratos para as antenas



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 40 - Forno tipo mufla utilizado para resfriamento da cera de carnaúba diluída



Fonte: Autoria própria (2019)

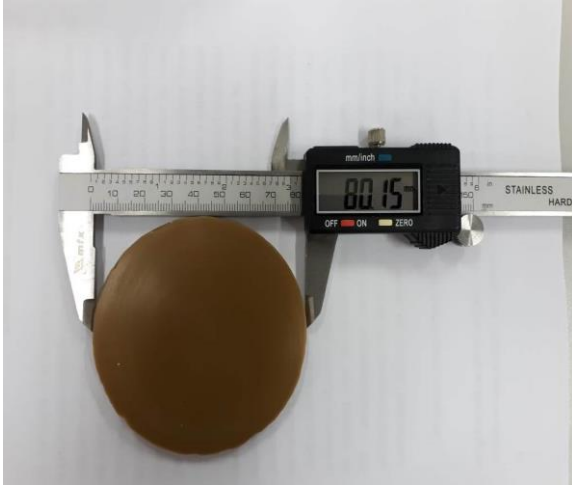
Figura 41 - (a) Politriz Lixadeira Metalográfica utilizada para polir a cera de carnaúba sílica e (b) tipos de lixas utilizadas na máquina



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 42 - Paquímetro utilizado mostrando os valores das medidas de diâmetro e espessura após processo de lixamento

(a)



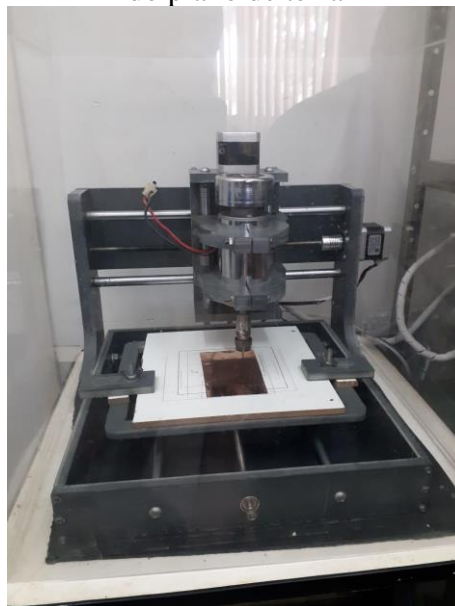
(b)



Fonte: Autoria própria (2019)

O corte do plano de terra e do *patch* foram realizados em um Mini CNC 2020b, o qual pode ser visualizado pela Figura 43. Utilizou-se adesivo de cobre de condutividade $5,8 \times 10^7$ S/m por ser vastamente utilizado na fabricação de antenas de microfita.

Figura 43 – Mini CNC 2020b de bancada utilizada para a obtenção das dimensões do *patch* e do plano de terra



Fonte: Autoria própria (2019)

Utilizou-se um conector SMA-KE fêmea reverso de cobre banhado a ouro para ligar a linha de transmissão ao plano de terra. E possui impedância de 50Ω e faixa de operação: 0 a 6 GHz, o conector está representado na Figura 44.

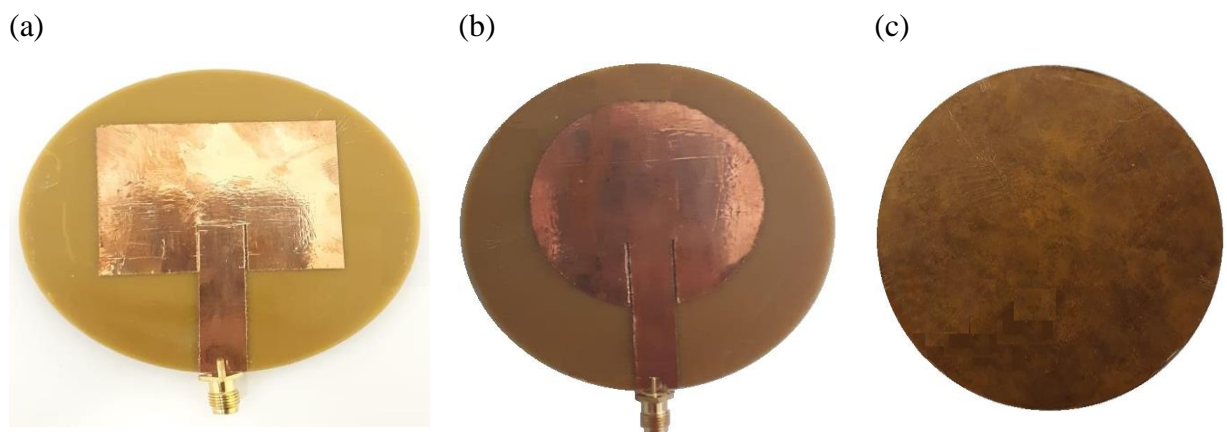
Figura 44 - Conector SMA-KE fêmea reverso



Fonte: Autoria própria (2019)

Após a obtenção dos constituintes para a confecção das antenas, o resultado encontra-se na Figura 45 as antenas com substrato de cera de carnaúba com *patch* retangular, *patch* circular e plano de terra.

Figura 45 - Antenas com substrato de cera de carnaúba circular (a) com *patch* retangular (b) *patch* circular (c) plano de terra



Fonte: Autoria própria (2019)

Como se pode observar, o corte realizado pela mini CNC pode não ter sido tão perfeito para as dimensões ideais do *inset feed* das antenas, devido ter sido trabalho com adesivo de cobre, e isto pode acarretar erros nos resultados finais obtidos, pelo casamento de impedância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, as análises dos resultados serão apresentadas. E referem-se às etapas de caracterização da cera de carnaúba, do projeto, da simulação e do teste da antena, para comparação e avaliação dos valores teóricos e reais.

4.1 Análises física, química e estrutural

4.1.1 Temperatura de fusão da cera de carnaúba

Foram feitas algumas amostras aquecidas até a temperatura de 74 °C, como mostra a Figura 46 no agitador, porém, esse valor de temperatura não é sensível, então utilizou-se um termostato para aferir a temperatura real, obtendo, assim, a temperatura de 83 °C. A Figura 47 mostra o resultado obtido no aquecimento utilizando o termostato, este valor é o esperado, como mostrado em Batista et al. (2010), o qual cita que os pontos de fusão da cera de carnaúba variam entre 79,2 °C e 84,2 °C.

Figura 46 - Agitador Magnético com Aquecimento utilizado para a obtenção da pastilha de cera de carnaúba



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 47 - (a) Termostato utilizado na obtenção da temperatura de fusão da cera de carnaúba
(b) Temperatura de fusão obtida no experimento

(a)



(b)

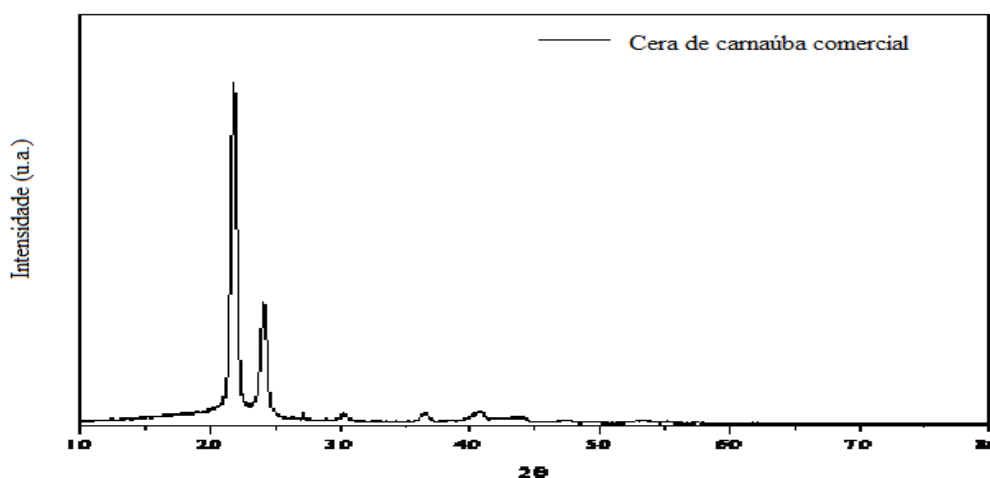


Fonte: Autoria própria (2018)

4.1.2 Difração de raios x

De acordo com Callinan e Parks (1959) a cera de carnaúba é composta por moléculas polares, na qual, apesar de ser considerada um material cristalino, possui propriedades amorfas, e pode-se observar, através da Figura 48, que ocorreu um padrão de difração típico de uma estrutura cristalina da cera de carnaúba. Este resultado também foi observado nos trabalhos de Freitas (2016) e Villalobos-Hernández e Müller-Goymann (2006), no qual, os dois picos consideráveis estreitos estão compreendidos entre 20° e 25° , para 2θ . Estes picos foram analisados e comparados com os autores acima, como mostrado na Tabela 5. Villalobos-Hernández e Müller-Goymann (2006) ainda observou que na análise dele, assim como no DRX realizado um terceiro pico que é característico da cera de carnaúba em $2\theta = 29,9^\circ$.

