



*UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA*

*Emanoel Pereira Elias*

**Caracterização de Materiais com Baixa Condutividade e Não Magnéticos para  
Aplicações em Sistemas de Aterramento**

*Florianópolis  
2024*

*Emanoel Pereira Elias*

**Caracterização de Materiais com Baixa Condutividade e Não Magnéticos para Aplicações em Sistemas de Aterramento**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.*

*Orientador(a): Prof. Adroaldo Raizer, Dr.*

*Florianópolis*

*2024*

Elias, Emanuel Pereira

Caracterização de Materiais com Baixa Condutividade e Não Magnéticos para Aplicações em Sistemas de Atenuação de Ruído  
Orientado por Emanuel Pereira Elias ; orientador, Adroaldo Raizer, 2024.

85 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Caracterização eletromagnética de materiais. 3. Condutividade elétrica. 4. Permissividade elétrica. 5. Medição com sonda coaxial.  
I. Raizer, Adroaldo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

*Emanoel Pereira Elias*

**Caracterização de Materiais com Baixa Condutividade e Não Magnéticos para Aplicações em Sistemas de Aterramento**

*O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 16 de abril 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:*

*Prof. Carlos Renato Rambo, Dr.*

*Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)*

*Prof. Lionel Pichon, Dr.*

*Centre National de la Recherche Scientifique - Génie électrique et électronique de Paris (CNRS-GeePs)*

*Prof. Mauricio Valência Ferreira da Luz, Dr.*

*Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)*

*Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.*

*Insira neste espaço a assinatura digital*

*Coordenação do Programa de Pós-Graduação*

*Insira neste espaço a assinatura digital*

*Prof. Adroaldo Raizer, Dr.*

*Orientador*

*Florianópolis, 2024.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço a Deus pela minha saúde e pelas boas oportunidades presentes em minha vida. Sou grato pelo apoio incondicional que recebi dos meus pais, Paulo Roberto Elias e Maria Verônica Pereira Elias, das minhas irmãs Paula, Patrícia e Juliana, e de outros familiares durante o período de estudo.*

*Expresso minha gratidão e admiração ao Prof. Adroaldo Raizer. Sua orientação, conselhos e ensinamentos foram fundamentais e contribuíram muito para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e profissional.*

*Agradeço a todos os colegas do Maglab (Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética) e do Gemco (Grupo de Engenharia em Compatibilidade Eletromagnética) pelo auxílio, companheirismo e amizade, especialmente aos colegas Dalton e Taiane.*

*Também sou grato à UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) e ao Maglab pela infraestrutura e recursos necessários para desenvolver este estudo, bem como ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro prestado.*

*Por fim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho e na minha formação acadêmica.*

*“O cavalo encilhado não passa duas vezes”. (Provérbio gaúcho)*

## RESUMO

*Este trabalho relata a aplicação de métodos de medição para obter os parâmetros de condutividade e permissividade elétrica de materiais com baixa condutividade e não magnéticos visando aplicações em sistemas de aterramento. Os parâmetros são obtidos de acordo com a resposta da amostra do material quando submetido a um sinal eletromagnético. No primeiro método, é utilizado um conjunto de antenas e um analisador de rede vetorial para medir os parâmetros de reflexão e transmissão das amostras no intervalo de frequências de 100 kHz até 20 MHz. No segundo método, é utilizada uma sonda coaxial com terminação aberta em conjunto com uma ponte RLC para medir a impedância das amostras na faixa de frequência de 20 Hz até 90 kHz. Ao analisar os resultados preliminares obtidos pelos métodos de medição, decidiu-se dar ênfase nos ensaios com a sonda coaxial. Assim, a sonda coaxial foi caracterizada por meio de um circuito equivalente, o qual é utilizado juntamente com um modelo matemático para estimar os parâmetros de condutividade e permissividade das amostras com base nas medidas de impedância. Um modelo de simulação da sonda coaxial é elaborado com método dos elementos finitos (MEF) na tentativa de fazer a comparação com os ensaios de medição.*

**Palavras-chave:** *Caracterização eletromagnética de materiais; Condutividade elétrica; Permissividade elétrica; Medição no espaço livre; Medição com sonda coaxial; Simulação da sonda coaxial.*

