



Cristiano Miranda Correia Lima

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS PELO MÉTODO
PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE RESSONANTE**

**João Pessoa-PB
março de 2020**



Cristiano Miranda Correia Lima

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS PELO MÉTODO PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE RESSONANTE

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

Área de concentração: Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.

João Pessoa-PB, março de 2020
Cristiano Miranda Correia Lima-cristcorreia@gmail.com

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

L732c	<p>Lima, Cristiano Miranda Correia. Caracterização de solos pelo método perturbação da cavidade ressonante / Cristiano Miranda Correia Lima. – 2020. 59 f. : il.</p> <p>Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2020. Orientador : Prof^o. D.r Joabson Nogueira de Carvalho.</p> <p>1. Engenharia elétrica - constante dielética. 2. Tangente de perdas. 3. Solos. 4. Polarização e permissividade elétrica. 5. Perturbação da cavidade ressonante. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.3(043)</p>
-------	---

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária
CRB 15/132

Cristiano Miranda Correia Lima

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS PELO MÉTODO PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE RESSONANTE

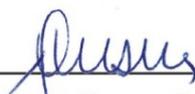
Dissertação de Mestrado submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida em *26/05/2020*

BANCA EXAMINADORA



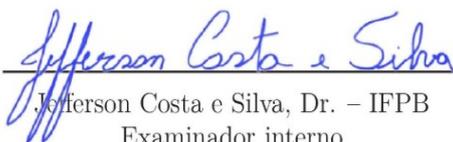
Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. – IFPB
Orientador



Prof. Alexandre Fonseca D Andrea, Dr.
Examinador externo



Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Examinador interno



Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Examinador interno

Dedicatória

Aos meus pais, Genivaldo Correia Lima (in memoriam) e Maria do Socorro Miranda Correia Lima pelos ensinamentos e sacrifícios feitos por mim.

Agradecimentos

Agradeço a Deus que me guia e me fortalece todos os dias.

A minha esposa Ivaneide Alves de Lima as minhas filhas Thaís Alves Correia Lima e Camila Alves Correia Lima pela paciência, incentivo e apoio.

Agradeço a todos meus irmãos que torcem por mim e me deram força e confiança.

A André Luiz e Danúbio Leonardo pelo coleguismo e vibrações positivas.

Aos meus colegas de Mestrado pelo companheirismo e ajuda mútua.

Em especial ao Professor Joabson Nogueira de Carvalho por toda orientação, paciência, atenção, ensinamentos e confiança.

Ao Professor Laurivan Diniz pela ajuda na usinagem do dispositivo deste trabalho.

Ao Prof. Alexandre D'Andrea e Ricardo Balbino (servidor da Flona de Cabedelo) pelo apoio na coleta dos solos e pelos ensinamentos sobre a Flona de Cabedelo.

E a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta a metodologia da perturbação da cavidade ressonante para determinação da permissividade complexa relativa de solos, na faixa de frequência de micro-ondas. Uma cavidade ressonante retangular, operando no modo TE_{101} , na frequência de 2,72GHz, foi construída para realizar as medições. A calibração da cavidade foi realizada com 10 amostras com valores de permissividade elétricas conhecidas. Os valores das permissividades foram medidos com um medidor sonda coaxial e software comercial 85070, fabricado pela Agilent. Os solos estudados RQo, GZn e GJo foram coletados na Floresta Nacional Restinga de Cabedelo, localizada no Estado da Paraíba, em camadas diferentes, até uma profundidade de 100 cm. As propriedades físico-químicas dos diferentes tipos de solos analisados foram relacionadas com os resultados da constante dielétrica e tangente de perdas obtidos neste estudo. Os resultados mostram que a variação da constante dielétrica não é relevante com a profundidade e indicam haver uma relação entre a tangente de perdas e a quantidade de carbono estocado no solo.

Palavras-chave: constante dielétrica, tangente de perdas, solos, perturbação da cavidade ressonante.

Abstract

This work presents the methodology of resonant cavity perturbation to determine the relative complex permittivity of soils, in the microwave frequency range. A rectangular resonant cavity, operating in TE_{101} mode, at a frequency of 2.72GHz, was built to perform the measurements. The calibration of the cavity was performed with 10 samples with known electrical permittivity values. Permittivity values were measured with a coaxial probe meter and commercial software 85070, manufactured by Agilent. The studied soils RQo, GZn and GJo were collected in the Restinga de Cabedelo National Forest, located in the State of Paraíba, in different layers, up to a depth of 100 cm. The physical-chemical properties of the different types of soils analyzed were related to the results of the dielectric constant and loss tangent obtained in this study. The results show that the variation of the dielectric constant is not relevant with the depth and indicate that there is a relationship between the tangent of losses and the amount of carbon stored in the soil.

Keywords: dielectric constant, loss tangent, soils, resonant cavity perturbation.

Lista de Figuras

2.1	Momento dipolar (P) - a) As moléculas têm orientação aleatória na ausência de um campo elétrico. b) As moléculas se alinham parcialmente quando se aplica um campo elétrico externo.	17
2.2	Diagrama do vetor tangente de perdas.	17
2.3	Efeitos dos diferentes mecanismos de polarização em função da frequência.	18
2.4	Rede de duas portas com as ondas incidente (a1 e a2) e refletidas (b1 e b2).	19
2.5	Método da ponta de prova coaxial.	21
2.6	Método da linha de transmissão.	22
2.7	Método espaço livre.	23
2.8	Método puramente ressonante – Placas paralelas.	24
2.9	Método da pertubação ressonante.	25
2.10	Medição do do fator de qualidade por meio do Parâmetro S_{11}	27
2.11	Cavidade Retangular. (a) Cavidade vazia. (b)Cavidade com amostra inserida em seu interior.	28
2.12	Ilustração dos horizonte do solo.	31
3.1	Localização da Flona de Cabedelo.	38
3.2	Distribuição dos solos da Flona de Cabedelo.	39
3.3	Minitrincheira para coleta das amostras do Gleissolo Sáfico.	40
3.4	Processo de peneiramento do solo.	41
3.5	Simulação da cavidade ressonante. (a) vazia; (b) com material em seu interior.	43
3.6	Cavidade ressonante desmontada.	43
3.7	Cavidade ressonante montada.	44
3.8	Microtubo Eppendorf $1,5\text{ cm}^3$	45
3.9	Esquema de montagem de equipamentos e materiais para medição.	46
3.10	Frequência de ressonância da cavidade vazia.	46
3.11	Frequência de ressonância e do fator Q de amostras de solos quando inseridas na cavidade.	47
4.1	Gráfico $\tan\delta \times$ carbono orgânico estocado no Neossolo Quartzarênico.	49
4.2	Comportamento de ϵ'_r dos solos RQo, GZn e GJo com a profundidade.	50
4.3	Comportamento da $\tan\delta$ dos solos RQo, GZn e GJo com a profundidade.	51
4.4	Comportamento de ϵ'_r em relação ao diâmetro do grãos dos solos RQo, GZn e GJo.	52
4.5	Comportamento da $\tan\delta \times$ em relação ao diâmetro do grãos dos solos RQo, GZn e GJo.	53

Lista de Tabelas

2.1	Frações granulométricas Padrão SiBCS.	32
3.1	Propriedades encontradas dos Neossolos Quartzarênicos.	38
3.2	Propriedades encontradas dos Geissolos Sálícos.	39
3.3	Propriedades encontradas dos Geissolos Tiomórficos	40
3.4	Peneiras utilizadas na obtenção das frações granulométricas e classificação do solo pela SiBCS.	42
3.5	Dados das medições de amostras de solo.	47
4.1	Constante dielétrica e tangente de perdas do Neossolo Quartzarênico, em diferentes profundidades.	48
4.2	Constante dielétrica e tangente de perdas do Gleissolo Sálíco, em diferentes profundidades.	49
4.3	Constante dielétrica e tangente de perdas do Gleissolo Tiomórfico, em diferentes profundidades.	50
4.4	Constante dielétrica e tangente de perdas dos Neossolos Quartzarênico, em função frações granulométricas.	51
4.5	Constante dielétrica e tangente de perdas dos Gleissolos Sálíco, em função frações granulométricas.	52
4.6	Constante dielétrica e tangente de perdas do Gleissolos Tiomórfico, em função frações granulométricas.. . . .	53

Lista de Símbolos

GTMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismos Aplicado do Instituto Federal da Paraíba
HFSS	High Frequency Structure Simulator
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
AF	Areia Fina
AG	Areia Grossa
AM	Areia Média
AMF	Areia Muito Fina
AMG	Areia Muito Grossa
cm	Centímetro
E	Intensidade de campo elétrico em V/m
f	Frequência em Hz
GHz	Gigahertz
GJo	Gleissolo Tiomórfico
GZn	Gleissolo Sáfico
H	Intensidade de campo magnético em A/m
I	Corrente elétrica
j	Unidade imaginária de um número complexo
MHz	Megahertz
pH	Potencial Hidrogeniônico
Q	Fator de Qualidade da cavidade
Rqo	Neossolo Quartzarênico
S_{11}	Medida de reflexão dos Parâmetros S da porta 1 para a porta 1
S_{12}	Medida de transmissão dos Parâmetros S da porta 2 para a porta 1
S_{21}	Medida de transmissão dos Parâmetros S da porta 1 para a porta 2
S_{22}	Medida de reflexão dos Parâmetros S da porta 2 para a porta 2
$\tan \delta$	Tangente de perdas
TE	Transversal Elétrico
TM	Transversal Magnético
V	Tensão elétrica em V
Z	Impedância em Ω
ϵ	Permissividade elétrica complexa em F/m
ϵ'	Componente real da permissividade elétrica complexa
ϵ''	Componente imaginária da permissividade elétrica complexa
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa complexa
ϵ_r'	Componente real da permissividade elétrica complexa relativa

ϵ_r''	Componente imaginária da permissividade elétrica complexa relativa
μ	Permeabilidade magnética complexa em H/m
μ'	Componente real da permeabilidade magnética complexa
μ''	Componente imaginária da permeabilidade magnética complexa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo em H/m
μ_r	Permeabilidade magnética relativa complexa
μ_r'	Componente real da permeabilidade magnética relativa complexa
μ_r''	Componente imaginária da permeabilidade magnética relativa complexa
σ	Condutividade elétrica em S/m
ω	Coeficiente angular em rad/s

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Organização do Trabalho	14
1.4	Publicação	15
2	Fundamentação Teórica	16
2.1	Polarização e Permissividade Elétrica	16
2.2	VNA e Parâmetros S	19
2.3	Métodos de Medição de Propriedades Dielétricas	20
2.3.1	Métodos Não Ressonantes	21
2.3.2	Técnicas Ressonantes	23
2.4	Cavidade Ressonante	26
2.4.1	Frequência de Ressonância	26
2.4.2	Fator de Qualidade	26
2.4.3	Mensuração da Permissividade	27
2.5	Solo	30
2.5.1	Solos do Brasil	32
2.5.2	Serviços Ecológicos	34
2.5.3	O Carbono Orgânico e o Ambiente	35
3	Materiais e Métodos	37
3.1	Área de Estudo	37
3.2	Coleta das Amostras de Solos	40
3.3	Ensaio de Granulometria	41
3.4	Construção da Cavidade Ressonante	42
3.5	Calibração da Cavidade e Cálculo da Permissividade Elétrica	44
4	Resultados e Discussões	48
4.1	Permissividade nas Massas de Solos	48
4.2	Permissividade nas Frações Granulométricas dos Solos	51
5	Conclusão	54
	Referências Bibliográficas	56

Capítulo 1

Introdução

O solo é um recurso natural de grande importância em muitas atividades humanas, como a agricultura, silvicultura, paisagismo, proteção ambiental, recreação e engenharia civil. O solo oferece uma variedade de serviços ambientais que podem ser classificados nas categorias de suporte (ex.: ciclagem de nutrientes), provisão (ex.: produção de alimentos) e regulação (ex.: sequestro de carbono). O carbono orgânico é um indicador de qualidade de importantes funções desempenhadas pelo solo. O conhecimento da importância e da qualidade do solo é relevante na implantação de estratégias de manejos sustentáveis [1][2].

Solos são identificados como materiais dielétricos ou de baixa condutividade e são caracterizados por sua condutividade, constante dielétrica e tangente de perdas. Em um meio não homogêneo como o solo, a permissividade elétrica é a combinação das permissividades elétricas individuais de seus constituintes, como areia, silte, argila, matéria orgânica [3].

Permissividade elétrica é definida como a capacidade de um material absorver, emitir, dispersar e refletir uma porção do campo ou energia eletromagnética. Depende das propriedades físicas e químicas do material, que incluem forma e tamanho da amostra, umidade, temperatura, frequência, pH [4].

Diversos métodos são usados para a medição de permissividade. A escolha de um método específico depende de fatores como a natureza do material (sólido, semisólido, líquido, granulado), o tamanho e forma do mesmo, a regularidade de sua superfície, a precisão exigida, entre outros fatores. O Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismos Aplicado (GTEMA) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) tem investido em pesquisas de caracterização de materiais e métodos de medição, objetivando identificar assinaturas

elétricas de materiais [5][6][7].

Na literatura há escassez de trabalhos e dados de caracterização dielétrica de solos florestais. Neste sentido, este estudo apresenta os resultados da caracterização dielétrica de três tipos de solos encontrados na Floresta Nacional da Restinga de Cabedelo, localizada no Estado da Paraíba - Brasil, na faixa de frequências de micro-ondas, obtidos pelo método da perturbação da cavidade ressonante. A cavidade foi construída com dimensões para ressoar na banda S a uma frequência de 2,72 GHz.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar a permissividade complexa, pelo método da perturbação da cavidade ressonante, de três tipos de solos encontrados na Floresta Nacional Restinga de Cabedelo (Flona de Cabedelo).