Figura 48 - Difratograma da cera de carnaúba realizada na Ufersa



Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 5 - Comparativo dos picos observados no DRX entre autores.

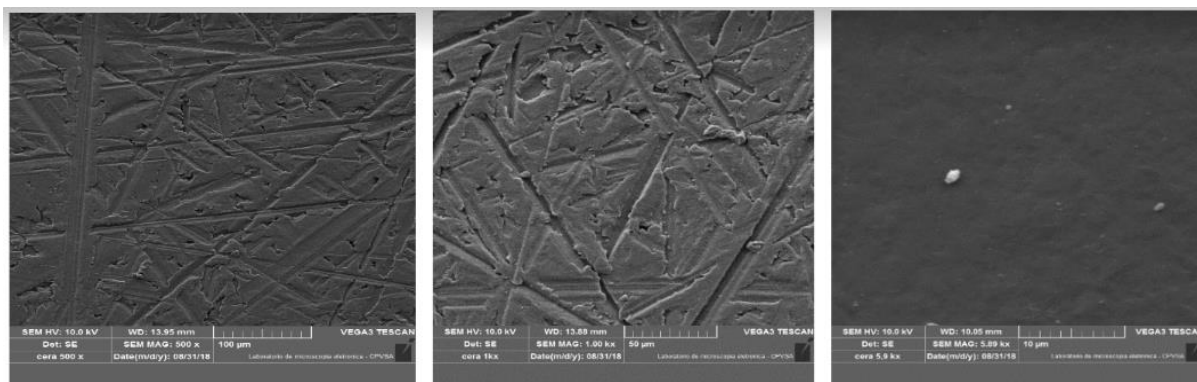
Ponto	Cera comercial (este trabalho)	Freitas (2016)	Villalobos e Müller (2006)
1	$21,82^\circ$	$21,65^\circ$	$21,60^\circ$
2	$24,12^\circ$	$24,00^\circ$	$23,80^\circ$

Fonte: Autoria própria (2018)

4.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O método MEV foi utilizado para a avaliação da estrutura superficial do pó cerífero (Figura 49). Após a obtenção da amostra de cera de carnaúba, como visto na Figura 39, precisou-se fazer o lixamento do corpo de prova, com uma lixa d'água com a menor granulometria de 1200, para ter-se uma estrutura plana e lisa. Observa-se um material compacto, não poroso, conciso e homogêneo.

Figura 49 - Imagem obtida por MEV utilizando SE para a superfície do corpo de prova da cera de carnaúba (a) 500x; (b) 1kx; (c) 5kx.



Fonte: Autoria própria (2018)

A utilização da MEV não possibilitou fazer comparações entre amostras com diferentes dopagens, uma vez que o estudo se baseou apenas na cera de carnaúba sem a adição de outros materiais para dopagem. E sua finalidade serviu apenas para a observação superficial das amostras utilizadas como substrato após polimento.

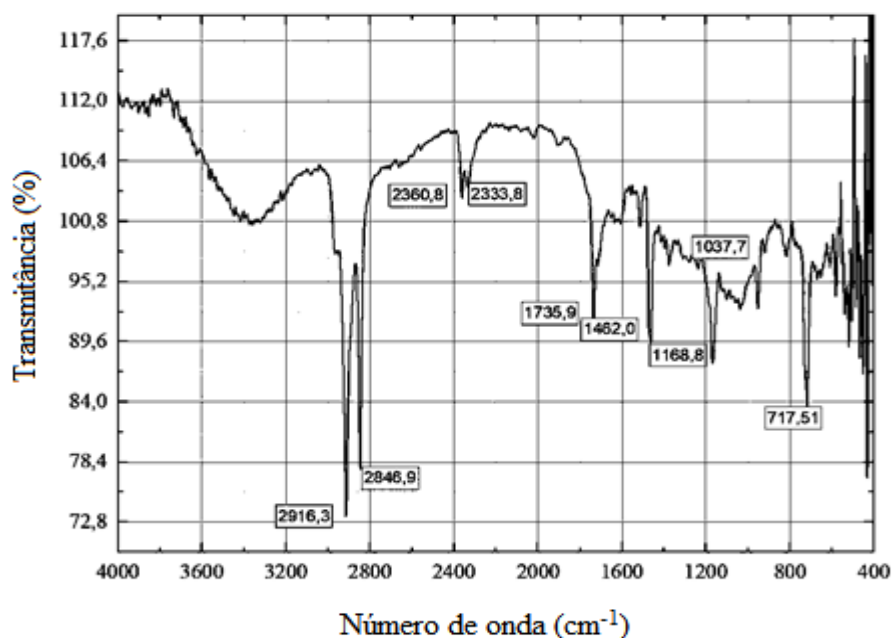
4.1.4 Técnica de espectroscopia

Através da Figura 50, a amostra de cera de carnaúba utilizada neste estudo foi analisada e comparada com as bandas já demonstradas por Derrick, Stulik e Landry (2000), e podem ser observadas resumidamente na Tabela 6.

Estiramentos foram observados em 1735 (C=O, carbonila), 1037,7 (C-O); em 2916,3 o estiramento está na forma assimétrica, grupo metila (CH₂); e em 2846,9 (CH₂, grupo metila) e 1168,8 (C-O-C) os estiramentos são simétricos. Para 1462, tem-se deformação angular

simétrica no plano tipo tesoura do grupo metila (CH_2) e para 717,51 a deformação é angular simétrica fora do plano com tipo balanço para o grupo metila (CH_2). Os números de onda encontrados e suas respectivas atribuições podem ser comparados aos estudos de Invernizzi et al. (2018) e Claire et al. (2007). Dados sobre os picos 2360,8 e 2333,8 não foram encontrados na literatura, talvez estes picos se justifiquem pelos resultados não terem sido tratados em softwares especializados e quanto aos picos após 717,51 são devidos aos ruídos de fundo ocasionados pelo instrumento de análise.

Figura 50 - Espectro no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) da cera de carnaúba obtido na região de 4000 a 400 cm^{-1}



Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 6 – Valores experimentais dos números de onda com seus valores correspondentes de atribuições das principais bandas obtidas por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR)

Cera de carnaúba (cm^{-1})	Atribuição
2916,3	Estiramento $\nu_{\text{as}}\text{CH}_2$
2846,9	Estiramento $\nu_{\text{s}}\text{CH}_2$
1735,9	Estiramento $\nu\text{C}=\text{O}$
1462,0	Deformação δCH_2
1168,8	Estiramento $\nu_{\text{s}}\text{C}-\text{O}-\text{C}$
1037,7	Estiramento $\nu\text{C}-\text{O}$
717,51	Deformação δCH_2

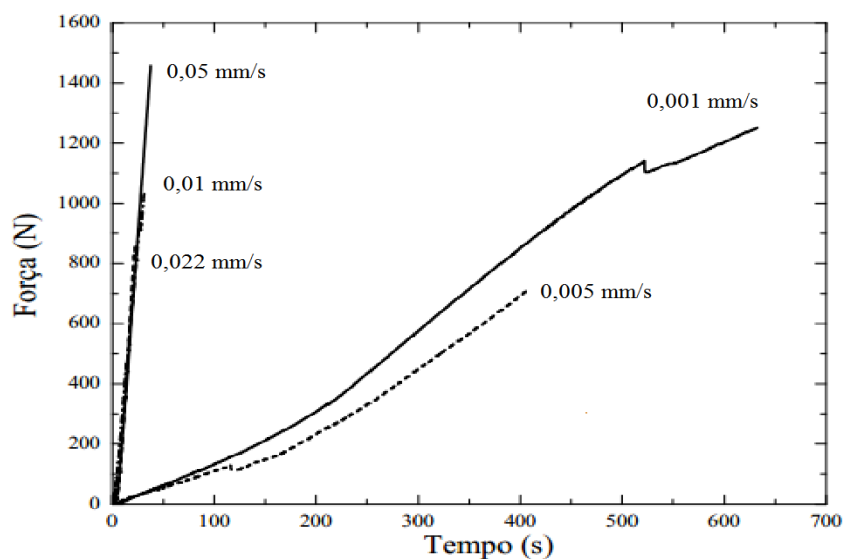
Fonte: Autoria própria (2019)

4.2 Análises mecânicas

4.2.1 Ensaio de tração por compressão diametral

Através dos dados obtidos pela máquina de ensaio, pôde-se adquirir as curvas de força-tempo para cada ensaio realizado em cinco amostras. Esta análise, a priori, possibilitou a obtenção do tempo necessário para determinar uma quantidade mínima de imagens, foram utilizados valores de velocidades diferentes (0,05 mm/s; 0,022 mm/s; 0,01 mm/s; 0,005 mm/s e 0,001 mm/s) para que pudesse encontrar a velocidade de ensaio ideal para se ter uma quantidade mínima de 80 fotos para cada corpo de prova, esta quantidade de fotos já dava para captar bem o comportamento do material. Da Figura 51, vemos que a menor velocidade (0,001 mm/s) possibilitaria em média 130 fotos, para a câmera fotográfica que disparava a cada 5 segundos. Esta velocidade foi a velocidade de ensaio trabalhada. Pode-se também aferir que, através destas curvas, a força máxima de fratura dos corpos de prova está em torno de 1000 N, a Tabela 7 mostra os valores máximos de carga suportada pelos corpos de prova desta análise de velocidade de ensaio e a média de valores entre eles. A variação dos resultados se dá devido aos fatores geométricos e principalmente à variação das velocidades de ensaio, que, como cita Lemos (2013), a velocidade de ensaio afeta o escoamento e o limite de resistência máxima, por isso, observa-se através da Figura 51, valores distintos de força quanto maior for a velocidade de deformação.