## ABSTRACT

*This work describes the application of measurement methods to obtain the conductivity and electrical permittivity parameters of materials with low conductivity and non-magnetic properties, aiming at applications in grounding systems. The parameters are obtained based on the response of the material sample when subjected to an electromagnetic signal. In the first method, a set of antennas and a vector network analyzer are used to measure the reflection and transmission parameters of the samples in the frequency range from 100 kHz to 20 MHz. In the second method, an open-ended coaxial probe is used in conjunction with an RLC bridge to measure the impedance of the samples in the frequency range from 20 Hz to 90 kHz. Upon analyzing the preliminary results obtained by the measurement methods, it was decided to emphasize the tests with the coaxial probe. Thus, the coaxial probe was characterized through an equivalent circuit, which is used along with a mathematical model to estimate the conductivity and permittivity parameters of the samples based on impedance measurements. A simulation model of the coaxial probe is developed using the Finite Element Method (FEM) to compare with the measurement tests.*

**Keywords:** *Electromagnetic characterization of materials; Electrical conductivity; Electrical permittivity; Free-space measurement; Measurement with coaxial probe; Coaxial probe simulation.*



## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Valores de condutividade do solo pela frequência obtidos a partir de modelos empíricos</i> .....	22
<i>Figura 2 – Valores de permissividade relativa do solo pela frequência obtidos a partir de modelos empíricos</i> .....	23
<i>Figura 3 – Condutividade do papel e da madeira com diferentes densidades pela frequência</i> .....	23
<i>Figura 4 – Permissividade elétrica do papel e da madeira com diferentes densidades pela frequência</i> .....	24
<i>Figura 5 – Representação de um sistema linear de 2 portas</i> .....	25
<i>Figura 6 – Analisador de rede vetorial R&amp;S ZBN4</i> .....	29
<i>Figura 7 – Ponte RLC R&amp;S HAMEG HM8118</i> .....	30
<i>Figura 8 – Cabos R&amp;S HZ184 com ponta de testes Kelvin. (a) O par de cabos utilizados. (b) Detalhe dos conectores BNC</i> .....	31
<i>Figura 9 – Antena R&amp;S HE200 de 10 kHz até 20 MHz</i> .....	31
<i>Figura 10 – Sonda coaxial de terminação aberta do Maglab. (a) Vista superior. (b) Vista inferior. (c) Vista frontal</i> .....	32
<i>Figura 11 – Dimensões da Sonda coaxial do Maglab (dimensões em mm)</i> .	33
<i>Figura 12 – Esquemático do método de reflexão com uma antena utilizado para caracterizar materiais dielétricos</i> .....	34
<i>Figura 13 – Esquemático do método de transmissão com antenas utilizado para caracterizar materiais dielétricos</i> .....	35
<i>Figura 14 – Circuito equivalente da sonda coaxial em contato com uma amostra de material dielétrico</i> .....	38
<i>Figura 15 – Circuito equivalente da sonda coaxial em um ensaio de circuito aberto</i> .....	41
<i>Figura 16 – Circuito equivalente da sonda coaxial em um ensaio de curto-circuito</i> .....	43
<i>Figura 17 – Procedimento experimental para modelar a sonda</i> .....	44
<i>Figura 18 – Ensaio de circuito aberto com a sonda coaxial e a HAMEG HM8118</i> .....	44
<i>Figura 19 – Ensaio de curto-circuito com a sonda coaxial e a HAMEG HM8118. (a) Parafusos e chapa de metal utilizados. (b) Ensaio de curto-circuito</i> .....	45

Figura 20 – Procedimento experimental para levantar os parâmetros dos materiais.....	45
Figura 21 – Materiais dielétricos utilizados nas amostras. (a) Papel. (b) Madeira pinus. (c) Areia de construção seca. (d) Terra de plantio úmida. (e) Argila úmida. (f) Cimento.....	46
Figura 22 – Procedimento para modelar a sonda por simulação .....	48
Figura 23 – Dimensões do modelo em CAD da sonda coaxial do Maglab (dimensões em mm).....	49
Figura 24 – Modelo de simulação da sonda coaxial com terminação aberta montado no ANSYS HFSS. (a) Região de análise da simulação. (b) Modelo da sonda simulado.....	50
Figura 25 – Condições de contorno. (a) Excitação. (b) Modelo da sonda simulado.....	51
Figura 26 – Simulação para caracterizar o modelo da sonda. (a) Circuito aberto. (b) Curto-circuito .....	52
Figura 27 – Procedimento para caracterizar uma amostra por simulação....	53
Figura 28 – Modelo de simulação da sonda com amostra .....	53
Figura 29 – Parâmetro de reflexão medido nas frequências de 100 kHz até 20 MHz.....	55
Figura 30 – Parâmetro de transmissão medido nas frequências de 100 kHz até 20 MHz.....	56
Figura 31 – Magnitude e fase da impedância de circuito aberto da sonda coaxial de 20 Hz até 4,5 GHz (escala logarítmica).....	57
Figura 32 – Impedância de circuito aberto da sonda coaxial de 1 GHz até 4,5 GHz. (a) Magnitude e fase. (b) Resistência e reatância.....	57
Figura 33 – Resistência da sonda coaxial de 20 Hz até 100 Hz.....	58
Figura 34 – Capacitância e indutância da sonda em circuito aberto para as frequências de 20 Hz até 90 kHz .....	59
Figura 35 – Circuito equivalente da sonda coaxial em circuito aberto obtido por medição.....	60
Figura 36 – Valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidos a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz. (a) Papel. (b) Madeira. ....	61
Figura 37 – Comparação das propriedades dielétricas do papel medidas para	