1.2 Objetivos Específicos

- Simular por meio do software *High Frequency Structure Simulator* (ANSYS HFSS) as dimensões da íris para sintonizar a frequência de ressonância, de acordo com as dimensões da cavidade.
- Construir e calibrar com amostras de valores de permissividades conhecidos uma cavidade ressonante retangular para efetuar as medições.
- Realizar as medições e calcular a permissividade elétrica das amostras de solos;
- Correlacionar os resultados obtidos com parâmetros físico-químicos conhecidos de cada tipo de solo trabalhado.

1.3 Organização do Trabalho

Além deste capítulo de introdução, esta dissertação é composta por mais quatro capítulos a saber, além das referências bibliográficas.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica, onde é abordado o estudo das propriedades dielétricas de materiais, dos parâmetros de espalhamento S, dos métodos de medição de propriedades dielétricas de materiais, e da teoria aplicada a cavidade ressonante.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos, onde é apresentada a caracterização dos solos coletados, os procedimentos de construção e as medições com a cavidade ressonante.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões, onde são exibidos e discutidos os resultados obtidos das medições e dos cálculos da permissividade elétrica. Também é feita a correlação desses resultados com os parâmetros físico-químicos dos solos analisados.

Capítulo 5 – Conclusão, onde são relatadas as conclusões do trabalho realizado.

Referências bibliográficas utilizadas.

1.4 Publicação

O trabalho envolvido na preparação desta dissertação deu origem ao seguinte artigo:

- C. Lima, J. Carvalho, A. D’Andrea, “*Measurement of Typic Quartzipsamment Soil Permittivity at Different Depths,*” SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2019 – Aveiro, Portugal.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Polarização e Permissividade Elétrica

Os meios de propagação de ondas eletromagnéticas podem ser classificados de acordo com suas características elétricas e magnéticas, como permissividade elétrica (ε), permeabilidade magnética (μ) e condutividade elétrica (σ). Eles podem ser dielétricos perfeitos, dielétricos com perdas, semicondutores, bons condutores ou condutores perfeitos. A classificação também depende da frequência da onda eletromagnética que se propaga no meio. Um meio pode ser dielétrico para uma determinada faixa de frequências e condutor para outra [8].

A polarização elétrica refere-se à criação e alinhamento de dipolos dentro de um material dielétrico sob a influência de um campo elétrico externo, tornando um lado do átomo ou molécula positivo e o lado oposto negativo (Figura 2.1).

A propriedade que descreve o comportamento de um dielétrico sob a influência de um campo de alta frequência é a permissividade complexa. A permissividade mostra a capacidade do material de se polarizar em resposta ao campo elétrico externo. É definida como:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.1)$$

cuja parte real ε' representa a capacidade do material de armazenar energia, em resposta a um campo elétrico externo aplicado, e a parte imaginária ε'' indica a dissipação de energia em forma de calor. A unidade no Sistema Internacional é farad por metro (F/m).

A permissividade complexa relativa ε_r , tem seu valor absoluto relativo ao da permis-

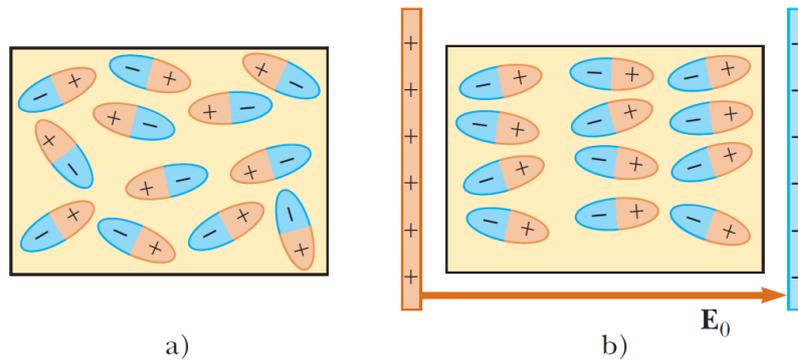
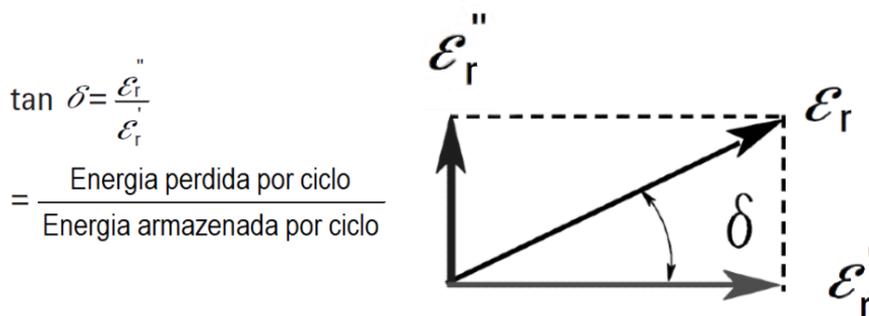


Figura 2.1: Momento dipolar (P) - a) As moléculas têm orientação aleatória na ausência de um campo elétrico. b) As moléculas se alinham parcialmente quando se aplica um campo elétrico externo. Fonte: Adaptado de [9].

sividade do vácuo, $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{12} F/m$, tornando-se uma quantidade adimensional. Pode ser escrita como 2.2.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan\delta) \quad (2.2)$$

em que $\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$ é chamado de tangente de perda e representa a relação entre a parte imaginária e a parte real da permissividade complexa. Representa, portanto, as perdas ou o poder de absorção que tem o material. Quando a permissividade complexa é desenhada como um diagrama vetorial simples (Figura 2.2), as componentes reais e imaginárias estão 90° fora de fase. A soma vetorial forma um ângulo δ com o eixo real (ϵ'_r). A "tangente de perdas" relativa de um material é a relação entre a energia perdida e a energia armazenada. O valor mínimo de ϵ''_r é 0, o que corresponde a um meio sem perdas.



$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} = \frac{\text{Energia perdida por ciclo}}{\text{Energia armazenada por ciclo}}$$

Figura 2.2: Diagrama do vetor tangente de perdas [10].

A parte real da permissividade ou constante dielétrica ϵ'_r , é a parte reativa de permis-

sividade, isto é, representa uma medida relativa da densidade de energia de micro-ondas dentro do material. O mínimo valor de ϵ'_r é 1, que corresponde a permissividade do vácuo; o ar tem uma permissividade de aproximadamente 1.0006, e o resto de sólidos e líquidos tem uma permissividade maior que 1. Seu valor depende de muitos fatores diferentes: densidade, umidade, temperatura, composição, microestrutura, etc. Além disso, também é fortemente dependente da frequência que produz as variações do campo elétrico a qual o material está submetido[11].

Analogamente à permissividade, a permeabilidade magnética relativa μ_r mensura o campo magnético no interior de um material, devido ao campo magnetizante pré-existente na região onde o material de teste é colocado. Também pode ser dada por duas componentes, μ'_r e μ''_r , em que $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$. Neste trabalho, serão manuseados apenas materiais não magnéticos, assim, será assumido que a permeabilidade relativa das amostras terá valor $\mu_r = 1$.

O comportamento da permissividade (ϵ'_r e ϵ''_r) varia em função da frequência, conforme exibe a Figura 2.3. Condução iônica, relaxação dipolar, polarização atômica, e polarização eletrônica são os principais mecanismos que contribuem para a permissividade de um material dielétrico. Em baixas frequências ϵ''_r é dominado pela influência da condução iônica. A variação da permissividade na faixa em micro-ondas é causada, principalmente, pela relaxação dipolar, e nas faixas de frequências superiores, essencialmente, pela polarização atômica e eletrônica.

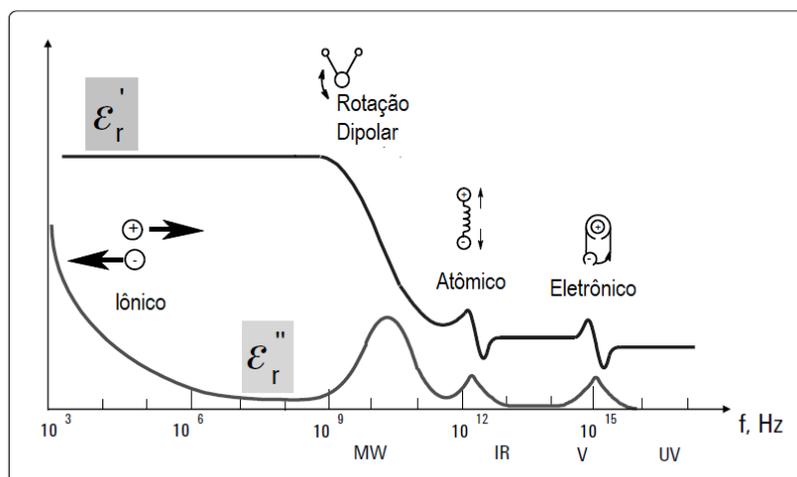


Figura 2.3: Efeitos dos diferentes mecanismos de polarização em função da frequência [10].

2.2 VNA e Parâmetros S

O analisador de rede vetorial (do inglês *Vetorial Network Annalyzer* - VNA) é um instrumento amplamente utilizado para aplicações de desenvolvimento de circuitos de RF. É um sistema de teste que possibilita caracterizar o desempenho de dispositivos de radiofrequência (RF) e micro-ondas em termos de parâmetros de espalhamento de rede, ou parâmetros S . Os analisadores de redes medem precisamente a energia incidente, refletida e transmitida, por exemplo, mede a energia passada à linha de transmissão, a energia refletida de volta à fonte (devido ao descasamento de impedância) e a energia transmitida com sucesso ao dispositivo final.

A Figura 2.4 ilustra um dispositivo de duas portas sob teste. As variáveis a_i e b_i , representadas pelas expressões 2.3 e 2.4, são ondas de tensão complexas normalizadas incidente e refletido na i -ésima porta da rede. Elas são definidas em termos da tensão terminal V_i , a corrente terminal I_i e uma impedância de referência arbitrária Z_i , onde o asterisco denota o conjugado complexo [12]:

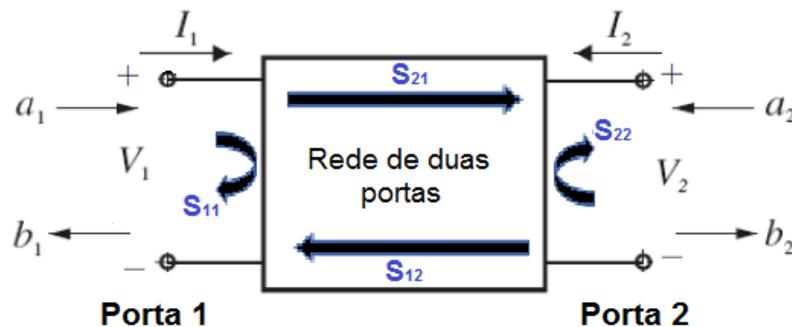


Figura 2.4: Rede de duas portas com as ondas incidente (a_1 e a_2) e refletidas (b_1 e b_2). Fonte: Adaptado de [12].

$$a_i = \frac{V_i + Z_i I_i}{2\sqrt{|Re Z_i|}} \quad (2.3)$$

$$b_i = \frac{V_i - Z_i^* I_i}{2\sqrt{|Re Z_i|}} \quad (2.4)$$

O sistema matricial que relaciona as ondas incidentes a_1 , a_2 às ondas de saída b_1 , b_2 através dos Parâmetros- S é representado como:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.5)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.6)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2.7)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2.8)$$

As equações mostram que os parâmetros S são expressos como S_{ij} , em que o índice (i) indica a porta onde foi feita a medição e índice (j) a porta onde o sinal foi inserido na rede de micro-ondas [13].

O significado de cada um dos quatro Parâmetros- S pode ser escrito como:

- S_{11} é o coeficiente de reflexão medido na porta 1, com a porta 2 terminada por uma carga casada;
- S_{21} é o coeficiente de transmissão direto, da porta 1 para a porta 2, com a porta 2 terminada por uma carga casada;
- S_{12} é o coeficiente de transmissão reverso, da porta 2 para a porta 1, com a porta 1 terminada por uma carga casada;
- S_{22} é o coeficiente de reflexão medido na porta 2, com a porta 1 terminada por uma carga casada.

2.3 Métodos de Medição de Propriedades Dielétricas

Os métodos para caracterização de materiais são divididos em métodos não ressonantes e métodos ressonantes. Métodos não ressonantes são usados para obter um conhecimento geral de propriedades eletromagnética em uma faixa de frequência; métodos ressonantes

são usados para obter conhecimento preciso de propriedades dielétricas em frequência única ou em várias frequências discretas [14].

2.3.1 Métodos Não Ressonantes

Em métodos não ressonantes, as propriedades dos materiais são fundamentalmente deduzidas a partir da impedância e velocidades das ondas nos materiais. Quando uma onda eletromagnética se propaga de um meio para outro (do espaço livre para a amostra, por exemplo), a impedância característica e a velocidade da onda mudam, resultando em uma reflexão parcial da onda eletromagnética na interface entre os dois meios. Medidas dessas ondas refletida e transmitida fornecem informações para a dedução da permissividade e permeabilidade do material em análise. Os métodos não ressonantes mais importantes são discutidos a seguir.

Ponta de Prova Coaxial

Este método usa uma linha coaxial com uma sonda na extremidade que detecta o sinal refletido (S_{11}) do material analisado (Figura 2.5).