Figura 51 - Curvas com velocidades diferentes de ensaio para a obtenção da quantidade de imagens que seriam utilizadas no estudo da correlação de imagem digital



Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 7 - Valores de velocidade de ensaio e a força máxima relacionada entre eles

Velocidade de ensaio (mm/s)	0,05	0,022	0,01	0,005	0,001	Média
Força (N)	1457	871,64	1032,5	707,6	1251,2	1064

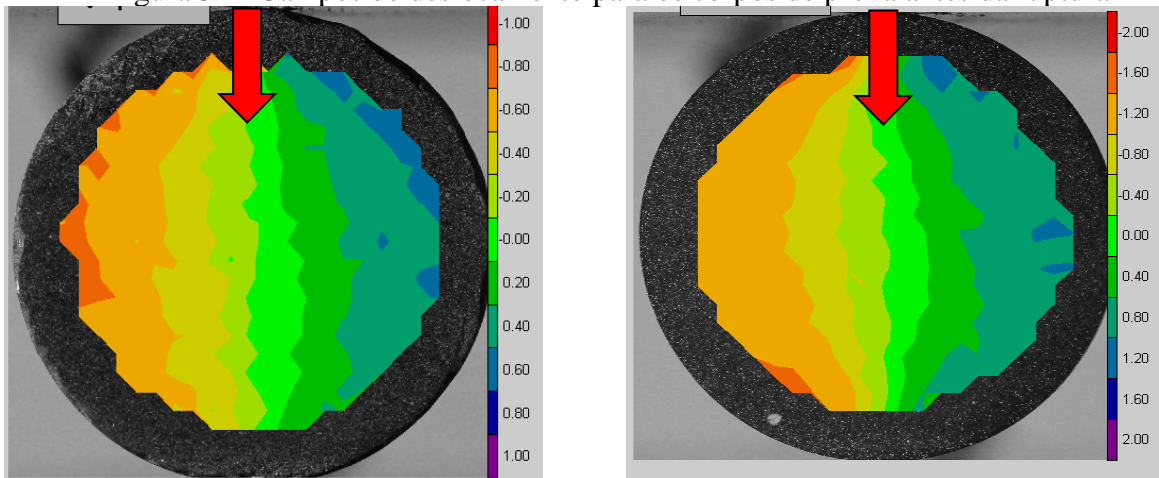
Fonte: Autoria própria (2019)

4.2.2 Análise através dos campos de deslocamento e de deformação

Através do programa Correli $Q4^{LMT}$, foi possível visualizar os campos de deslocamento e deformação instantâneos de cada imagem capturada durante o ensaio. A

Figura 52 apresenta a imagem do campo de deslocamento e a Figura 53 apresenta a imagem do campo de deformação no instante antes da ruptura, respectivamente. As setas vermelhas mostram a direção do esforço de compressão, aplicada na vertical.

Figura 52 - Campos de deslocamento para os corpos de prova antes da ruptura

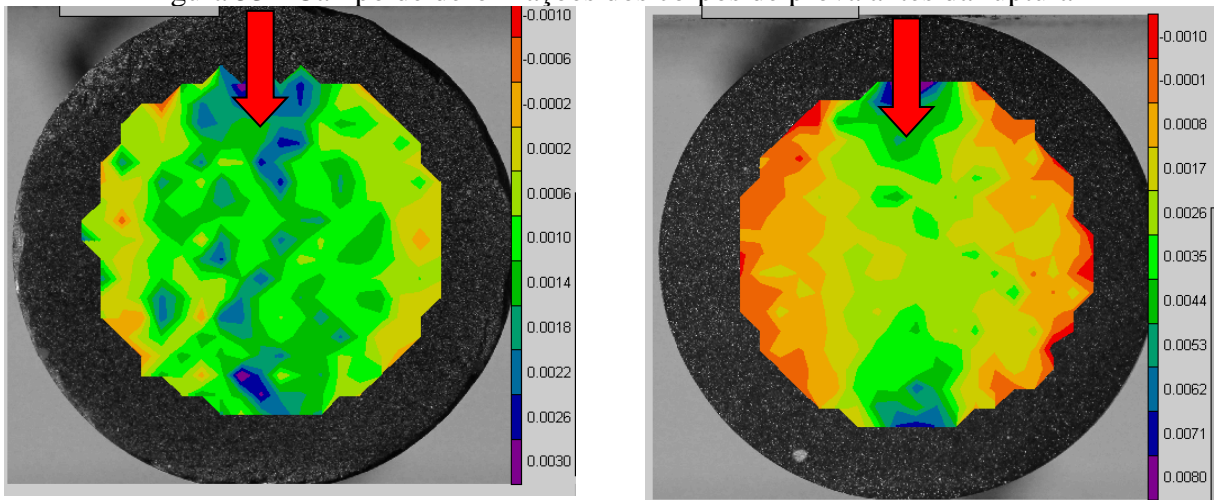


Fonte: Autoria própria (2019) (escala de deslocamento, 1 pixels = 0,023 mm)

Observando-se os deslocamentos ocorridos durante o ensaio, vê-se (

Figura 52) que a área escolhida de análise, através da escala de cores (unidades de deslocamentos em pixels), ao lado direito de cada imagem. A imagem de análise exibe coloração verde no centro de análise, que de acordo com a escala de cores apresenta deslocamento praticamente nulo, e quanto mais à direita ou mais à esquerda, observa-se um aumento ou diminuição de deslocamentos, o que é esperado, a qual seus menores valores encontram-se nas regiões mais afastadas da região central.

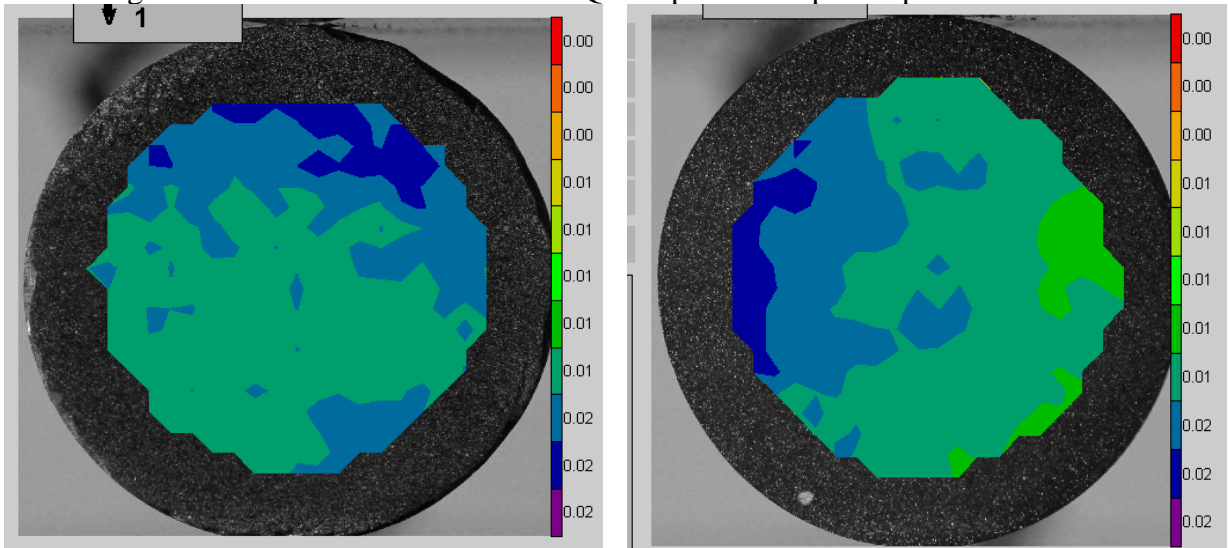
Figura 53 - Campo de deformações dos corpos de prova antes da ruptura



Fonte: Autoria própria (2019)

A Figura 53 apresenta as imagens das deformações ocorridas momento antes da ruptura, da mesma maneira que nos campos de deslocamentos, os valores de deformações em toda a extensão de análise são apresentadas em escalas de cores. Nelas são exibidas cores mais amarelo alaranjadas, com maiores valores de deformação, à esquerda de 0,003 no corpo de prova à esquerda, e 0,008 de deformação no corpo de prova do lado direito, na região central das regiões de análise, isso ocorre principalmente na parte dos corpos de prova onde encontra-se os maiores valores de tensão, ou seja, o rompimento ocorre na parte central. Nesse caso, as deformações não apresentam unidade de medida, ou de maneira didática, apresentam as unidades mm/mm.