20 Hz até 90 kHz com os valores obtidos por [19]. (a) Condutividade. (b) Permissividade elétrica relativa .....	62
Figura 38 – Comparação das propriedades dielétricas da madeira de pinus medidas para 20 Hz até 90 kHz com os valores obtidos por [19]. (a) Condutividade. (b) Permissividade elétrica relativa.....	63
Figura 39 – Valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidas a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz. (a) Areia. (b) Terra. (c) Argila. (d) Cimento.....	64
Figura 40 – Malha de elementos finitos gerada na simulação da sonda em curto-circuito. (a) Sonda. (b) Superfície inferior da sonda. (c) Região de análise .....	66
Figura 41 – Impedância de circuito aberto da sonda coaxial de 20 Hz até 4,5 GHz obtida por simulação e por medição (escala logarítmica). (a) Magnitude. (b) Fase. ....	68
Figura 42 – Resistência e reatância de circuito aberto da sonda coaxial de 1 GHz até 4,5 GHz obtida por simulação .....	69
Figura 43 – Resistência de curto-circuito da sonda coaxial de 20 Hz até 100 Hz obtida por simulação e por medição .....	69
Figura 44 – Circuito equivalente da sonda coaxial em circuito aberto obtido por simulação .....	70
Figura 45 – Condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidas de uma amostra simulada para as frequências de 20 Hz até 100 kHz .....	70
Figura 46 – Valores de condutividade elétrica obtidos a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz .....	88
Figura 47 – Valores de permissividade elétrica relativa obtidos a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz.....	88
Figura 48 – Carga de RF padronizada do Maglab.....	89
Figura 49 – Cabo coaxial usado no processo de medição. (a) Foto do cabo coaxial. (b) Detalhe do conector tipo N .....	90
Figura 50 – Magnitude da impedância de entrada medida do cabo coaxial LU7-259-1200 .....	91
Figura 51 – Magnitude do parâmetro de reflexão medido do cabo coaxial LU7-259-1200 .....	91
Figura 52 – Magnitude do parâmetro de transmissão medido do cabo coaxial LU7-259-1200 .....	92