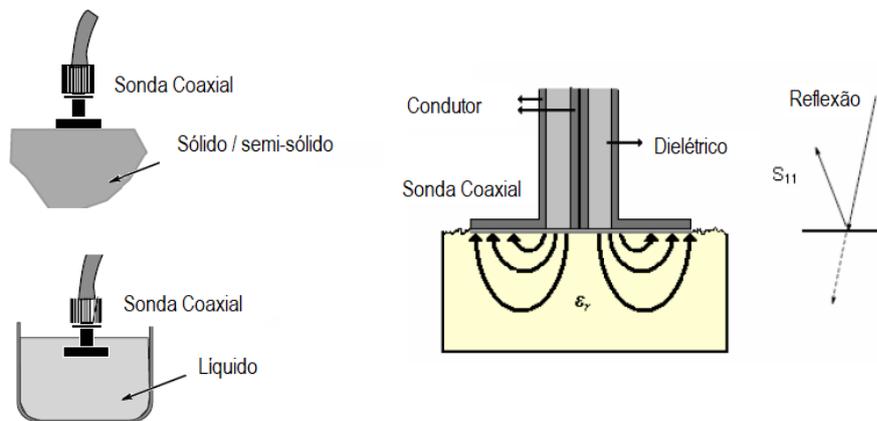


Figura 2.5: Método da ponta de prova coaxial. Fonte: Adaptado de [15].

As propriedades dielétricas do material em teste são obtidas colocando a sonda em contato direto com a face plana, caso seja um sólido, ou submergindo-a, caso seja um líquido ou semisólido. Tipicamente, um sistema de ponta de prova coaxial é formado por um VNA, uma sonda coaxial e um computador. O método é simples e possibilita a realização de medições da constante dielétrica sobre ampla faixa de frequência 0,5 GHz a

110 GHz [15]. Porém, a precisão é limitada com materiais que possuem baixos valores de ϵ_r' e ϵ_r'' .

Linhas de Transmissão

Este método consiste em inserir a amostra a ser analisado como parte de uma linha de transmissão, a fim de se estudar o comportamento dos campos que se propagam através dessa linha (Figura 2.6). Geralmente três tipos de linha de transmissão são usados: guias retangulares, linhas coaxiais ou linhas microfita.

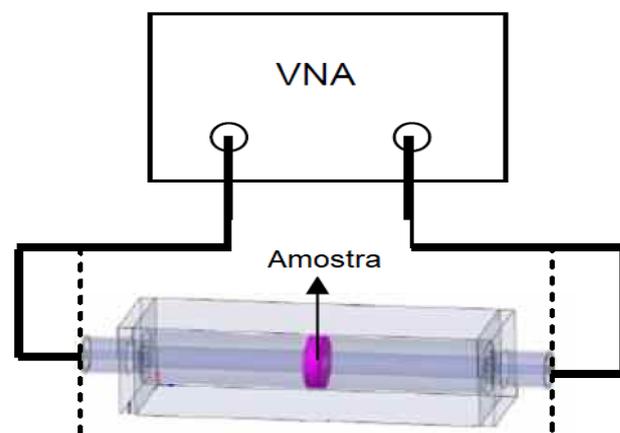


Figura 2.6: Método da linha de transmissão [16].

O método possibilita determinar tanto a permissividade elétrica ϵ_r como a permeabilidade magnética μ_r , a partir das medições do sinal refletido (S_{11} e S_{22}) ou simultaneamente transmitido e refletido (S_{21} e S_{12}), obtidos por um VNA.

Este método apresenta uma maior precisão e sensibilidade do que a linha coaxial, mas uma faixa de frequência mais estreita. A preparação da amostra é relativamente difícil, uma vez que a amostra deve cobrir a área de seção transversal inteira da linha. O método é mais apropriado para materiais sólidos que permitem ser usinados de forma precisa para adaptar-se dentro de um guia de ondas retangular ou coaxial com o ar.

Espaço Livre

O método usa antenas conectadas a um VNA, para concentrar energia de micro-ondas em uma placa feita com o material a ser investigado (Figura 2.7). Pode ser usado tanto em reflexão como em transmissão.

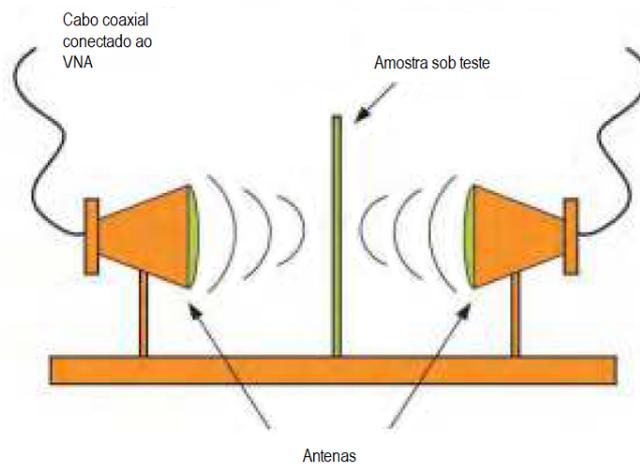


Figura 2.7: Método espaço livre [15].

Esta metodologia é sem contato e não destrutiva, geralmente usa frequências altas. No método de espaço livre, as amostras são grandes, planas e as faces de ambos os lados da placa devem ser uniformes e sem irregularidades. É usada para medir as características dielétricas de sólidos.

A vantagem de usar este sistema de medição é obter os coeficientes de reflexão e de transmissão, sem o contato físico com a amostra, sendo apropriado para medições de materiais sob altas temperaturas.

2.3.2 Técnicas Ressonantes

Métodos ressonantes geralmente têm maior precisão e sensibilidades do que métodos não-ressonantes. Esses métodos conseguem obter medições da permissividade e tangente perdas com boa precisão, contudo, não são bons quando as amostras apresentam tangente de perdas elevada.

Métodos ressonantes possuem duas classificações: o método puramente ressonante e o método de perturbação ressonante. No método puramente ressonante o dielétrico é usado como ressonador. No método de perturbação ressonante, o dielétrico averiguado é usado para perturbar a distribuição do campo elétrico ou magnético dentro de uma cavidade ressonante [14].

Método Puramente Ressonante

Neste método, a amostra dielétrica investigada serve como um ressonador no circuito de medição, e a constante dielétrica e a tangente de perda da amostra são determinadas a partir de sua frequência de ressonância e fator de qualidade. A Figura 2.8 mostra a configuração frequentemente usada no método, também chamado de placas paralelas. Nesta configuração, a amostra é colocada entre duas placas condutoras, construindo um capacitor.

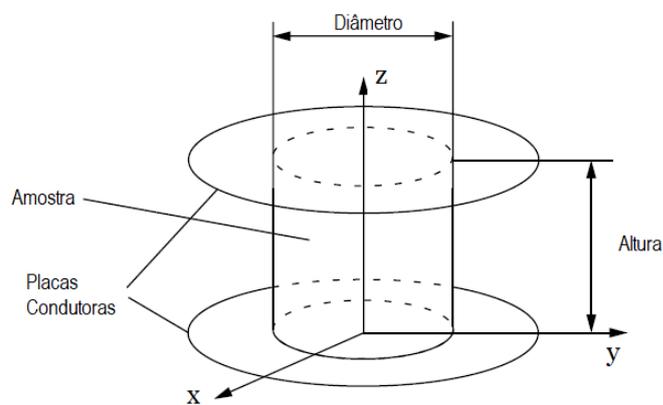


Figura 2.8: Método puramente ressonante – Placas paralelas [14].

Método da Perturbação Ressonante

Os ressonadores de cavidade são caixas ocas retangulares ou cilíndricas, onde uma onda eletromagnética estacionária é criada em seu interior, podendo ser perturbada por uma amostra (Figura 2.9).

O material em análise quando é inserido no centro do dispositivo, altera a frequência de ressonância e o fator de qualidade Q da cavidade do estado inicial (em vazio), fornecendo informações necessárias para o cálculo da constante dielétrica e a tangente de perdas da amostra.

O volume da amostra deve ser bem pequeno em relação ao volume da cavidade. Por esse motivo, a preparação da amostra é difícil em altas frequências.

A cavidade ressonante pode operar no modo fundamental TE (Transversal Elétrico) ou TM (Transversal Magnético). Pode ser usada para líquidos, sólidos, e até com materiais em alta temperatura. Proporciona procedimento de medição simples, alta sensibilidade e

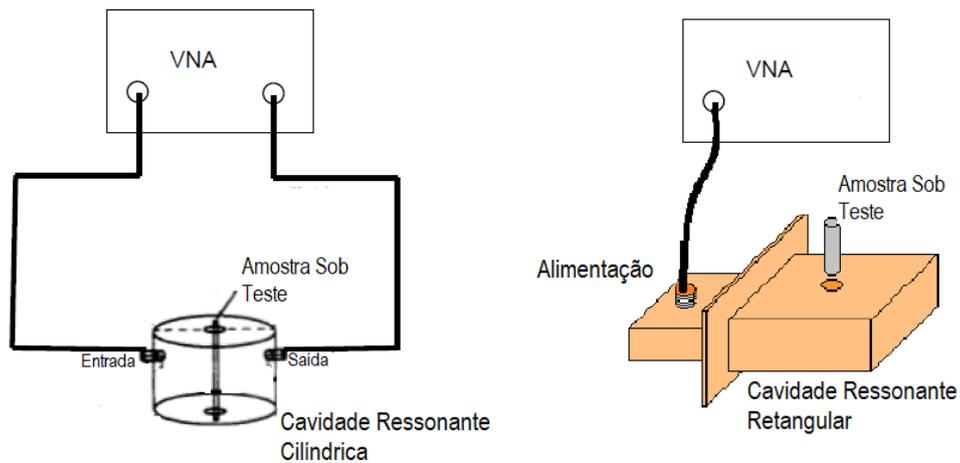
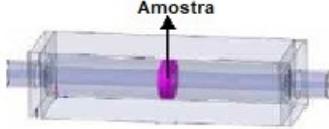
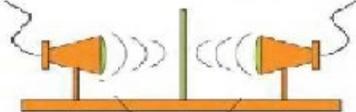
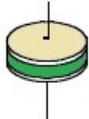
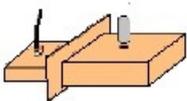


Figura 2.9: Método da perturbação ressonante. Fonte: Autor.

avaliação indireta de permissividade elétrica complexa, bem como permeabilidade magnética.

Para uma melhor comparação entre os métodos, o Quadro 1 apresenta os principais atributos dos métodos já comentados.

Quadro 1: Comparativo dos Métodos de Medição

Sonda Coaxial ϵ_r		Não destrutivo; não requer preparação de amostra; bom para materiais com perdas; ideal para líquidos e semisólidos; ampla faixa de frequência.
Linha de Transmissão ϵ_r e μ_r		Bom para materiais com baixa tangente de perdas; indicado para materiais sólidos; as amostras têm que ser usinadas; ampla faixa de frequências.
Espaço Livre ϵ_r e μ_r		Pode ser usado em altas temperaturas; não contato com as amostras; as amostras têm que ser grandes e planas.
Placas Paralelas ϵ_r		Bom para baixas frequências; amostras finas e lisas; boa precisão dos resultados.
Cavidade Ressonante ϵ_r e μ_r		Bom para materiais com baixa tangente de perdas; amostras pequenas; alta precisão.

2.4 Cavity Ressonante

O dispositivo proposto para a mensuração da permissividade é uma cavidade ressonante retangular, pois além de promover o trabalho com materiais granulados, possui alta sensibilidade, estabilidade e precisão. Esta seção apresenta particularidades dos parâmetros e procedimentos do método da perturbação cavidade ressonante.

2.4.1 Frequência de Ressonância

A expressão da frequência de ressonância para os modos TE_{mnp} no interior de uma cavidade retangular é a mesma para os modos TM_{mnp} (Equação 2.9). Os índices m , n e p indicam o número de variações no padrão da onda estacionária nas direções x , y , z , respectivamente (Figura 2.11).

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad (2.9)$$

Uma vez que $p \geq 1$ e m e n não nulos simultaneamente, a frequência de ressonância mais baixa de um modo TE na cavidade considerada será dado pela Equação 2.10.

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2} \quad (2.10)$$

o que significa que o modo TE dominante é o modo TE_{101} .

2.4.2 Fator de Qualidade

Um parâmetro importante dos ressonadores é o fator de qualidade ou o fator Q . É um parâmetro adimensional que descreve como uma ressonância é amortecida ou, de forma equivalente, caracteriza uma largura de banda de ressonância relativa à sua frequência central. Um Q maior indica uma menor taxa de perda de energia em relação à energia armazenada no ressonador.

O fator Q de uma ressonância é geralmente definido como a razão entre a energia média ponderada armazenada na cavidade e a perda de energia por ciclo (ou equivalentemente, a energia fornecida por um gerador, por ciclo, para manter a amplitude do sinal constante)[14]:

$$Q = \frac{\text{Energia média armazenada}}{\text{Energia perdida por ciclo}}$$

No domínio da frequência, o fator de qualidade da cavidade pode ser determinado pela Equação 2.11 [14].

$$Q = \frac{f_o}{\Delta f_{3dB}} \quad (2.11)$$

Em que f_o é a frequência de ressonância, e Δf_{3dB} a largura de banda de meia potência, como pode ser verificado na figura 2.10.

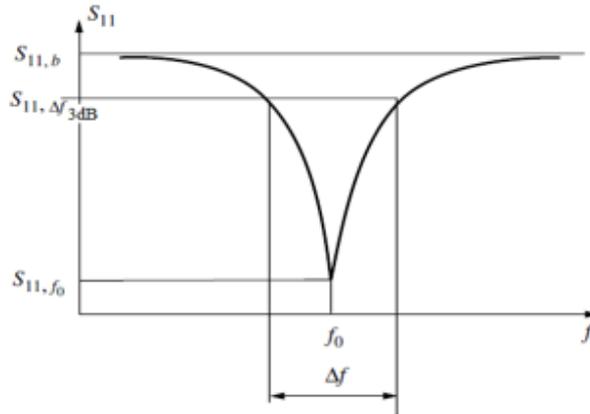


Figura 2.10: Medição do do fator de qualidade por meio do Parâmetro S_{11} [14].