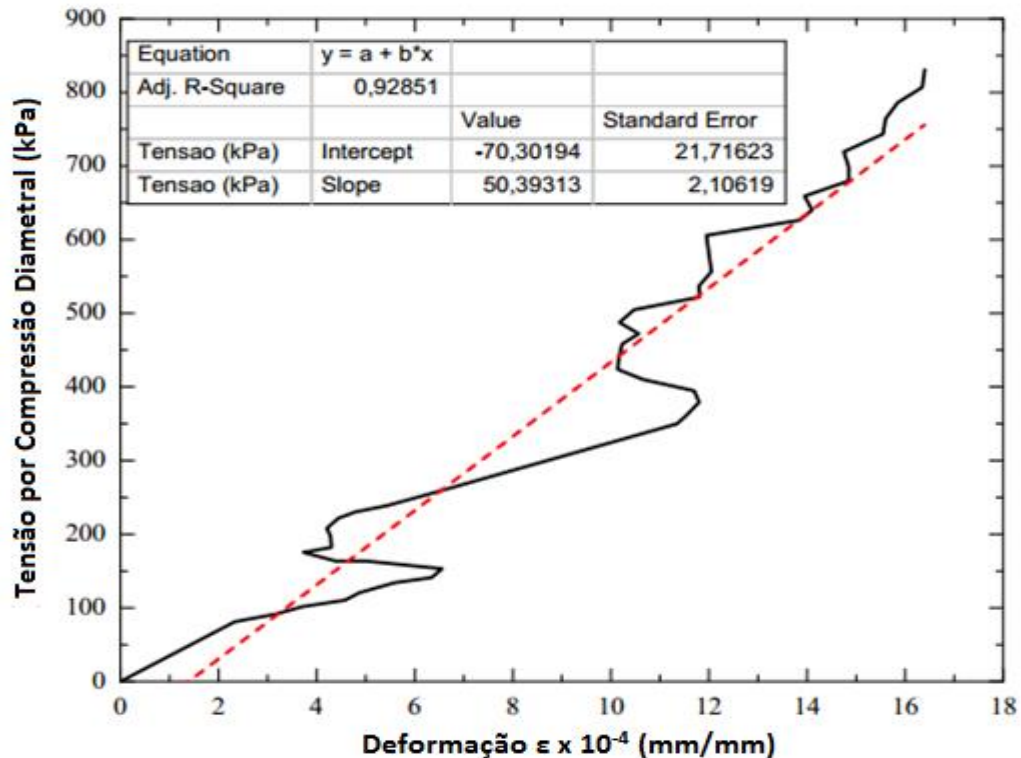
A Figura 54 evidencia as regiões que possuem maior ou menor valores de erro, essa imagem é importante para saber escolher as regiões que serão colocados os *gauges* virtuais. Os corpos de prova, apesar disso, não têm valores muito afetados, uma vez que o valor máximo de erro para ambas as amostras é de 2%, como observado na escala de cores. Era esperado que o erro fosse maior em locais com maiores deformações, principalmente onde ocorreria a trinca (centro da amostra).

Figura 54 - Escala de erro do Correli Q4^{LMT} para os corpos de prova analisados

Fonte: Autoria própria (2019)

Após estas observações, foi gerado o resultado da tensão x deformação que ocorreu durante o ensaio para os corpos de prova. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o resultado final para uma amostra, já que o comportamento dos resultados se deram praticamente iguais. Pode-se observar que seu valor máximo de tensão por compressão indireta é de 830,92 kPa com deformação na direção x-x de 0,00164. Este valor de tensão indireta é geralmente maior que o resultado de tensão direta.

Figura 55 - Gráfico Tensão x Deformação para a cera de carnaúba obtida através da correlação digital de imagens



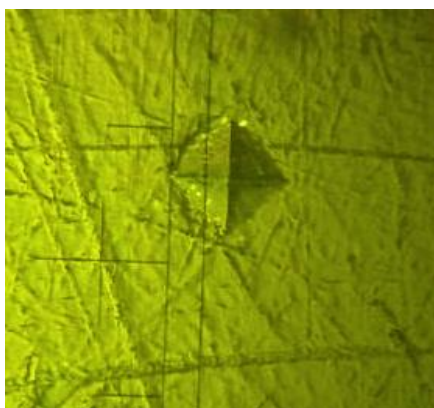
Fonte: Autoria própria (2019)

4.2.2 Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers tem como base a resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , o qual é forçado sob a superfície da amostra e sua impressão resultante é observada em um microscópio, como mostra a Figura 56. A análise é feita a partir dos valores das diagonais da pirâmide e da força aplicada, para que posteriormente possa ser obtido a medida convertida em um número de dureza (CALLISTER, 2008). Analisou-se, assim, cinco amostras da cera de carnaúba sob as mesmas condições de produção, em cada uma foram realizadas 7 indentações com a carga de 10 gf, equivalente a 0,098 N, aplicada durante 15 segundos e, através de análises estatísticas, obteve-se a média dos valores para cada amostra, seu desvio padrão e o coeficiente de variação, como mostrado na Tabela 8, observa-se que, mesmo que as amostras tenham sido produzidas de forma análoga, houve algumas diferenças, devido a possíveis heterogeneidades no material, isso se dá principalmente porque utilizou-se de valores de cargas muito reduzidas. Observa-se, pois, um grau de microdureza bastante pequeno, em torno de $5,51 \pm 0,52$ HV, valor obtido fazendo a média entre as médias de cada amostra. Ao

ser comparado com aço 1060 que, de acordo com (Rodrigues et al., 2017), possui dureza de 240 HV, e ao poliestireno virgem, de acordo com Alves Jr et al. (2014) com 20,59 HV, seu valor é muito pequeno.

Figura 56 - Micrografia revelando uma indentação do teste de dureza Vickers na cera de carnaúba.



Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 8 - Resultados obtidos na análise de microdureza da cera de carnaúba.

Indentações	Amostras				
	1	2	3	4	5
1	3,56	4,34	5,52	6,46	6,49
2	4,78	3,94	5,57	6,73	7,18
3	5,18	5,19	3,78	7,53	6,87
4	5,18	3,25	5,35	6,16	6,87
5	4,79	4,47	4,89	7,74	6,87
6	4,47	3,63	5,83	6,34	6,24
7	4,78	4,11	5,63	6,51	6,71
Média	4,68	4,13	5,22	6,78	6,75
Desvio Padrão	0,51	0,58	0,65	0,57	0,28
Coef. Variação (%)	11,81	15,12	13,43	9,01	4,52

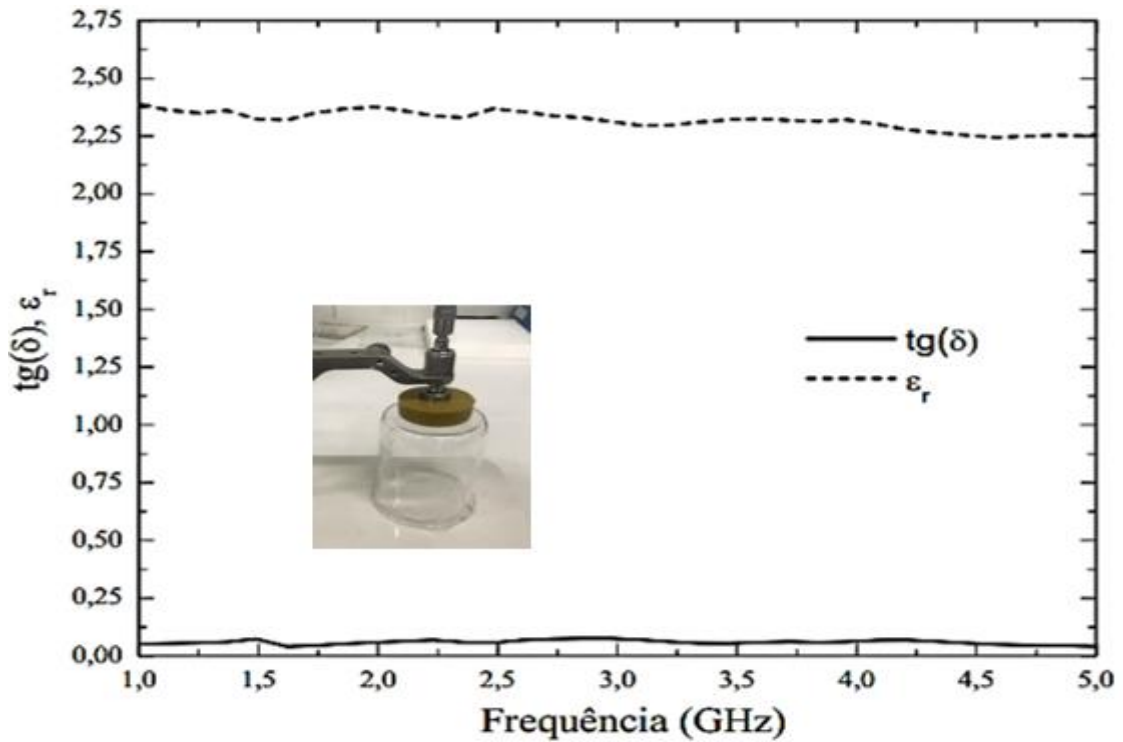
Fonte: Autoria própria (2018)

Os valores observados do coeficiente de variação oscilaram bastante isso foi devido à carga de teste, a qual seu valor era baixo, e às heterogeneidades encontradas nas amostras.