2.4.3 Mensuração da Permissividade

A perturbação da cavidade ressonante pode ser produzida pela modificação do volume (perturbações de forma) ou pela introdução de pequenas porções de dielétrico ou material ferromagnético (perturbações materiais). A segunda forma é a mais indicada para medições em dielétricos [17].

A Figura 2.11(a) exhibe uma cavidade ressonante vazia, perturbada por uma mudança de sua permissividade pela inserção de um material (Figura 2.11(b)). A mudança da frequência ressonante do cavidade perturbada é dada pela Equação 2.12 [14].

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{-\iiint_{V_c} [(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 + (\mu_2 - \mu_1)\vec{H}_1 \cdot \vec{H}_2]dV}{\iiint_{V_c} (\varepsilon_1\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 + \mu_1\vec{H}_1 \cdot \vec{H}_2)dV} \quad (2.12)$$

Onde \vec{E}_1 , \vec{H}_1 , ω_1 , μ_1 e ε_1 definem a cavidade sem perturbação (em vazio); e \vec{E}_2 , \vec{H}_2 , ω_2 , $\mu_2 = \mu_1 + \Delta\mu$ e $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \Delta\varepsilon$ definem a cavidade perturbada (com a inserção do material).

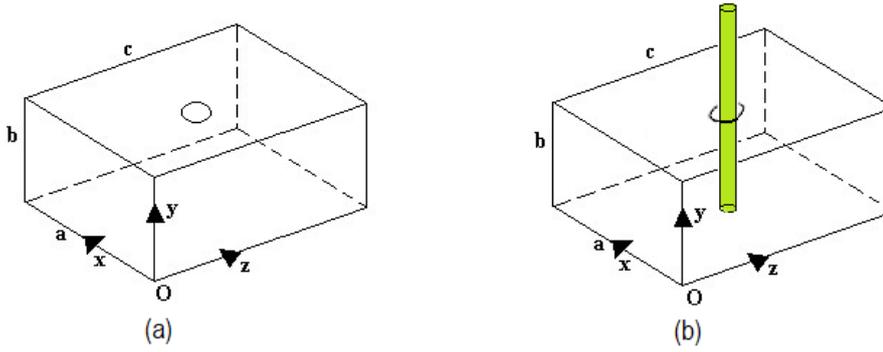


Figura 2.11: Cavidade Retangular.(a) Cavidade vazia. (b)Cavidade com amostra inserida em seu interior. Fonte: Autor.

Embora essa equação seja exata, o cálculo da mudança frequência de ressonância não é uma forma muito utilizável, uma vez que, geralmente, não se sabe os valores corretos dos campos elétrico (\vec{E}_2) e magnético (\vec{H}_2). Medições aproximadas podem ser feitas quando o volume da amostra seja bem pequeno em relação ao volume da cavidade. Nestes casos tem-se pequenas perturbações da cavidade.

Considerando que na cavidade 1 (em vazio)(Figura 2.11(a)): $\mu_1 = \mu_o$ e $\varepsilon_1 = \varepsilon_o$ e o volume V_s da amostra é muito pequena em comparação com o volume V_c da cavidade (Figura 2.11(b)), pode-se supor que $E_2 = E_1$ e $H_2 = H_1$ nos integrantes do denominador da Equação 2.12. Assim, os integrandos tornam-se $|\vec{E}_1|^2$ e $|\vec{H}_1|^2$, respectivamente. Admitindo a igualdade em 2.13,

$$\varepsilon_o \iiint_{V_c} |\vec{E}_1|^2 dV \approx \mu_o \iiint_{V_c} |\vec{H}_1|^2 dV \quad (2.13)$$

A equação 2.12 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{- \iiint_{V_c} (\varepsilon_2 - \varepsilon_o) \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 dV + \iiint_{V_c} (\mu_2 - \mu_o) \vec{H}_1 \cdot \vec{H}_2 dV}{2\varepsilon_o \iiint_{V_c} |\vec{E}_1|^2 dV} \quad (2.14)$$

Assumindo que a amostra é não magnética, $\mu_2 = \mu_o$. Assim, o segundo termo do numerador se anula, e se obtém:

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = - \left(\frac{\varepsilon_{r2} - 1}{2} \right) \frac{\iiint_{V_c} \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 dV}{\iiint_{V_c} |\vec{E}_1|^2 dV} \quad (2.15)$$

Em que $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_2/\varepsilon_o$ é a permissividade dielétrica relativa(complexa) da amostra; \vec{E}_1 é o campo elétrico da cavidade vazia (não perturbada); \vec{E}_2 é o campo elétrico na amostra, sendo determinado pela forma e tamanho da amostra.

A frequência angular complexa ω de uma cavidade ressonante está relacionada com a frequência ressonante real f e o fator de qualidade Q da cavidade por [14]:

$$\omega = \omega_r + j\omega_i \quad (2.16)$$

$$\omega_r = 2\pi f \quad (2.17)$$

$$Q = \frac{\omega_r}{2\omega_i} \quad (2.18)$$

Assumindo que $\omega_{r1} \approx \omega_{r2}$ e que $\omega_i \gg \omega_r$, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} &= \frac{(\omega_{r2} - \omega_{r1}) + j(\omega_{i2} - \omega_{i1})}{\omega_{r2} \left(1 + j\frac{\omega_{i2}}{\omega_{r2}}\right)} \\ &\approx \left[\left(\frac{f_2 - f_1}{f_2}\right) + j \left(\frac{1}{2Q_2} - \frac{1}{2Q_1}\right) \right] \times \left(1 - j\frac{1}{2Q_2}\right) \\ &\approx \left(\frac{f_2 - f_1}{f_2}\right) + j \left(\frac{1}{2Q_2} - \frac{1}{2Q_1}\right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Supondo $Q_2 \gg 1$ e aplicando a Equação 2.19 na Equação 2.15, obtém-se:

$$\left(\frac{f_2 - f_1}{f_2}\right) + j \left(\frac{1}{2Q_2} - \frac{1}{2Q_1}\right) = - \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2}\right) \frac{\iiint_{V_c} \vec{E}_1^* \cdot \vec{E}_2 dV}{\iiint_{V_c} |\vec{E}_1|^2 dV} \quad (2.20)$$

A Equação 2.20 pode ser reescrita como:

$$2 \left(\frac{f_1 - f_2}{f_2}\right) = (\varepsilon_r' - 1)C \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} = \varepsilon_r'' C \quad (2.22)$$

Com

$$C = \frac{\iiint_{V_s} \vec{E}_1^* \cdot \vec{E}_2 dV}{\iiint_{V_s} |\vec{E}_1|^2 dV} \quad (2.23)$$

Para medições de permissividade, no método da perturbação de cavidades, o parâme-

tro C é considerado como uma constante independente das propriedades das amostras. Para tornar a expressão mais clara, são introduzidos dois parâmetros A e B, em vez de C (Equações 2.24 e 2.25) [14]:

$$\left(\frac{f_1 - f_2}{f_2} \right) = A(\varepsilon_r' - 1) \frac{V_s}{V_c} \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} = B\varepsilon_r'' \frac{V_s}{V_c} \quad (2.25)$$

em que, V_c e V_s são os volumes da cavidade e da amostra, respectivamente; f_1 é a frequência da cavidade vazia (sem amostra) f_2 é a frequência de ressonância da cavidade com a amostra; Q_1 é o fator de qualidade da cavidade vazia; e Q_2 é o fator de qualidade da cavidade com a amostra.

Semelhante ao parâmetro C, os parâmetros A e B são relacionados com a configuração e o modo de trabalho da cavidade, com a forma da amostra e sua localização no interior da cavidade. Como é difícil calcular os parâmetros A e B analiticamente, os parâmetros são geralmente obtidos por calibração usando uma amostra padrão de permissividade conhecida [18].

2.5 Solo

O solo é uma interface litosfera-atmosfera de quatro dimensões (comprimento, largura, profundidade e tempo), constituído por partes sólidas, líquidas e gasosas, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, que funciona como um meio para o crescimento das plantas e como moderador de processos ecológicos essenciais para o funcionamento de ambientes aquáticos e terrestres [19] [20].

A qualidade do solo determina, de forma significativa, a natureza dos ecossistemas das plantas e a capacidade da terra em sustentar a vida animal e a dos seres humanos [21].

Todas partes de seus perfis participam de importantes processos dos ecossistemas. O perfil do solo é definido como a sucessão de horizontes que inicia da superfície do solo até a rocha inalterada, em um corte vertical do terreno, constituindo-se em camadas sobrepostas frequentemente paralelas a superfície do solo e com limites irregulares, resultantes da ação dos processos pedogenéticos (Figura 2.12) [22].

Os horizontes refletem os processos de formação do solo a partir do intemperismo do substrato rochoso ou de sedimentos de natureza diversa. São designados por letras maiúsculas A, B, C, R, O H, E, sendo que as letras A, B, e C representam os horizontes principais do solo. [22].

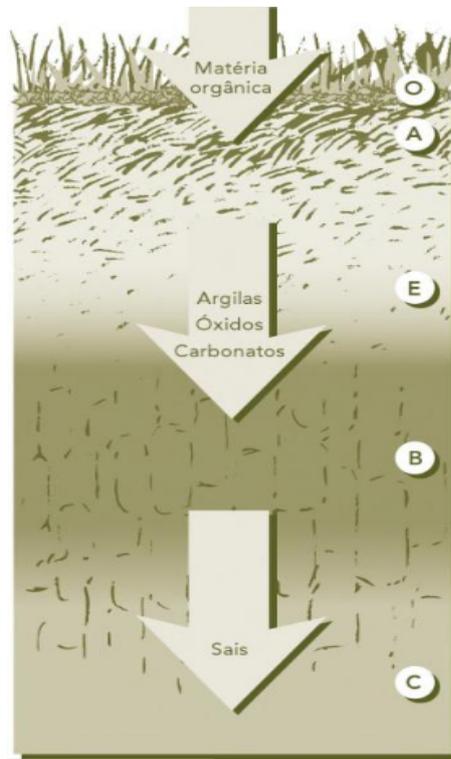


Figura 2.12: Ilustração dos horizontes do solo [21].

- O horizonte A é a camada predominantemente mineral mais próxima da superfície. Sua característica fundamental é o acúmulo de matéria orgânica, tanto parcial como totalmente humificada [23].
- O horizonte E, presente em alguns solos, é mais claro, no qual ocorrem perdas de materiais translocados para o horizonte B (argilas e/ou óxidos de ferro e húmus). A esse processo de translocação dá-se o nome de eluviação. O horizonte representado pelo símbolo B é definido como aquele que apresenta o máximo desenvolvimento de cor, estrutura e/ou que possui acúmulo de materiais translocados dos horizontes A e/ou E [23].
- O horizonte C é à rocha pouco alterada pelos processos de formação do solo e, portanto, com características mais próximas ao material do qual o solo, presumi-

velmente, se formou. A letra R é utilizada para identificar a rocha inalterada, que pode ser, ou não, a rocha matriz de onde se desenvolveu o solo [23] [22].

- A Letra O indica um horizonte orgânico constituído principalmente por folhas e galhos que caem dos vegetais e pelos primeiros produtos em decomposição, em um solo bem drenado. Em condições de má drenagem, a letra H é usada [23] [22].

A textura é uma das características físicas mais estáveis do solo, uma vez que não muda com o passar do tempo, fazendo com seja considerada um elemento de grande importância na descrição, identificação e classificação de um solo. A textura representa as proporções relativas das frações de areia, silte e argila do solo. A Tabela 2.1 apresenta as faixas de graduação para diferenciar as frações de solo adotados pela SiBCS .

Tabela 2.1: Frações granulométricas Padrão SiBCS [19].

Diâmetros (mm)	Nomenclatura
2 - 1	Areia Muito Grossa - AMG
1 - 0,5	Areia Grossa - AG
0,5 - 0,25	Areia Média - AM
0,25 - 0,125	Areia Fina -AF
0,125 - 0,053	Areia Muito Fina -AMF
0,053 - 0,002	Silte - S
< 0,002	Argila - A

2.5.1 Solos do Brasil

Os solos brasileiros foram catalogados em 13 classes pelo SiBCS, segundo suas características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas, além das informações e dados relativos à área em que se encontravam, como: clima, aspectos hídricos (chuvas, passagem de rios, lençóis freáticos), material de origem, época de formação, relevo e vegetação [19]. O Quadro 2 apresenta as classes de solos com suas características principais e área de abrangência no País.

Predominam os Latossolos, Argissolos e Neossolos, que no conjunto se distribuem em aproximadamente 78% do território nacional.

Quadro 2: Classes de Solos do Brasil

Classes	Termos de conotação e de memorização	Origem do nome	Abrangência no Brasil
ARGISSOLO	Solos com processo de acumulação de argila	Do latim argilla, "argila"	24,00%
CAMBISSOLO	Solos que possuem o horizonte B em formação	Do latim cambiare, "trocar"	2,50%
CHERNOSSOLO	Solos ricos em matéria orgânica, com coloração escura	Do russo chorniy, "preto"	0,50%
ESPODOSSOLO	Solos com horizonte subsuperficial com acúmulo de matéria orgânica e alumínio, podendo ou não apresentar acúmulo de ferro	Do grego spodos, "cinza vegetal"	2,00%
GLEISSOLO	Solos em ambiente saturado por água, mal ou muito mal drenados (hidromórficos)	Do russo gley, "massa do solo pastosa"	4,00%
LATOSSOLO	Solos altamente intemperizados e sem incremento de argila em profundidade.	Do latim lat, "tijolo"	39,00%
LUVISSOLO	Solos com acúmulo de argila em subsuperfície associado à argila de atividade alta de translocação de argila	Do latim luere, "lavar"	3,00%
NEOSSOLO	Solos com pouco desenvolvimento pedogenético	Do grego neo, "novo"	15,00%
NITOSSOLO	Solos argilosos, ausência de gradiente textural e bem estruturados	Do latim nitidus, "brilhante"	1,50%
ORGANOSSOLO	Solos com maior expressão da constituição orgânica. Horizonte H ou O	Do latim "organicus"	0,03%
PLANOSSOLO	Solos desenvolvidos em planícies ou depressões com encharcamento estacional.	Do latim planus, "plano"	2,00%
PLINTOSSOLO	Solos com expressivo acúmulo e segregação de ferro	Do grego plinthos, "ladrilho"	6,00%
VERTISSOLO	Solos expansivos e com alta saturação por bases	Do latim vertere, "virar", "inverter"	2,00%

2.5.2 Serviços Ecossistêmicos

Os serviços ecossistêmicos são definidos como os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas, em outras palavras, reflete os benefícios diretos e indiretos providos pelo funcionamento dos ecossistemas [24]. No Brasil, o termo “serviços ecossistêmicos” é comumente utilizado como sinônimo do termo “serviços ambientais”.

A Avaliação Ecossistêmica do Milênio (*Millennium Ecosystem Assessment*) foi um amplo estudo (ocorrido entre os anos de 2001 e 2005) sobre as condições dos ecossistemas mundiais e as consequências de mudanças nesses ecossistemas sobre o bem-estar humano. Ela demonstrou que o conforto humano está intrinsecamente relacionado com a disponibilidade, em quantidade e qualidade, dos serviços ecossistêmicos, os quais, na ordem de 60%, se encontram degradados [25].

Na literatura, há diversas formas de classificações dos serviços ecossistêmicos. A mais utilizada é a adotada pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio que classifica os serviços ecossistêmicos em quatro categorias fundamentais: provisão, regulação, cultural e de suporte [20].

Serviços de suporte formam a base de todos os outros; proveem habitats e mantêm a diversidade de plantas e animais. Os benefícios ocorrem, em sua maioria, de maneira indireta, e se manifestam em longo prazo, como a formação e a manutenção da fertilidade do solo, a produção de oxigênio, a ciclagem de nutrientes e a produção primária, que estão na base do crescimento e da produção.

Serviços de provisão relacionam-se aos materiais e à energia obtidos dos ecossistemas e que são oferecidos diretamente à sociedade, como alimentos e fibras naturais, madeira para combustível, água, material genético, entre outros.

Serviços de regulação estabelecem a qualidade do ar e do solo e reduzem riscos de erosão e cheias (polinização, sequestro de carbono, controle biológico, prevenção de erosão e manutenção da fertilidade do solo, tratamento de águas servidas, moderação de eventos climáticos extremos, regulação do clima e da qualidade do ar).

Serviços culturais são os benefícios imateriais obtidos dos ecossistemas, que contribuem para o bem-estar da sociedade, como enriquecimento espiritual e cultural, desenvolvimento cognitivo, reflexão sobre os processos naturais, oportunidades de lazer, ecoturismo e recreação.

As florestas são ecossistemas biodiversos fundamentais na geração e manutenção des-

tes serviços, na medida em que vêm atendendo ao longo de gerações às mais diversas necessidades humanas – fornecimento de alimentos, fibras, madeira, energia, medicamentos, resinas, corantes, além de servir de abrigo para criações e proteger das intempéries, auxiliar na proteção do solo e da água e na regulação do clima [26].

2.5.3 O Carbono Orgânico e o Ambiente

A atmosfera terrestre é constituída de gases que são relativamente transparentes à radiação solar, entretanto, quando essa radiação é refletida pela superfície terrestre e volta para a atmosfera com um comprimento de onda mais longo (infravermelho), alguns gases, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3), denominados gases de efeito estufa, absorvem e emitem radiação infravermelha, fazendo com que a temperatura média do ar aumente. Os gases responsáveis pelo efeito estufa ocupam menos que 0,1% do volume da atmosfera e possuem relevante papel no balanço energético da Terra, permitindo o surgimento e a manutenção da vida no planeta [27] [28].

Paralelamente as fontes de emissões naturais desses gases existem aquelas ditas antrópicas, que decorrem das atividades humanas e que contribuem para acelerar as emissões desses gases, afetando a composição da atmosfera. Embora o gás metano e o óxido nitroso apresentem potencial de aquecimento maior que o gás carbônico ($CH_4 = 23$ vezes o CO_2 ; e $N_2O = 296$ vezes o CO_2), o CO_2 é emitido em maiores quantidades devido, entre outros fatores: a queima da biomassa (desmatamento seguido de queimadas); a queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) em usinas termoelétricas e indústrias; a circulação de veículos em circulação [28].

Os ecossistemas terrestres que compreendem a vegetação e o solo são considerados atualmente como um grande sumidouro de carbono, especialmente os solos. Estima-se que a quantidade de carbono estocada no solo, do planeta Terra, até 50 cm de profundidade equivale a quantidade contida na atmosfera terrestre, e que a metade desse carbono seja referente aos solos sob florestas [27] [28].

O carbono orgânico do solo está presente na matéria orgânica e é o principal recurso para as atividades da comunidade microbiana do solo, que promove sua decomposição e liberação de nutrientes para as plantas e para a produção de biomassa microbiana. A redução do CO no solo ocorre tanto por sua mineralização química como pelo consumo de carbono do solo e liberação na forma de CO_2 . O CO confere estabilidade à estrutura

do solo e aumenta a sua capacidade de retenção de água. Além disso, contribuem para outros serviços ambientais de suporte, provisão e regulação. Os estoques de carbono no solo variam em função do tipo de solo, profundidade, clima, bioma e, principalmente, uso e manejo da terra [20].

A capacidade do solo de estocar carbono orgânico é bastante considerada no contexto de mudanças climáticas, constituindo-se em um importante indicador de serviços ambientais.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Área de Estudo

Este trabalho utilizou os solos identificados na pesquisa desenvolvida por Coelho et al. [29] sobre o levantamento pedológico detalhado e estoque de carbono orgânico dos solos da Flona de Cabedelo. Flona de Cabedelo ou Floresta Nacional Restinga de Cabedelo, é uma unidade de conservação federal essencialmente urbana, vinculada ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), com uma área de 114, 34 hectares, localizada entre os municípios de Cabedelo e João Pessoa, que abriga um dos últimos fragmentos de mata atlântica em restinga no Estado da Paraíba (ver Figura 3.1), cuja vegetação é predominantemente de floresta de restinga, em diferentes estágios de sucessão, e manguezais.

Os principais solos identificados pela referida pesquisa foram os Neossolos Quartzarênicos, localizados em cotas altimétricas mais elevadas da área estudada, onde há vegetação de floresta de restinga; e os Gleissolos Sálícos e Gleissolos Tiomórficos, solos próximos das águas salobras do Rio Mandacaru. São identificados como RQo os Neossolos Quartzarênicos; GZn os Gleissolos Sálícos; e GJo os Gleissolos Tiomórficos, segundo classificação do SiBCS [19]. A Figura 3.2 mostra a distribuição dos solos na Flona de Cabedelo.

Os Neossolos Quartzarênicos predominam exclusivamente na floresta alta de restinga, onde cobrem uma área aproximada de 58 hectares da Flona de Cabedelo. São solos com estrutura de areia de quartzo, característicos dos terraços marinhos holocênicos, muito homogêneos, de pouca agregação, bastante drenados, com fertilidade natural baixíssima e carbono orgânico presente principalmente nos primeiros centímetros do solo, devido à



Figura 3.1: Localização da Flona de Cabedelo. Fonte: Google Maps.

reciclagem de material orgânico das folhas, galhos e frutos da floresta depositados na superfície do solo.

As propriedades físico-químicas encontradas dos Neossolos Quartzarênicos, apresentadas na Tabela 3.1 [29], mostram que ele é composto basicamente de areia grossa (em torno de 84%), não apresentando grandes variações granulométricas nas diferentes profundidades; que sua acidez varia pouco com a profundidade; e que o maior estoque de carbono ocorre nas camadas superficiais, até 20cm.

Tabela 3.1: Propriedades encontradas dos Neossolos Quartzarênicos [29]

Profundidade (cm)	Composição granulométrica g kg ⁻¹			pH	Carbono Orgânico g kg ⁻¹
	Areia grossa 2 - 0.20 mm	Areia fina 0.20 - 0.05 mm	Silte 0,05 - 0,002 mm		
0 – 10	839	113	38	4,8	15,6
10 – 20	838	134	18	4,7	6,6
20 – 30	843	124	23	4,8	1,6
30 – 50	815	144	31	5,1	1,0
50 – 100	816	162	12	5,0	0,4

Os Gleissolos Sálícos estão situados em cota altimétrica inferior, aproximadamente 4



Figura 3.2: Distribuição dos solos da Flona de Cabedelo e locais onde foram coletadas as amostras de solos. Adaptado de [29]

m abaixo em relação aos Neossolos Quartzarênicos, sujeitos à forte influência fluvial e do regime de maré, passam considerável parte do ano inundados. São solos mal drenados, de textura arenosa, ricos em sais e sódio; cobrem uma área de aproximadamente 0,59 hectares e estão sob vegetação de gramíneas halófilas com baixa densidade de indivíduos.

Conforme dados expostos na Tabela 3.2 [29], os Gleissolo Sáficos apresentam uma diminuição da granulometria com a profundidade; a areia grossa prevalece apenas na superfície (cerca de 84% do volume); e a acidez varia de acidez para neutra nas camadas mais profundas, onde também ocorre o maior acúmulo de carbono.

Tabela 3.2: Propriedades encontradas dos Geissolos Sáficos [29]

Profundidade (cm)	Composição granulométrica g kg ⁻¹			pH	Carbono Orgânico g kg ⁻¹
	Areia grossa 2 - 0.20 mm	Areia fina 0.20 - 0.05 mm	Silte 0,05 - 0,002 mm		
0 – 20	836	131	31	6,1	10,2
20 – 50	576	413	7	6,3	9,0
50 – 100	423	521	16	6,2	9,2
100 – 200	110	316	283	7,0	40,8

Os Gleissolos Tiomórficos são mais fortemente influenciados do que os Gleissolos Sáficos, pelas águas salobras de maré alta e de inundação; também passam considerável parte

do ano inundados e cobrem uma área de aproximadamente 0,93 hectares. São solos muito mal drenados, de textura arenosa, com elevados teores de enxofre e sais de sódio.

Tabela 3.3: Propriedades encontradas dos Geissolos Tiomórficos [29]

Profundidade (cm)	Composição granulométrica g kg ⁻¹			pH	Carbono Orgânico g kg ⁻¹
	Areia grossa 2 - 0.20 mm	Areia fina 0.20 - 0.05 mm	Silte 0,05 - 0,002 mm		
0 – 40	559	253	65	4,2	14,7
40 – 100	562	208	86	3,1	16,9
100 – 200	148	335	330	2,9	-

A Tabela 3.3 [29] exhibe as propriedades do Gleissolo Tiomórfico. As partículas deste solo possuem um tamanho menor que outros tipos de solos. Em relação a acidez, também, é o de maior acidez, principalmente nas camadas mais profundas, onde se encontra maior concentração de compostos de enxofre.

3.2 Coleta das Amostras de Solos

As amostras dos Neossolos Quatzarênicos foram coletadas nas profundidades de 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-50cm e 50-100cm, por meio da abertura de uma minitrincheira (1 m x 1 m x 1 m), no local indicado na Figura 3.2. Para cada profundidade foram coletadas três amostras.



Figura 3.3: Minitrincheira para coleta das amostras do Gleissolo Sáfico. Fonte: Autor.

Para os Gleissolos Sáficos e Gleissolos Tiomórficos, as minitrincheiras foram abertas nas dimensões 0,5 cm x 0,5 cm x 0,5m, devido baixa profundidade do lençol freático.

As amostras foram coletadas nas profundidades 0-20 cm, 20-30 cm, 30-40m e 40-50 cm, sendo uma amostra para cada profundidade. O local de cada minitrincheira, também, está indicado na Figura 3.2.

Antes das medições, todas as amostras foram deixadas em repouso ao ar livre para a eliminação da umidade delas. A Figura 3.3 mostra a minitrincheira para a coleta do Gleissolo Sáfico.

3.3 Ensaio de Granulometria

Considerando que a permissividade elétrica é a combinação das permissividades elétricas individuais de seus constituintes e que o levantamento do estoque de carbono no solo da Flona de Cabedelo indica que a maior parte do carbono disponível no solo, cerca de 60%, é encontrada até uma profundidade de até 30 cm de profundidade [29], foi realizado com as amostras coletadas na profundidade 20-30cm de cada tipo de solo um ensaio de granulometria por peneiramento, para encontrar a distribuição dos diversos tamanhos de grãos.

O material depois de seco e desagregado foi colocado em um conjunto de cinco peneiras e agitado por 15 minutos (Figura 3.4). As peneiras são classificadas pelo tamanho de sua malha, conforme a Tabela 3.4, para padronizar os tamanhos dos grãos.



Figura 3.4: Processo de peneiramento do solo. Fonte: Autor.

Tabela 3.4: Peneiras utilizadas na obtenção das frações granulométricas e classificação do solo pela SiBCS [19].

Frações	PENEIRAS		Padrão SiBCS	
	n.º	Abertura da malha (mm)	Diâmetros (mm)	Nomenclatura
1	30	0,590	2-0,59	Areia Grossa - AG
2	50	0,297	0,59 - 0,297	Areia Média - AM
3	80	0,177	0,297 - 0,177	Areia Média - AM
4	100	0,149	0,177 - 0,149	Areia Fina -AF
5	200	0,074	0,149 - 0,074	Areia Fina -AF
6			< 0,074	Silte+Argila

Após a agitação, a quantidade de solo retida em cada peneira e no prato do fundo (fração de solo que passou por todas peneiras - fração 6) foi quantificada e testada para determinar a constante dielétrica e a tangente de perda de cada uma. Foram realizadas cinco medições das frações de solo retidas em cada peneira, 5 medições por amostra, totalizando 90 medições, 30 para cada tipo de solo.