4.2 Análises elétricas

A partir da caracterização elétrica, obteve-se os resultados de constante dielétrica e tangente de perdas. A Figura 57, respectivamente, o comportamento destes.

Figura 57 - Constante dielétrica e tangente de perdas da cera de carnaúba



Fonte: Autoria própria

Nota-se que a cera de carnaúba possui valores de constante dielétrica bastante baixos, como observado nos estudos de Callinan e Parks (1959) e isto se deve à dependência que a constante dielétrica tem com a orientação dos dipolos ao ser aplicado um campo sobre o material. Entre a faixa de frequência vista na Figura 57 (de 1 a 5 GHz) observa-se que os valores de constante dielétrica estão entre a faixa de 2,25 a 2,50.

Observando a Figura 57, vemos que os valores de tangente de perdas estão muito próximos a zero, como é desejado. A Tabela 9 mostra os valores de constante dielétrica, fator de perdas e tangente de perdas para a cera de carnaúba na frequência de operação (2,45 GHz).

Tabela 9 - Características elétricas da cera de carnaúba na frequência de 2,45 GHz

Material	ϵ'	ϵ''	$\tan \delta$
Cera de carnaúba	2,20	0,17	0,07

Fonte: Autoria própria (2018)

4.3 Análises do projeto e simulações

A Tabela 10 apresenta os valores das dimensões das antenas circular e retangular. Estes dados foram calculados a partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores, é importante salientar que as antenas trabalhadas só ressoaram na frequência de operação desejada (2,45 GHz) ao fazer uso da técnica de casamento de impedância, *inset feed*, melhorando o parâmetro de perda de retorno.

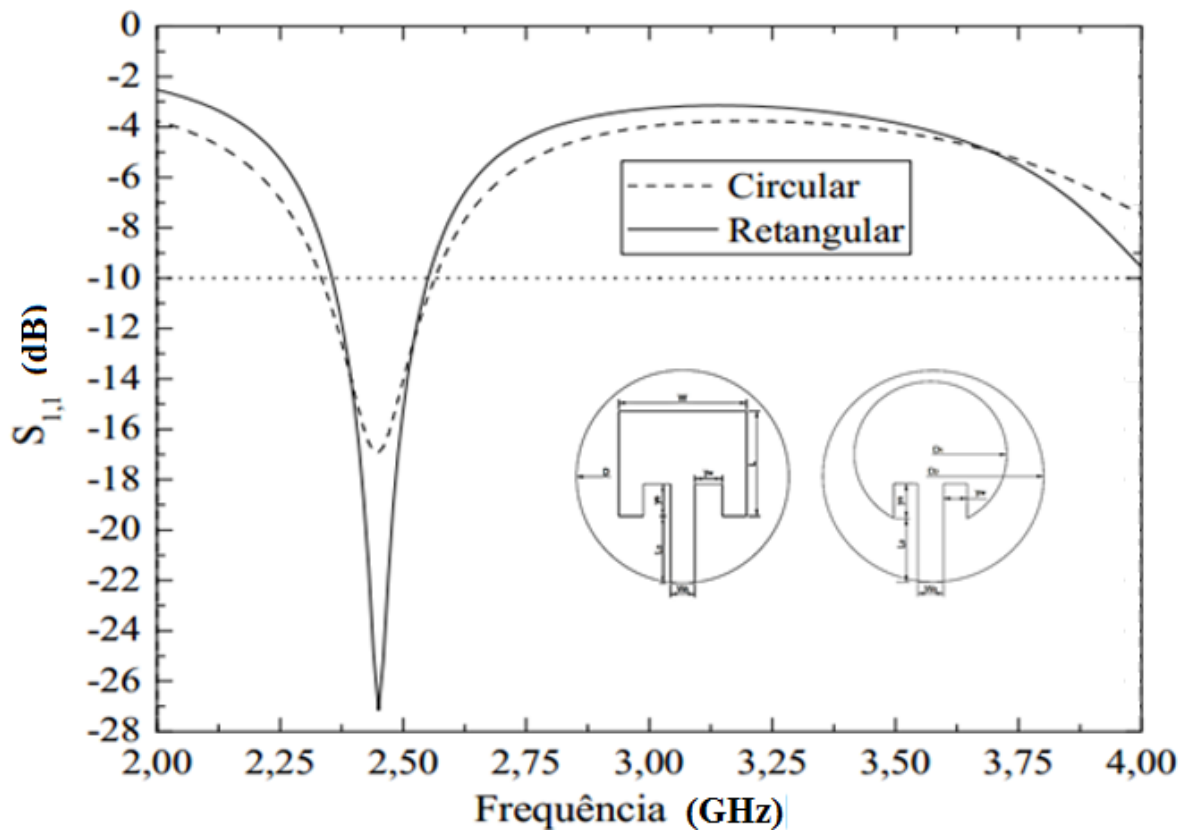
Tabela 10 - Dimensões das antenas projetadas

Antena	Patch		Linha de transmissão		Substrato		Inset Feed		
	W (mm)	L (mm)	W _o (mm)	L _o (mm)	D (mm)	h (mm)	y _o (mm)	y _w (mm)	
Retangular	48,400	40,800	9,244	25,210	80,15	3,000	12,088	0,378	
	D ₁ (mm)		W _o (mm)	L _o + y _o (mm)	D ₂ (mm)	h (mm)	-	y _w (mm)	
Circular	50,000		9,244	37,298	80,15	80,15	3,000	-	0,500

Fonte: Autoria própria (2018)

A constante dielétrica e o valor de tangente de perdas foram utilizados para o cálculo das dimensões das antenas, após o desenho das antenas no *HFSS*[®], realizaram-se as simulações e obtiveram-se os resultados de coeficiente de reflexão para elas, como observado na Figura 58.

Figura 58 - Coeficientes de reflexão simulados para as antenas com *patches* circular e retangular com substrato de cera de carnaúba



Fonte: Autoria própria (2018)

Por meio da análise da Figura 58, as duas antenas ressoaram na frequência desejada, como observado. De acordo com os resultados simulados, a largura de banda (BW) para a antena com *patch* circular foi maior que a retangular, porém, o coeficiente de reflexão para esta antena foi de -16,9395 dB, já para a antena de microfita retangular o coeficiente de reflexão obteve um melhor resultado com valor de -27,1530 dB, esta última, devido aos resultados obtidos, foi utilizada para a sua construção. Para avaliar a diretividade e ganho das antenas, os diagramas de radiação 2D e 3D para a frequência de ressonância de cada dispositivo estarão mostrados na Figura 59. A Tabela 11 mostra os valores referentes a largura de banda para ambas as antenas na frequência de operação de 2,45 GHz.

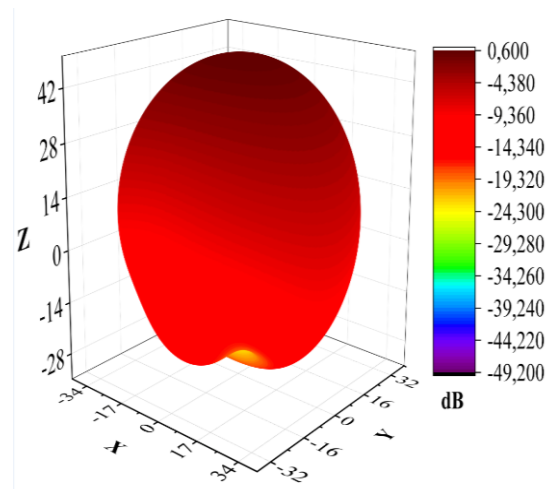
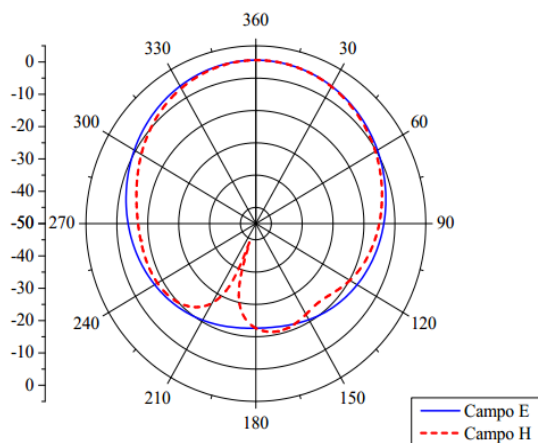
Tabela 11 - Valores da largura de banda para as antenas simuladas

Antena	BW	
	(MHz)	(%)
Patch circular	229,9650	9,3863
Patch retangular	195,6321	7,9849