3.4 Construção da Cavidade Ressonante

O método da perturbação da cavidade ressonante é baseado nas mudanças da frequência de ressonância e do fator de qualidade da cavidade quando uma amostra é inserida em seu interior. Exige que o volume da amostra seja muito pequeno em relação ao volume da cavidade, de modo que a distribuição de campo eletromagnético dentro da cavidade vazia mude levemente quando se insere a amostra. Não há na literatura um valor específico de quão pequeno deva ser o volume da amostra. Esta medida é conseguida com o auxílio de um software de simulação ou com a calibração da cavidade utilizando materiais de permissividades conhecidas. Neste contexto, uma cavidade ressonante retangular foi dimensionada para operar com um único modo de propagação em seu interior (TE_{101}) e trabalhar numa faixa de frequência, que proporcionasse manusear as amostras com facilidade.

Previamente a construção da cavidade, foram realizadas simulações utilizando o software *High Frequency Structure Simulator* (ANSYS HFSS), com o propósito de verificar a resposta da cavidade em relação a sua frequência de ressonância, em vazio e com materiais

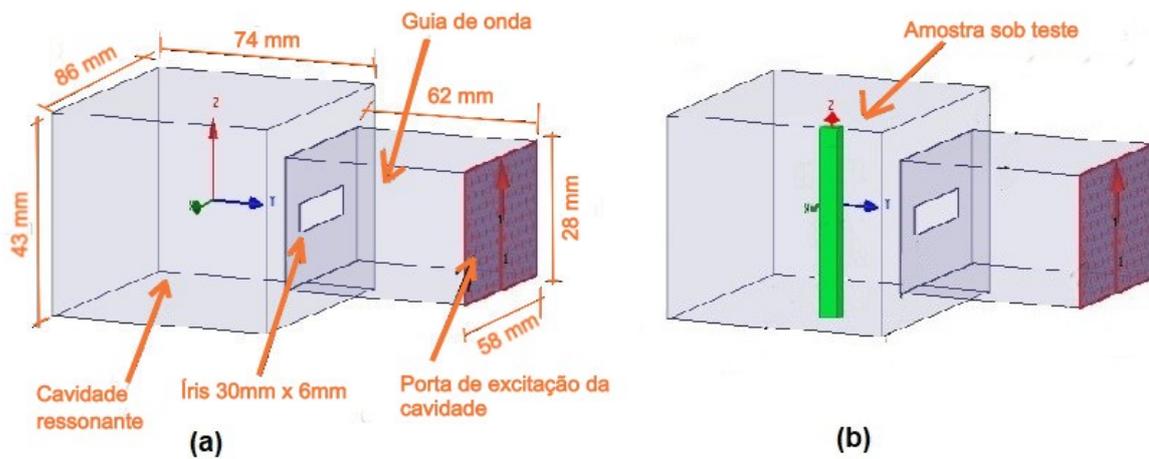


Figura 3.5: Simulação da cavidade ressonante. (a) vazia; (b) com material em seu interior. Fonte: Autor.

em seu interior. O leiaute e as dimensões da cavidade para a simulação são apresentados na Figura 3.5.

Na interface entre o corpo da cavidade e o guia de onda foi implementado uma abertura retangular, denominada íris, a fim de propiciar a eliminação de modos de propagação do guia de onda. A dimensão da íris foi otimizada para promover uma ressonância de 2,72GHz.

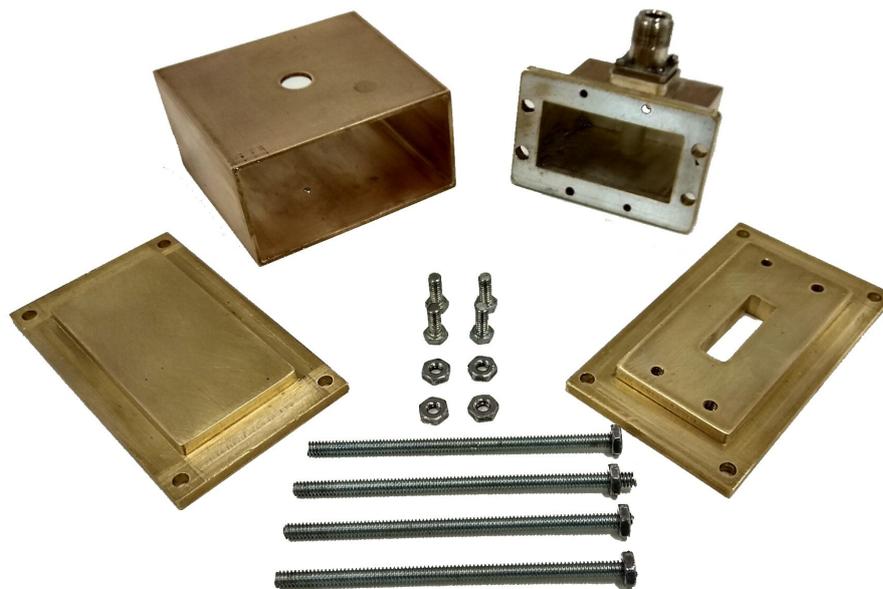


Figura 3.6: Cavidade ressonante desmontada. Fonte: Autor.

Três materiais foram usados como amostras de teste da cavidade: polytetrafluoro-

ethylene (teflon), poliéster e poliamida. Os dados eletromagnéticos desses materiais já constavam na biblioteca do software HFSS.

A cavidade foi construída com um perfil retangular de cobre, de dimensões 43mm x 86 mm x 74 mm, e chapa de espessura de 1,8 mm. As faces foram construídas a partir de uma barra chata de latão de espessura 9mm. As bordas das faces foram rebaixadas em 4mm de forma a promoverem um perfeito encaixe com o corpo da cavidade, e melhorar o fator Q (Figura 3.6).

A alimentação da cavidade se dá por meio de uma transição de guia de onda para cabo coaxial operando na banda L (1,4 a 3,6 GHz). Um orifício de 8 mm foi feito na parede superior da cavidade para possibilitar a inserção das amostras (Figura 3.7).

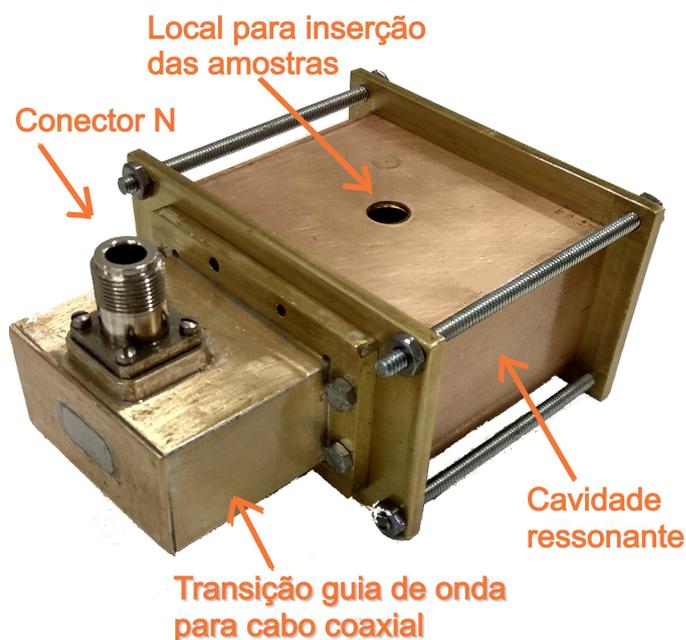


Figura 3.7: Cavidade ressonante montada. Fonte: Autor.

3.5 Calibração da Cavidade e Cálculo da Permissividade Elétrica

Com o propósito de evitar erros de medição relacionados a maior ou menor perturbação do campo eletromagnético dentro da cavidade, foi realizado com materiais de constante dielétrica e tangente de perdas conhecidas, uma calibração da mesma. Foram preparadas, dez amostras, todas com o mesmo volume ($0,1 \text{ cm}^3$), de misturas de vaselina industrial

e amaciante de roupas em proporções distintas. As medidas das permissividades elétricas dessas misturas foram conseguidas com o auxílio de um medidor de permissividade “sonda coaxial” e software comercial 85070, fabricação Agilent. De posse dos valores das permissividades das amostras foi possível calcular os coeficientes A e B das Equações 2.24 e 2.25, para uma faixa de permissividade de 2 a 15. Os valores médios de A e B foram de 0,888 e 0,711, respectivamente.



Figura 3.8: Microtubo Eppendorf 1,5 cm^3 . Fonte: Autor.

O recipiente escolhido para acondicionar as amostras no interior da cavidade foi o microtubo eppendorf (Figura 3.8), confeccionado em polipropileno, graduado, com tampa de pressão lisa e com capacidade de 1,5 cm^3 .

O procedimento de medição consistiu em inserir a amostra no interior da cavidade ressonante, e medir com o auxílio de um VNA, a variação da frequência de ressonância, por meio do parâmetro S_{11} , e do fator Q ocorrida em relação a cavidade em vazio (Figura 3.9). Considerou-se a cavidade em vazio, a cavidade com um microtubo eppendorf em seu interior, sem amostra. O VNA utilizado nas medições foi o de referência E5071C, do Fabricante Agilent.

O cálculo da parte real ϵ'_r e da parte imaginária ϵ''_r da permissividade elétrica é feita empregando as equações 3.1 e 3.2, com os valores dos coeficientes A e B obtidos na calibração.

$$\epsilon'_r = \frac{V_c(f_1 - f_2)}{AV_s f_2} + 1 \quad (3.1)$$

$$\epsilon''_r = \frac{V_c}{BV_s} \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} \right) \quad (3.2)$$

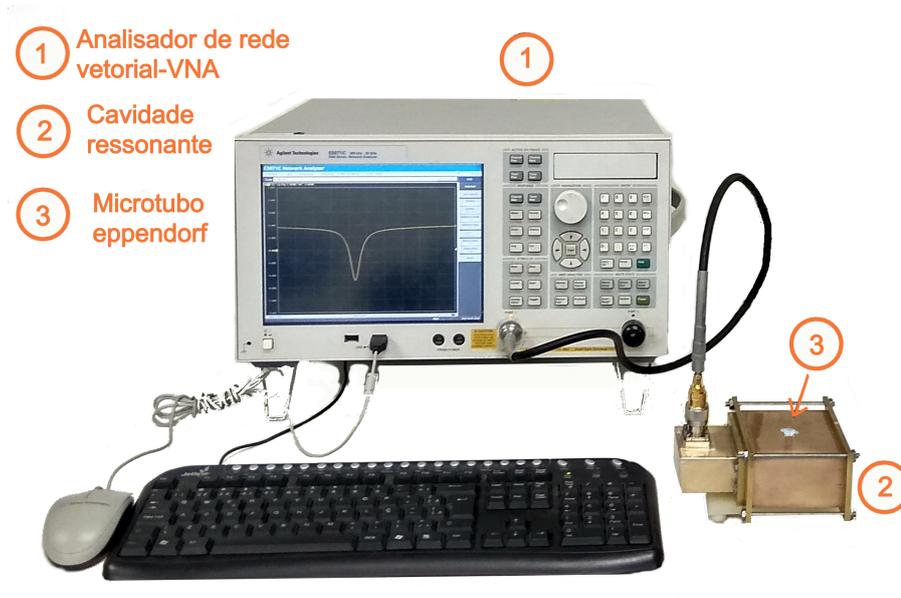


Figura 3.9: Esquema de montagem de equipamentos e materiais para medição. Fonte: Autor.

A cavidade ficou operando na frequência precisa de $f_1 = 2,722825$ GHz (Figura 3.10), com o fator de qualidade $Q_1 = 772,433$. e volume interno de $V_c = 275,501\text{cm}^3$.

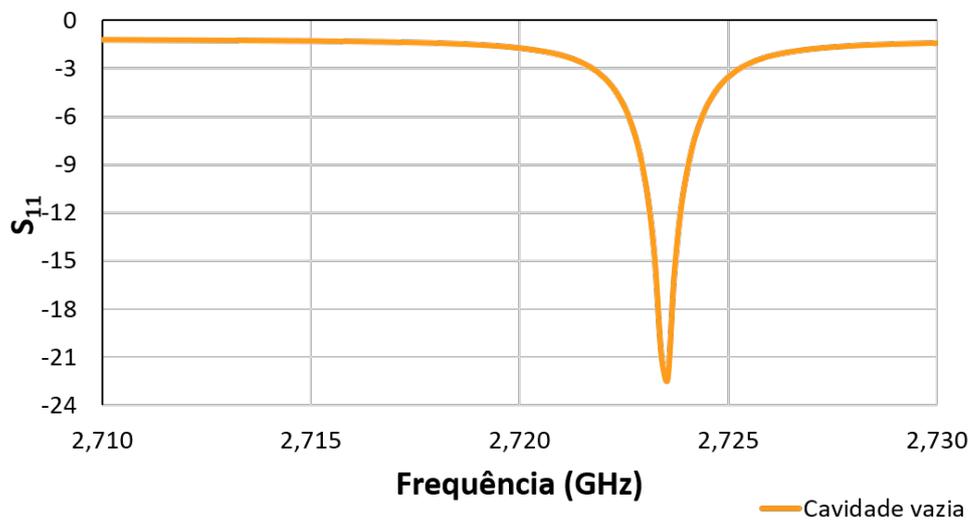


Figura 3.10: Frequência de ressonância da cavidade vazia. Fonte: Autor.

Em cada amostra coletada de solo foram realizadas várias medições, sem a reposição da fração medida a parte restante da amostra. Para os RQo foram realizadas cinco medições, já nos solos GZn e GJo seis medições em cada amostra. Ao todo foram realizadas 123 medições, sendo 75 para os Neossolos Quartzarênicos, 24 para os Gleissolos Sálícos e 24 para os Gleissolos Tiomórficos.

Para demonstração do processo de medição, o gráfico da Figura 3.11 apresenta a frequência de ressonância e o fator de qualidade Q de três amostras analisadas quando inseridas na cavidade, e a Tabela 3.5 os seus respectivos valores.

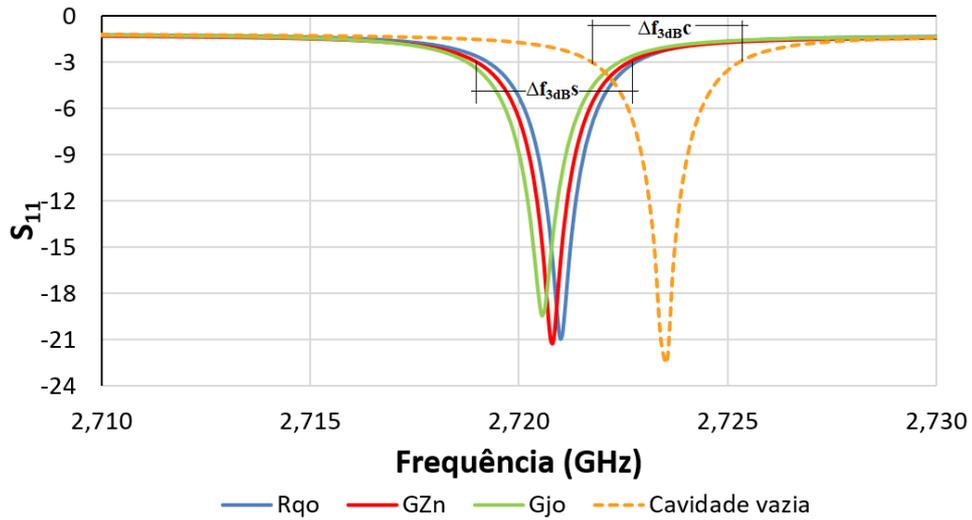


Figura 3.11: Frequência de ressonância e do fator Q de amostras de solos quando inseridas na cavidade. Fonte: Autor.

Tabela 3.5: Dados das medições de amostras de solo.

Tipo de Solo	Amostra	Profundidade	Frequência Ressonância (GHz)	Δf_{3dB^C} (MHz)	Δf_{3dB^S} (MHz)	Q_1	Q_2
RQo	3	0-10	2,7221000	3,525	3,5625	772,4326	763,7895
GJo	5	20 -30	2,7205500	3,525	3,6750	772,4326	740,2857
GZn	6	30-40	2,7208125	3,525	3,6375	772,4326	747,9897

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Permissividade nas Massas de Solos

As medições da constante dielétrica e da tangente de perda para as amostras coletadas foram feitas com o auxílio da cavidade ressonante construída, na frequência de 2,72 GHz, em um ambiente controlado de umidade e a uma temperatura de 24° C. Previamente a medição, todas as amostras foram deixadas expostas ao ar livre para a eliminação de sua umidade.

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios da constante dielétrica e tangente de perdas, com seus respectivos desvios padrões, medidos para as diferentes profundidades dos Neossolos Quatzarênicos.

Tabela 4.1: Constante dielétrica e tangente de perdas do Neossolo Quatzarênico, em diferentes profundidades.

Profundidade (cm)	Desv. Padrão		Desv. Padrão	
	ϵ_r'	ϵ_r'	$\tan \delta$	$\tan \delta$
0 _ 10	3,43	0,21	0,01462	0,00555
10 _ 20	3,41	0,19	0,01177	0,00779
20 _ 30	3,41	0,15	0,00323	0,00553
30 _ 50	3,40	0,13	0,00113	0,00002
50 _ 100	3,41	0,12	0,00113	0,00002

A constante dielétrica não apresentou variação substancial com a profundidade. Esse resultado é compatível com a uniformidade do solo trabalhado, composto basicamente de areia de quartzo.

Os valores da tangente de perdas estão relacionados com a quantidade de matéria orgânica encontrada no solo, uma vez que, resíduos de matéria orgânica aumentam a perda dielétrica do solo. Os maiores valores da tangente de perdas foram nas camadas até 20cm de profundidade, precisamente onde está a maior concentração de material orgânico e carbono estocado. Para uma melhor observação, a Figura 4.1 apresenta o gráfico relacionando a tangente de perdas obtida nas medições com os dados de carbono orgânico estocado no solo, expostos na Tabela 3.1.

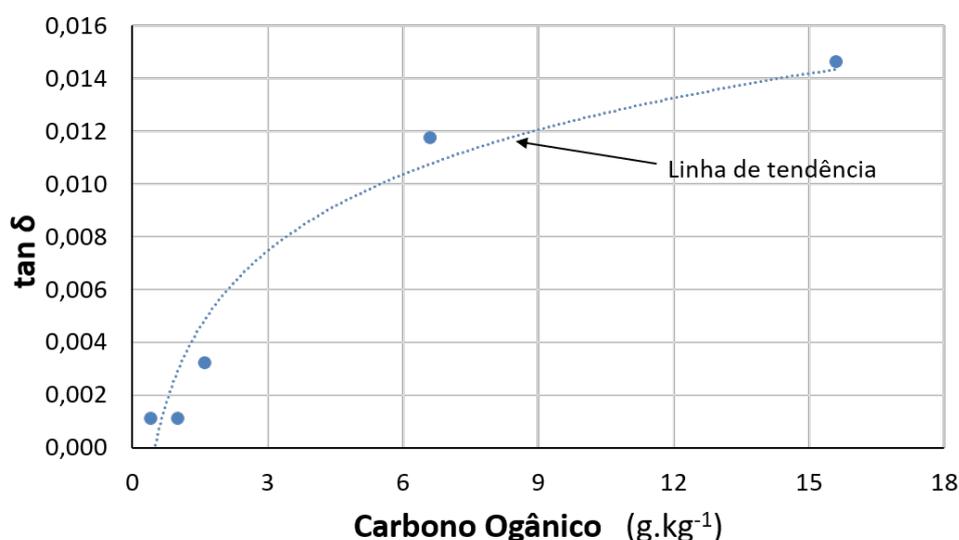


Figura 4.1: Gráfico $\tan \delta \times$ carbono orgânico estocado no Neossolo Quartzarênico. Fonte: Autor

Os valores médios da constante dielétrica e tangente de perdas, medidos para as diferentes profundidades, dos Gleissolos Sálícos e Gleissolos Tiomórficos são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2: Constante dielétrica e tangente de perdas do Gleissolo Sálíco, em diferentes profundidades.

Profundidade (cm)	ϵ_r'	Desv. Padrão ϵ_r'	$\tan \delta$	Desv. Padrão $\tan \delta$
0 _ 20	3,42	0,13	0,03751	0,00779
20 _ 30	3,47	0,19	0,05018	0,00828
30 _ 40	3,36	0,07	0,04621	0,00675
40 _ 50	3,24	0,09	0,13553	0,00638

Os Gleissolos Sálícos e Tiomórficos, também, não exibiram variação significativa da constante dielétrica com a profundidade. Constata-se que a constante dielétrica não é

Tabela 4.3: Constante dielétrica e tangente de perdas do Gleissolo Tiomórfico, em diferentes profundidades.

Profundidade (cm)	ϵ_r'	Desv. Padrão ϵ_r'	$\tan \delta$	Desv. Padrão $\tan \delta$
0 _ 20	3,33	0,11	0,07882	0,01317
20 _ 30	3,47	0,08	0,06265	0,00146
30 _ 40	3,29	0,10	0,08773	0,00784
40 _ 50	3,16	0,19	0,09707	0,00952

bom parâmetro para diferenciar os tipos de solos analisados, tendo em vista não haver grandes discrepâncias entre os valores determinados. A Figura 4.2 apresenta o gráfico dos valores da constante dielétrica expostos nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

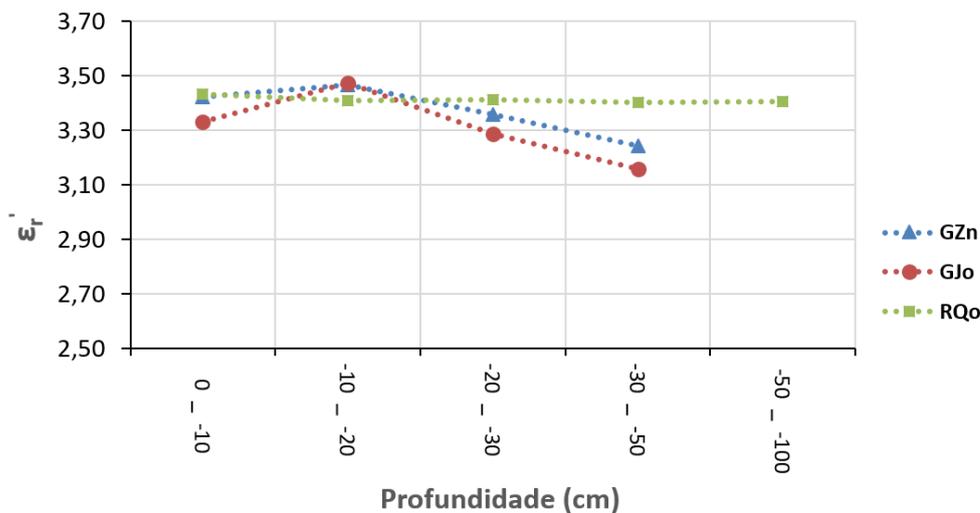


Figura 4.2: Comportamento de ϵ_r' dos solos RQo, GZn e GJo com a profundidade. Fonte: Autor

Em relação as tangente de perdas dos solos GZn e GJo, verifica-se que seus maiores valores ocorreram nas camadas mais profundas, condizendo com as informações apresentadas nas Tabelas 4.2 e 4.3, em referência ao maior estoque de carbono orgânico. Comparado com Neossolo Quartzarênico, estes possuem maiores valores de tangente de perdas, possivelmente pelo maior teor de sais (GZn) e compostos de enxofre (GJo). Cada tipo de solo apresentou uma variação distinta do valor da $\tan \delta$ com a profundidade, como pode ser melhor observado na Figura 4.3.

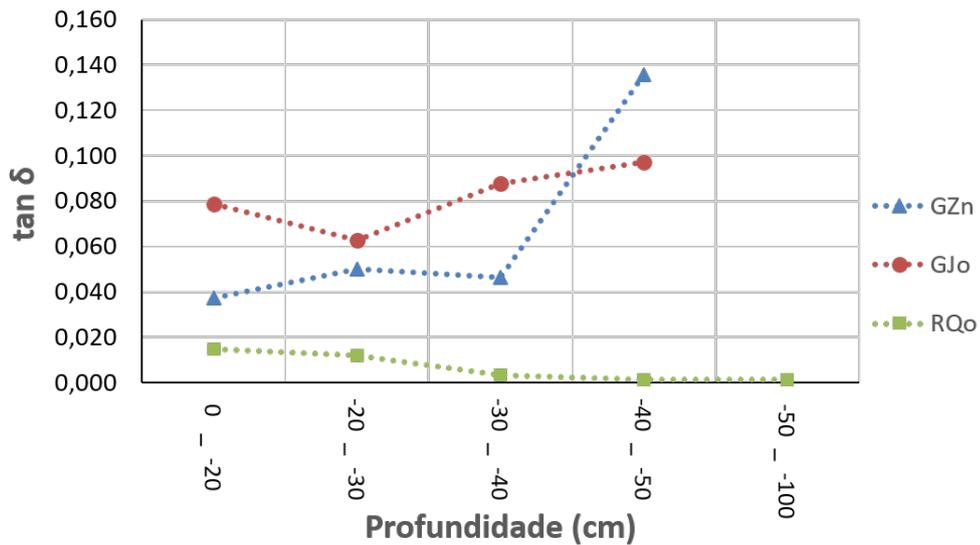


Figura 4.3: Comportamento da $\tan \delta$ dos solos RQo, GZn e GJo com a profundidade. Fonte: Autor

4.2 Permissividade nas Frações Granulométricas dos Solos

As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os resultados da constante dielétrica e tangente de perdas dos Neossolos Quartzarênicos, Gleissolos Sálícos e Gleissolos Tiomórficos, respectivamente, após separação das frações granulométricas das amostras coletadas na profundidade 20-30cm.

Tabela 4.4: Constante dielétrica e tangente de perdas dos Neossolos Quartzarênico, em função frações granulométricas.