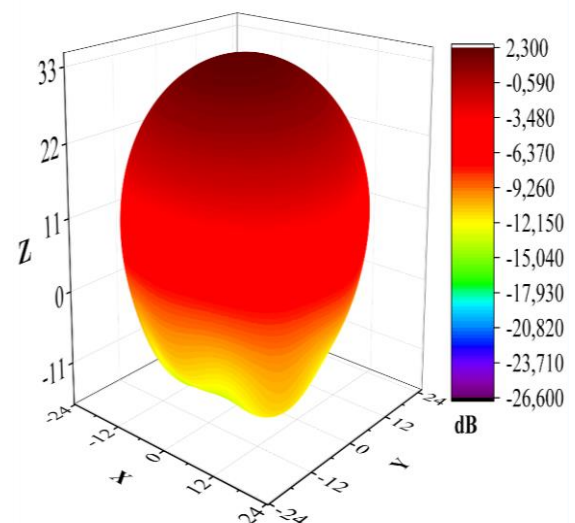
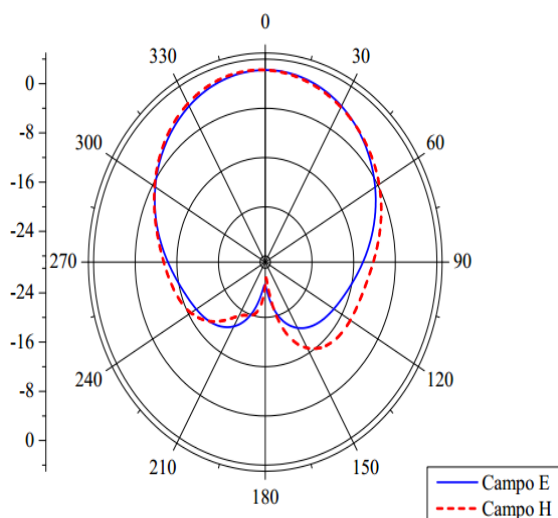
Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 59 - Diagramas de radiação 2D e 3D das antenas simuladas na frequência de 2,45 GHz

(a) Circular



(b) Retangular



Fonte: Autoria própria (2018)

Dos diagramas pode-se notar que não houve variações significativas para as simulações, a qual suas características são do tipo *broadside*, que de acordo com Holanda (2016) ocorre porque as dimensões do plano de terra e do substrato da antena são iguais. O ganho é baixo para a antena com *patch* circular (0,6 dB), para o *patch* retangular tem-se 2,30 dB. Através dos diagramas 2D e 3D observa-se que a antena retangular não possui praticamente lóbulos secundários, tendo sua energia irradiada na direção *broadside* melhor que a circular.

4.4 Análise das antenas com substrato de cera de carnaúba

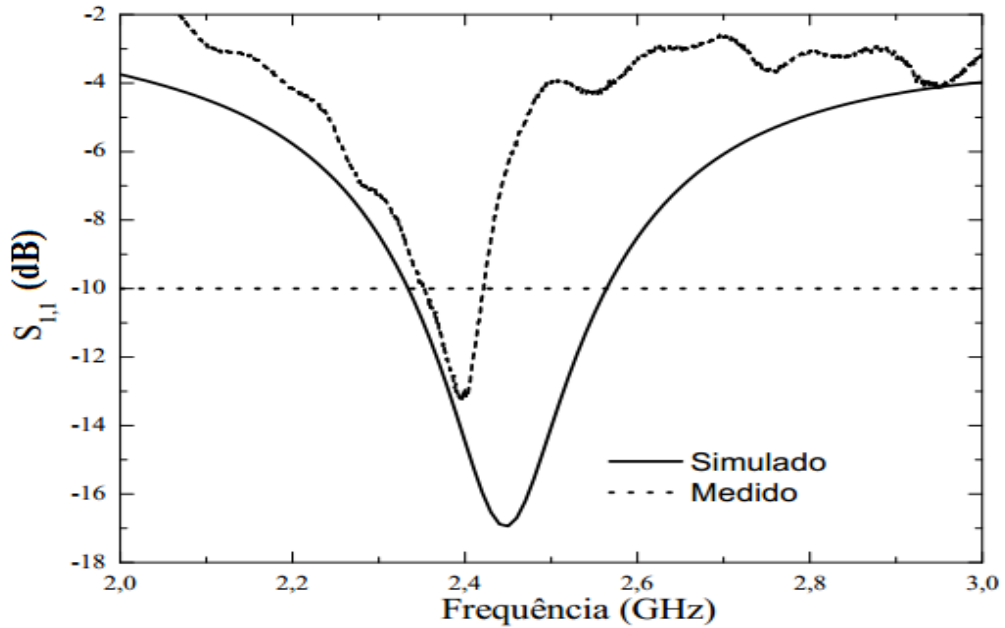
A partir dos dados obtidos nas análises para ambas as antenas, elas foram confeccionadas da forma como observadas na Figura 45. Os diagramas de coeficiente de reflexão e a carta de Smith estão em evidência nos próximos subtópicos.

4.4.1 Antena circular

A antena circular fabricada ressoou na frequência 2,4 GHz, com valor de perda de retorno -13,06 dB. Pode-se observar que comparado ao simulado o resultado não foi como o esperado,

Figura 60.

Figura 60 - Coeficientes de reflexão medido e simulado para antena com substrato de cera de carnaúba com patch circular

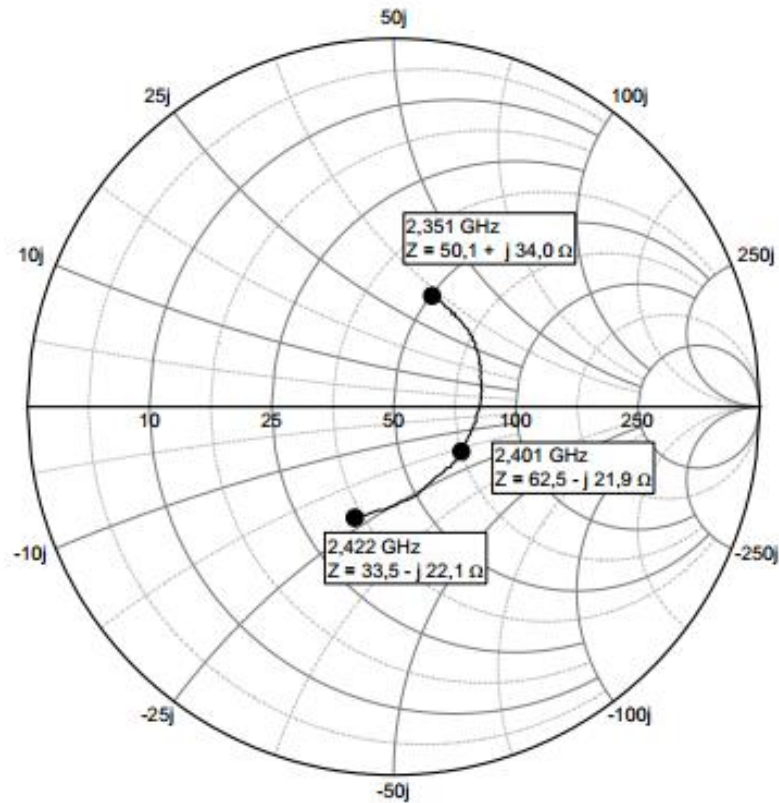


Fonte: Autoria própria (2019)

Com base na carta de Smith, a qual demonstra os três valores de frequência, para a antena com *patch* circular é possível observar que a antena possui valores diferentes de impedância. A qual seu valor é de $62,5-j21,9 \Omega$ (2,401 GHz) para a impedância de entrada, e isto implica em um fator de reflexão muito baixo, e para isso a potência de entrada refletida também será baixa, o que proporcionou um coeficiente de reflexão baixo.

A carta de Smith é um dos parâmetros importantes para validar a construção do dispositivo, e diante do seu resultado para este caso particular, algumas inconsistências apresentadas podem ter ocorrido devido ao conector não ter uma performance adequada, assim como a forma artesanal a qual a antena foi feita pode ter possibilitado tais resultados.

Figura 61 - Carta de Smith medida para a antena com *patch* circular



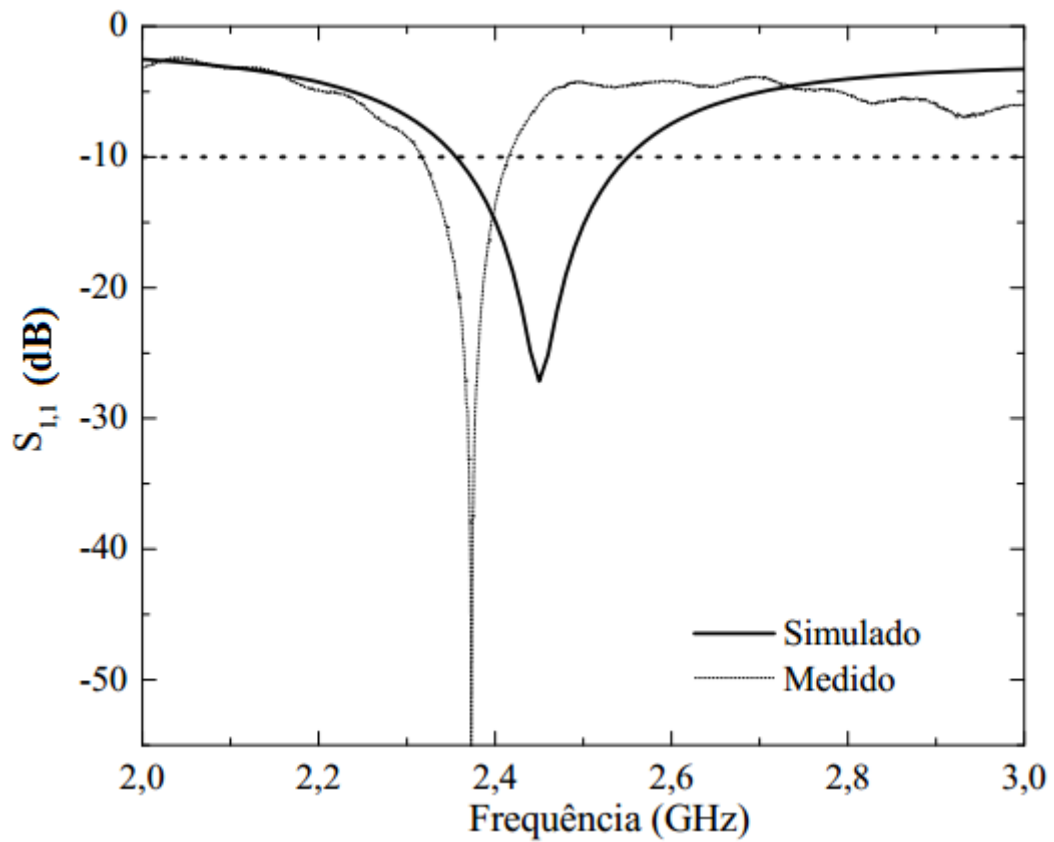
Fonte: Autoria própria (2019)