Frações	Diâmetros (mm)	% de massa de solo retido na peneira	ϵ_r'	Desv. Padrão ϵ_r'	$\tan \delta$	Desv. Padrão $\tan \delta$
1	2-0,59	1,76%	3,41	0,00038	0,00113	0,00004
2	0,59 - 0,297	43,64%	3,59	0,00014	0,00116	0,00001
3	0,297 - 0,177	49,71%	3,66	0,00015	0,00117	0,00001
4	0,177 - 0,149	2,71%	3,72	0,00006	0,00117	0,00000
5	0,149 - 0,074	2,06%	3,99	0,00021	0,00120	0,00001
6	< 0,074	0,13%	3,09	0,00000	0,07011	0,00000

Mesmo com constituições distintas, os solos estudados não apresentam diferenças importantes da constante dielétrica nas diferentes frações, como pode ser melhor observado no gráfico da Figura 4.4. Nota-se um pequeno aumento na constante dielétrica à medida

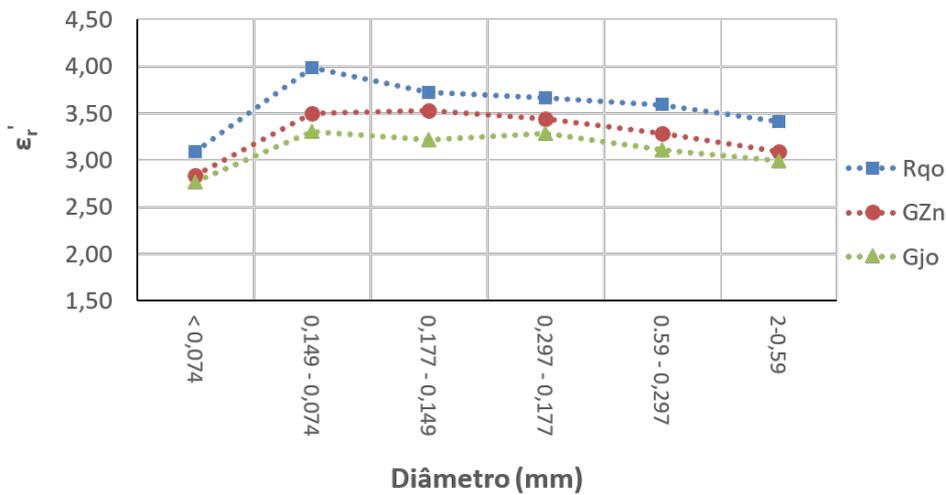


Figura 4.4: Comportamento de ϵ_r' em relação ao diâmetro dos solos RQo, GZn e GJo. Fonte: Autor.

que o tamanho do grão se torna menor, o que é um valor esperado, pois a redução no diâmetro aumenta a compactação do material, e diminui o ar entre os grãos. Todavia, nas frações 6 (silte+argila) esse comportamento foi contrário.

Tabela 4.5: Constante dielétrica e tangente de perdas dos Gleissolos Sáfico, em função frações granulométricas.

Frações	Diâmetros (mm)	% de massa de solo retido na peneira	ϵ_r'	Desv. Padrão ϵ_r'	$\tan \delta$	Desv. Padrão $\tan \delta$
1	2-0,59	6,73%	3,09	0,00020	0,00109	0,00002
2	0,59 - 0,297	41,41%	3,28	0,00004	0,00112	0,00000
3	0,297 - 0,177	40,46%	3,44	0,00011	0,01667	0,00030
4	0,177 - 0,149	5,45%	3,53	0,00006	0,01627	0,00015
5	0,149 - 0,074	5,64%	3,50	0,00011	0,01641	0,00028
6	< 0,074	0,30%	2,84	0,00012	0,07639	0,00191

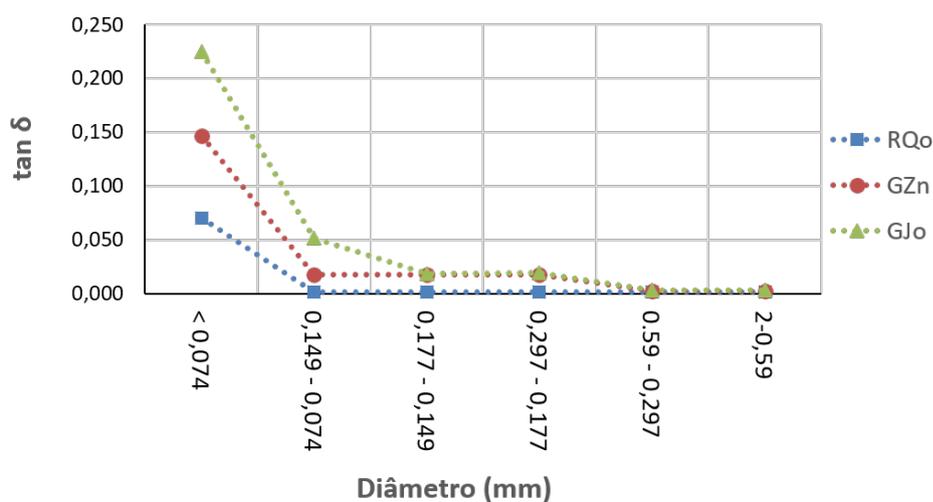
Para o Neossolo Quartzarênico, mostrado na Tabela 4.4, observar-se que a tangente de perdas não alterou seu valor significativamente até a fração 5 (0,149 - 0,074 mm), indicando que todas as amostras são compostas do mesmo material, neste caso, quartzo. Por outro lado, para a fração 6 (silte+argila), que neste caso representa cerca de 0,13% do solo total, o valor da tangente de perdas é bastante alto, em comparação aos das outras frações.

O comportamento dos valores da tangente de perdas nas frações granulométricas dos

Tabela 4.6: Constante dielétrica e tangente de perdas do Gleissolos Tiomórfico, em função frações granulométricas..

Frações	Diâmetros (mm)	% de massa de solo retido na peneira	ϵ_r'	Desv. Padrão ϵ_r'	$\tan \delta$	Desv. Padrão $\tan \delta$
1	2-0,59	9,60%	2,99	0,00004	0,00107	0,00000
2	0,59 - 0,297	29,51%	3,11	0,00009	0,00109	0,00001
3	0,297 - 0,177	39,14%	3,28	0,00013	0,00112	0,00001
4	0,177 - 0,149	5,70%	3,21	0,00013	0,00111	0,00001
5	0,149 - 0,074	12,78%	3,31	0,00022	0,03343	0,00128
6	< 0,074	3,28%	2,78	0,00015	0,07803	0,00239

Gleissolos Sálidos e Gleissolos Tiomórficos, mostrados nas Tabelas 9 e 10, são distintos entre si e entre o RQo. A característica comum entre os três tipos de solos é o maior valor da $\tan \delta$ nas frações 6 (silte+argila), como pode ser melhor verificado na Figura 4.5.

Figura 4.5: Comportamento da $\tan \delta \times$ em relação ao diâmetro do grãos dos solos RQo, GZn e GJo. Fonte: Autor.

As frações 6 (silte+argila) apresentaram menores valores da constante dielétrica e maiores valores de $\tan \delta$, indicando que os constituintes destas porções são diferentes das demais frações, para cada solo analisado.

Capítulo 5

Conclusão

Este trabalho utilizou a metodologia perturbação da cavidade ressonante para determinação da permissividade complexa relativa dos solos representativos da Flona de Cabedelo (Neossolos Quartzarênicos, Gleissolos Sálícos e Gleissolos Tiomórficos). Para a realização das medições, foi construída uma cavidade ressonante retangular, operando no modo TE_{101} , na frequência de 2,72GHz. A calibração da cavidade foi realizada com 10 amostras de valores de permissividade elétricas conhecidas, com o auxílio de um medidor sonda coaxial e software comercial 85070, fabricação Agilent. As amostras dos Neossolos Quartzarênicos foram coletas a uma profundidade de até 100 cm, e os Gleissolos Sálícos e Tiomórficos a uma profundidade de até 50 cm, devida a baixa profundidade do lençol freático. As propriedades físico-químicas dos diferentes tipos de solos analisados foram relacionadas com os resultados da constante dielétrica e tangente de perdas obtidos. As principais conclusões foram:

- A cavidade ressonante construída tem uma estrutura bastante robusta, boa estabilidade nas medições e alta sensibilidade, conseguiu uma atenuação de frequência de ressonância em torno de 22 dB (mesmo com um microtubo eppendorf sem amostra em seu interior – situação em vazio) e um bom fator de qualidade. Para a faixa de calibração adotada (valores de permissividade 2 a 15 com o volume da amostra em $0,1\text{cm}^3$), apresentou facilidade na preparação das amostras granuladas trabalhadas.
- Os resultados da constante dielétrica dos três tipos de solos estudados não apresentaram variações relevantes com a profundidade, nem entre eles, indicando que a maior parte da constituição desses solos é composta do mesmo material.

- A tangente de perdas dos Neossolos Quartzarênicos exibiu maior valor nas camadas superficiais, onde há maior estoque de carbono, e decresceu com a profundidade. Os valores da tangente de perdas dos Gleissolos Sálícos e Tiomórficos embora superiores aos dos RQo, devido ao alto teor de sais (GZn) e compostos de enxofre (GJo), também apresentaram maiores valores nas camadas onde há maior armazenamento de carbono. Fato que sugere a determinação do carbono armazenado a partir da medição da tangente de perdas.
- O fracionamento granulométrico realizado expôs que a constante dielétrica para os diferentes tamanhos de grãos analisados, dos três solos, não apresentou variação considerável. Já a tangente de perdas exibiu comportamento distinto para cada tipo de solo, além de maiores valores nas frações de solo correspondentes a “silte+argila”, indicando ser um bom parâmetro de análise.
- Por fim, os resultados obtidos no presente trabalho denotam que o método da perturbação da cavidade é eficiente na medição de materiais granulados e que a caracterização eletromagnética é um instrumento importante na definição de solos, permitindo identificar sua composição e o carbono armazenado.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar a análise mineralógica e química das frações de solos obtidas com o ensaio granulométrico e correlacionar com a caracterização eletromagnética.
- Realizar a caracterização eletromagnética em um maior número de pontos amostrais, na Flona de Cabedelo, com a finalidade de confirmar padrões.
- Construir um banco de dados com a caracterização eletromagnética dos solos da Paraíba, a fim de orientar o desenvolvimento de novas pesquisas.

Referências Bibliográficas

- [1] W. Frikha, S. Kawamura, and W.-C. Liao, *New Developments in Soil Characterization and Soil Stability: Proceedings of the 5th GeoChina International Conference 2018–Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes: From Failure to Sustainability, held on July 23 to 25, 2018 in HangZhou, China*. Springer, 2018.
- [2] L. M. PARRON, J. R. GARCIA, E. de Oliveira, G. Brown, and R. B. PRADO, “Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma mata atlântica.,” *Embrapa Florestas-Livro científico (ALICE)*, 2015.
- [3] M. Dhiware, S. Nahire, and S. Deshmukh, “Dielectric study of soil at x band microwave frequency and physiochemical properties,” *International Journal of Engineering and Techniques - Volume 4*, 2018.
- [4] L. A. Pozdnyakova, *Electrical properties of soils*. University of Wyoming, 1999.
- [5] F. Batista, “Caracterização numérica e experimental de materiais dielétricos sólidos através dos parâmetros de espalhamento,” Master’s thesis, 2017.
- [6] E. Andrade, “Estudo da espectroscopia dielétrica da manga tommy na faixa de microondas,” Master’s thesis, 2018.
- [7] A. P. Costa, J. G. S. Gomes, J. N. Carvalho, M. A. Oliveira, and J. G. O. Mariano, *Caracterização das Propriedades Dielétricas do Mamão Papaia*. MOMAG2016. Porto Alegre, 2016.
- [8] M. Sadiku, *Elementos de Eletromagnetismo*. Bookman, 2006.
- [9] J. Raymond A. Serway y John W. Jewett, *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna, Vol.2*. Editora:Abril Vega Orozco, 2008.

- [10] A. A. Note, “Agilent basics of measuring the dielectric properties of materials,” *Agilent Literature Number*, 2006.
- [11] S. M. Wentworth, *Eletromagnetismo aplicado: abordagem antecipada das linhas de transmissão*. Bookman Editora, 2009.
- [12] H. Packard, “S-parameter design,” tech. rep., Application Note 154, 1972.
- [13] R. E. Schwarz, “R e s zvl vector network analyzer quick start guide,” tech. rep., 1998.
- [14] L.-F. Chen, C. Ong, C. Neo, V. Varadan, and V. K. Varadan, *Microwave electronics: measurement and materials characterization*. John Wiley & Sons, 2004.
- [15] M. T. Khan and S. M. Ali, “A brief review of measuring techniques for characterization of dielectric materials,” *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, 2012.
- [16] R. E. Schwarz, “Measurement of dielectric - rohde e schwarz - application note-rac0607-0019,” tech. rep., 2012.
- [17] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [18] L. Chen, C. Ong, and B. Tan, “Amendment of cavity perturbation method for permittivity measurement of extremely low-loss dielectrics,” *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 48, no. 6, pp. 1031–1037, 1999.
- [19] E. Solos, “Sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS),” *Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro*, 2018.
- [20] L. M. PARRON, J. R. GARCIA, E. de Oliveira, G. Brown, and R. B. PRADO, “Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma mata atlântica,” *Embrapa Florestas-Livro científico (ALICE)*, 2015.
- [21] N. C. Brady and R. R. Weil, *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. Bookman Editora, 2009.
- [22] J. Tavares Filho, *Física e conservação do solo e água*. SciELO-EDUEL, 2016.
- [23] I. F. Lepsch, *Formação e conservação dos solos*. Oficina de textos, 2016.

- [24] N. Munk, “Inclusão dos serviços ecossistêmicos na avaliação ambiental estratégica,” *Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2015.
- [25] M. dos Santos Monteiro, *Serviços Ecossistêmicos e Planejamento Urbano: A Natureza a Favor do Desenvolvimento Sustentável das Cidades*. Editora Appris, 2018.
- [26] S. F. Brasileiro, “Florestas do brasil em resumo-2013: dados de 2007-2012,” *Brasília: SFB*, 2013.
- [27] J. L. N. Carvalho, J. C. Avanzi, M. L. N. Silva, C. R. d. Mello, and C. E. P. Cerri, “Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do brasil,” *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 34, no. 2, pp. 277–290, 2010.
- [28] P. L. d. A. Machado, “Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global,” *Química Nova*, vol. 28, no. 2, pp. 329–334, 2005.
- [29] M. Coelho, A. D’Andrea, O. da Silva, G. d. M. Vasques, and A. de Oliveira, “Levantamento pedológico detalhado (escala 1: 5.000) e estoque de carbono orgânico do solo da Floresta Nacional Restinga de Cabedelo, municípios Cabedelo e João Pessoa, PB.,” *Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)*, 2017.