O substrato, que dá a característica como um todo, juntamente com a parte de cobre apresentou impurezas, fazendo com que o resultado não tenha sido de 50 Ohms, observa-se também que a parte imaginária não é ideal, uma vez que se deseja que ela tenha valor zero.

4.4.2 Antena retangular

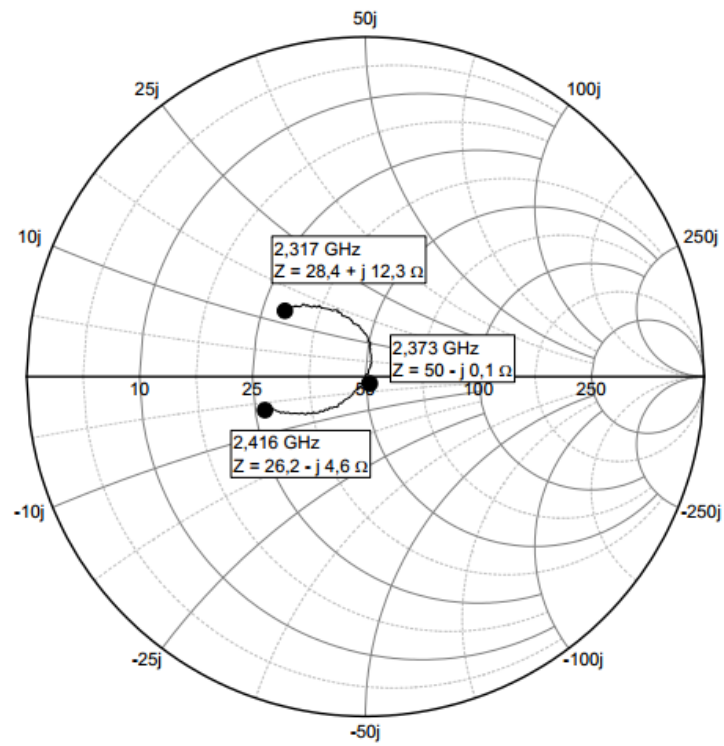
Pode-se observar através da Figura 62, o resultado medido e simulado do coeficiente de reflexão, a qual sua frequência de ressonância da antena construída (2,37 GHz com menor perda de retorno de -57,56 dB) está à esquerda da frequência de ressonância simulada, talvez por defeitos dos elementos construtivos, embora a antena tenha se comportado dentro do previamente estabelecido, pois ressoou com -10 dB e possui BW considerado estreito.

Figura 62 - Coeficientes de reflexão medido e simulado para antena com substrato de cera de carnaúba com patch retangular



Fonte: Autoria própria (2019)

A carta de Smith mostra que a antena construída tem bom casamento de impedância, já que a sua frequência de corte é de 50 Ohms.

Figura 63 - Carta de Smith medida para a antena com *patch* retangular

Fonte: Aatoria própria (2019)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na etapa de caracterização elétrica da cera de carnaúba foi possível a obtenção dos parâmetros que serviram como base para desenvolver a fase de projeto e de simulação das antenas, o que possibilitou a construção de duas antenas com substrato deste material para posteriormente observar os resultados com os da simulação.

Através do método da sonda coaxial, conseguiu-se encontrar valores de permissividade que divergiram um pouco de valores encontrados em outras literaturas. Talvez a forma como tenha sido calibrado o equipamento ou comprimido o material não tenha sido adequado para terem-se valores mais condizentes no que tange os valores de permissividade real. Pois, pôde-se observar que as antenas construídas não ressoaram nas mesmas frequências da na simulação.

As caracterizações físicas e estruturais foram condizentes com outras teorias. Esta etapa do trabalho foi importante para observar melhor o comportamento destes parâmetros, uma vez que a presença de impurezas pode alterar os valores de permissividade elétrica e tangente de perdas do substrato.

Mesmo que na simulação a antena com *patch* retangular tenha conseguido melhores parâmetros de projeto em relação ao com *patch* circular, optou-se por construir ambas para que pudesse analisa-las e compreender melhor o funcionamento de antenas no intervalo de frequência micro-ondas. Os métodos utilizados, o de cavidade e a linha de transmissão, juntamente com a utilização de *inset feed* para o melhoramento da impedância de entrada da antena, mostraram-se eficazes para a obtenção desse dimensionamento.

A confecção do substrato foi realizada de forma artesanal, a qual foi limitada pelo formato cilíndrico do béquer utilizado para o aquecimento da amostra. E devido à fragilidade deste material, teve que ter cuidado para a obtenção da espessura dada no projeto, e isto pode ter implicado nos resultados finais variantes.

Na caracterização mecânica, a utilização do programa Correli $Q4^{LMT}$ foi importante para a observação de como ocorre a deformação da amostra através do diagrama de tensão-deformação. Mas seria interessante que os ensaios fossem realizados para uma quantidade maior de amostras. O ensaio de microdureza Vickers mostrou que este material é um material pouco resistente.

Assim, conclui-se que é possível construir uma antena de microfita com substrato de cera de carnaúba que ressoe na frequência micro-ondas, mas devido ao valor de permissividade baixo seria interessante dopá-lo com outros materiais que possibilitassem a

redução de sua fragilidade, e aumentasse o seu valor de permissividade, uma vez que o que se deseja quando trabalha com antenas de microfita é que suas dimensões sejam reduzidas.

Para trabalhos futuros, fazer a análise da dissolução da cera de carnaúba em éter e álcool fervente, para transformar a cera de carnaúba em uma massa cristalina com ponto de fusão de 195 °C; aplicar a cera de carnaúba como superstrato de antenas FR-4 e observar o seu comportamento (utilização como sobrecamada); e utilizar a cera de carnaúba como camada de proteção contra oxidação do metal que compõe a antena.

No ensaio de microdureza, aumentar os valores de carga para obter seu valor quando imposta esses valores.

REFERÊNCIAS

- ALIGENT TECHNOLOGIES. **Agilent 85070E Dielectric Probe Kit 200 MHz to 50 GHz**. Technical Overview; Agilent Technologies: Santa Clara, CA, USA, 2008.
- ALVES JUNIOR, C. A. et al. Reaproveitamento do poliestireno expandido: comprovação da sustentabilidade do emprego de resíduos de EPS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21., 2014, Joinville. **Anais...** . Cuiabá: Cbecimat, 2014. p. 7967 - 7974.
- ALVES, M.O.; COELHO, J.D. Tecnologia e relações sociais de produção no extrativismo da carnaúba no nordeste brasileiro. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 44., 2006, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2006. 9p. 1 CD-ROM.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152: **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2002. 2 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TELECOMUNICAÇÕES (TELEBRASIL). **Painel Telebrasil**. (2018). Disponível em: <<https://issuu.com/convergenciadigital/docs/62paineltelebrasil2018>>. Acesso em 21 de ago. de 2018.
- BALANIS, C. A. **Teoria de antenas: análise e síntese**. Vol. 1. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- BATISTA, Amanda Rayssa Ferreira et al. Análise do perfil químico e físico da cera de carnaúba (*Copernicia* sp.) obtida por diferentes acessos. In: **Embrapa Agroindústria Tropical-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL, 8., 2010, Fortaleza. Resumos. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.
- BAUERMAN, S. G. et al. Diferenciação polínica de *Butia*, *Euterpe*, *Geonoma*, *Syagrus* e *Thrinax* e implicações paleoecológicas de Arecaceae para o Rio Grande do Sul. **Série Botânica**, Porto Alegre, v. 65, n.1, p.35-46, jun. 2010.
- BRAGA, R. **Plantas do Nordeste, especialmente do Ceará e Mossoró**. Escola Superior de Agricultura de Mossoró, 1976.
- CAETANO, L. M. **Materiais Supercondutores HTS para Arranjos de Antenas e Aplicação de PBG para Micro-ondas**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN. Natal, 2014.
- CALLISTER JR., William D. RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Título original: Material science and engineering: an introduction, 8. ed.

_____. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

_____. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA. A carnaubeira: preservação e sustentabilidade. Câmara Setorial da Carnaúba, Fortaleza: **Câmara Setorial da Carnaúba**, 2009, 40 p.

CALLINAN, Thomas D.; PARKS, Ann M. The dielectric constants and loss factors of some natural waxes. In: **Electrical Insulation, 1959 Conference On**. IEEE, 1959. p. 45-50.

CAPOVILLA, Carlos Eduardo et al. **Antenas planares aplicadas às Comunicações Móveis de últimas gerações utilizando elementos Quasi-Yagi**. 2004.

CARVALHO, J. B. M. **Ensaio sobre a carnaúba no Piauí**. 2a. ed. Natal: Empresa de Pesquisa e Agropecuária do Rio Grande do Norte- ENPARN, 1982. 369 p.

CARVALHO, J. N. F. **Pobreza e tecnologias sociais no extrativismo da carnaúba**. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2008.

CLAIRE, Menard et al. Characterisation and quantification of lubricants in a cross-linkable varnish by Fourier transform infrared absorption spectroscopy (FT-IR) and differential scanning calorimetry. **Polymers and Polymer Composites**, v. 15, n. 2, p. 83, 2007.

CORRERA, F. S. **Sistemas Ópticos e de Micro-ondas**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2752881/mod_resource/content/2/2%20-%20Introducao%20-%20PSI3481%20-%202017.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2017.

DERRICK, Michele R.; STULIK, Dusan; LANDRY, James M. **Infrared spectroscopy in conservation science**. Getty Publications, 2000.

DO NASCIMENTO, Edvânia Bezerra et al. A Cera de Carnaúba: Origem, Produção e Mercados.

FALCÃO, Marcius Flaure B.; SOARES, Jorge Barbosa. **Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação**. 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267254059_CONSIDERACOES_SOBRE_O_ENSAIO_DE_COMPRESSAO_DIAMETRAL_NO_ESTUDO_DE_MATERIAIS_DE_PAVIMENTACAO/download>. Acesso em: 28 de Jan. de 2019.

FATIMAH, Baharin. **Comparison of Performances of Various Type of Materials on Rectangular Stacked Patch Antenna with CPW-FED Triple Triangle Slot**. 2015.

FERREIRA, Clemilton da Silva. **COMPORTAMENTO DE POPULAÇÕES DE CARNAUBEIRA EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO NO MUNICÍPIO DE UNIÃO-PIAUI**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Piauí.

FILHO, V. A. A. **Arranjo de Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2010.

FPV PORTUGAL. **Antenas**. Portugal: 2015. Disponível em: <<http://fpvportugal.com/forum/viewtopic.php?t=1803>>. Acesso em: 09 fev. 2018.

FRANÇA, Jean Marcel Bezerra. **Extensometria: Um estudo sobre as principais técnicas**. 2011. 103f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural Do Semi-Árido, Mossoró, 2011.

FREITAS, Claisa Andréa Silva et al. Carnauba wax p-methoxycinnamic diesters: Characterisation, antioxidant activity and simulated gastrointestinal digestion followed by in vitro bioaccessibility. **Food chemistry**, v. 196, p. 1293-1300, 2016.

GHAVAMI, M. et al. **Ultra wideband: signals and systems in communication engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons. p. 278. 2004.

HIBBELER, Russel C. **Resistência dos Materiais**. Tradução de Arlete Simille Marques. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Título original: Mechanics of Materials.

HOLANDA, Samanta Mesquita de. **Estudo e desenvolvimento de antenas de microfita utilizando tecido de malha a base de fibras têxteis compostas**. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Sistema de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. História. 2018a. Disponível em: <<http://www.cbers.inpe.br/sobre/historia.php>>. Acesso em: Abril, 2018.

_____. **Sistema de Coleta de Dados**. 2018b. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/sobre/coleta_dados.php>. Acesso em: Abril, 2018.

INVERNIZZI, Claudia et al. Mid and Near-Infrared Reflection Spectral Database of Natural Organic Materials in the Cultural Heritage Field. **International journal of analytical chemistry**, v. 2018, 2018.

LANDAU, Lev Davidovich; LIFSHITZ, E. M. **Course of Theoretical Physics. Vol. 8: Electrodynamics of Continuous Media**. Oxford, 1960.

LI, S.; PARISH, E. The chemistry of waxes and sterols. In: AKOH, C.; MIN, D.B. (Eds.) **Food Lipids: Chemistry, Nutrition, and Biotechnology**. New York: Marcel Dekker, Inc., Parte I, Cap. 4, p. 89-114, 1997.

LEMOES, Guilherme Vieira Braga et al. O efeito da velocidade de deformação no ensaio de tração em um aço SAE 4340. In: **Congresso Anual da ABM (68.: 2013 jul. 30-ago. 2: Belo Horizonte, MG)**. Anais [recurso eletrônico]. [São Paulo, SP: ABM, 2013]. 2013.

LUNA, Daniel R. et al. Microstrip patch antennas with metamaterial inspired substrates and superstrates. In: **Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International**. IEEE, 2013. p. 1-4.

MAGNO, José de Arimateia P. M. **Análise da aplicação de estruturas metassuperfície em antenas de microfita.** 2016. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Sistema de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

MEHTA, Anuj. Microstrip Antenna. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 4, n. 3, p. 54-57, 2015.

MIRANDA, Marcela. **Revestimento nanoestruturado de cera de carnaúba na manutenção da qualidade pós-colheita de tomates.** 2015.

MORAIS, José Haroldo Cavalcante de. **Evoluções nas modelagens de substratos artificiais (metamateriais) com práticas experimentais em antenas de microfita.** 2015.

POZAR, David .M. **Microwave Engineering.** 2 ed. United States of America: John Wiley & Sons. 1998.

RADIO REFERENCE. **Radiation pattern for a dual band microstrip patch antenna.** 2010. Disponível em: <<https://forums.radioreference.com/scanner-receiver-antennas/211972-radiation-pattern-dual-band-microstrip-patch-antenna.html>>. Acesso em: 09 fev. 2018.

RODRIGUES, Luciano Monteiro et al. Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. **Cadernos UniFOA**, v. 9, n. 2 (Esp.), p. 39-44, 2017.

SANTIAGO, Fernando da Silva. Carnaúba. **Agroanalysis.** Rio de Janeiro, nov. 1985. Disponível em: <bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/agroanalysis/article/download/56069/54702>. Acesso em: 15 nov. 2017.

SENA, Larissa Veras Torquato. **Análise do comportamento mecânico do concreto submetido ao ensaio de compressão diametral: Análise experimental com o uso da técnica da correlação de imagens.** 2013. 76f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural Do Semiárido, Mossoró, 2013.

SHACKELFORD, James F. **Ciências dos Materiais.** Tradução de Daniel Vieira. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Título original: Introduction to materials science for engineers.

SILVA, Jefferson Costa e. Análise experimental do efeito de diversas configurações de “inset feed” na alimentação de antenas planares dos tipos retangular, circular e triangular. **Revista Principia**, v. 1, n. 24, p. 49-56, 2015.

SOBRINHO, F. R. **Análise do comportamento mecânico do concreto com brita calcária e aditivo através do ensaio de compressão diametral utilizando a correlação digital de imagens.** 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2015.

SOUSA, Rodrigo Ferreira de et al. ETHNOECOLOGY AND ETHNOBOTANY OF THE PALM CARNAUBA WAX IN BRAZILIAN SEMI-ARID. *Cerne*, v. 21, n. 4, p. 587-594, 2015.

SOUZA, D. **Uso do Pentóxido de Nióbio para Aplicação como Substrato de Antenas de Microfita**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Programa de Pós Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Mossoró, 2015.

SOUZA, Jorge Angelo Mitrione. **Efeitos do Uso de Substrato de Alta Permissividade Dielétrica em Diversos Tipos de Antenas de Micro-ondas**. 2014. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado apresentada em 15/09/2014, na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brazil.

THOMAZ, Eduardo C. S.. **Ensaio de compressão diametral**: Prof. Fernando Lobo Carneiro. 20 p. Notas de Aula. Rio sem fronteira. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/documentos/LOBO_CARNEIRO.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2019.

ULLAH M. H., ISLAM M. T. et al. **Band Slotted Patch Antenna on Dielectric Material Substrate**, International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2014, Article ID 258682, 2014.

VILLALOBOS-HERNANDEZ, J. R.; MÜLLER-GOYMANN, C. C. Sun protection enhancement of titanium dioxide crystals by the use of carnauba wax nanoparticles: the synergistic interaction between organic and inorganic sunscreens at nanoscale. **International journal of pharmaceutics**, v. 322, n. 1-2, p. 161-170, 2006.

WENTWORTH, S. M. **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em Engenharia**, LTC, 2006.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III: eletromagnetismo**. Tradução de Sonia Midori Yamamoto. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009. Título original: Sear and Zemansky's University physics.