<i>Figura 53 – Janela do software Hameg 8118 Control Program.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 54 – Compensação em circuito aberto da HAMEG HM8118.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 55 – Compensação em curto-circuito da HAMEG HM8118.....</i>	<i>94</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Condutividade de algumas amostras de solo no Brasil em relação a umidade.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2 – Modelos empíricos utilizados para representar o comportamento eletromagnético do solo .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 3 – Classificação dos métodos utilizados para caracterizar os materiais .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 4 – Especificações técnicas do VNA R&amp;S ZBN4.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 5 – Especificações técnicas da ponte RLC R&amp;S HAMEG HM8118..</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 6 – Especificações técnicas do cabo R&amp;S HZ184.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 7 – Especificações técnicas das antenas R&amp;S HE200.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 8 – Descrição das amostras com detalhes.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 9 – Propriedades dos materiais consideradas no modelo de simulação .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 10 – Detalhes sobre as simulações executadas.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 11 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de papel .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 12 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de madeira .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 13 - Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de areia</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 14 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de terra</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 15 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de argila .....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 16 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de cimento .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 17 – Características do cabo coaxial Rosenberger LU7-259-1200... </i>	<i>90</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	<i>ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</i> .....	16
<b>2</b>	<b>CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b> .....	<b>17</b>
2.1	<i>CARACTERÍSTICAS ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS PARA ENGENHARIA ELÉTRICA</i> .....	17
2.2	<i>MATERIAIS DIELÉTRICOS COM PERDAS</i> .....	18
2.3	<i>PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DO SOLO E DE ALGUNS MATERIAIS DE REFERÊNCIA</i> .....	20
2.4	<i>MODELOS MATRICIAIS</i> .....	24
2.5	<i>MÉTODOS UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS DIELÉTRICOS</i> .....	26
2.6	<i>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</i> .....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>28</b>
3.1	<i>EQUIPAMENTOS DO MAGLAB</i> .....	28
3.1.1	<b>Analisador de rede vetorial</b> .....	<b>28</b>
3.1.2	<b>Ponte RLC</b> .....	<b>29</b>
3.1.3	<b>Conjunto de antenas</b> .....	<b>31</b>
3.1.4	<b>Sonda coaxial</b> .....	<b>32</b>
3.2	<i>CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COM ANTENAS</i> .....	33
3.2.1	<b>Método por reflexão</b> .....	<b>34</b>
3.2.2	<b>Método por transmissão</b> .....	<b>35</b>
3.2.3	<b>Procedimento experimental para obter os parâmetros dos materiais com antenas</b> .....	<b>37</b>
3.3	<i>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COM SONDA COAXIAL</i> .....	37
3.3.1	<b>Modelagem da sonda coaxial por circuito equivalente</b> .....	<b>38</b>
3.3.1.1	<i>Ensaio de circuito aberto</i> .....	40
3.3.1.2	<i>Ensaio de curto-circuito</i> .....	42
3.3.2	<b>Procedimento experimental para a modelagem da sonda</b> .....	<b>43</b>
3.3.2.1	<i>Ensaio para levantar os parâmetros da sonda coaxial do Maglab</i> .....	44
3.3.3	<b>Procedimento experimental para determinar os parâmetros dos materiais</b> .....	<b>45</b>
3.3.3.1	<i>Escolha das amostras dos materiais</i> .....	46

<b>3.3.4</b>	<b>Procedimento por simulação para modelar a sonda coaxial</b> .....	<b>47</b>
3.3.4.1	<i>Modelo de simulação da sonda coaxial com terminação aberta</i> .....	48
3.3.4.2	<i>Simulação de circuito aberto e curto-circuito para caracterizar o modelo simulado</i> .....	52
<b>3.3.5</b>	<b>Procedimento por simulação para determinar os parâmetros dos materiais</b> .....	<b>52</b>
3.4	<i>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</i> .....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>55</b>
4.1	<i>CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS COM ANTENAS</i> .....	55
4.2	<i>CARACTERIZAÇÃO DA SONDA COAXIAL</i> .....	56
4.3	<i>CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS</i> .....	60
4.4	<i>CARACTERIZAÇÃO DA SONDA COAXIAL E DA AMOSTRA POR SIMULAÇÃO</i> .....	66
4.5	<i>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</i> .....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>73</b>
5.1	<i>TRABALHOS FUTUROS</i> .....	73
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>75</b>
	<b>ANEXO A – TABELAS COM OS DADOS MEDIDOS</b> .....	<b>78</b>
	<b>ANEXO B – GRÁFICOS COM OS DADOS MEDIDOS</b> .....	<b>88</b>
	<b>ANEXO C – CALIBRAÇÃO DO VNA R&amp;S ZBN4</b> .....	<b>89</b>
	<b>ANEXO D – CABO COAXIAL ROSENBERGER LU7-259-1200</b> .....	<b>90</b>
	<b>ANEXO E – CALIBRAÇÃO DA PONTE RLC R&amp;S HAMEG HM8118</b> .....	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

*Em diversas pesquisas conduzidas pelo Gemco (Grupo de Engenharia e Compatibilidade Eletromagnética) no Maglab (Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética) houve a necessidade de caracterizar os materiais para diversas aplicações, tanto em baixas como em altas frequências. Principalmente, nas análises de sistemas de aterramento em que as propriedades do solo se faziam necessárias [1] [2].*

*Nos estudos de campo, o método de Wenner é a técnica mais utilizada para determinar a resistividade do solo [3]. Este método consiste na utilização de quatro hastes de aterramento cravadas no solo de maneira uniforme ao longo de uma reta, por meio das hastes periféricas uma corrente é estabelecida e a partir da medida da queda de tensão entre as hastes determina-se a resistividade do solo [3]. Todavia, há uma demanda de um espaço físico considerável para executar esse método, o qual também está sujeito a interferências significativa de sistemas de energia próximos [1].*

*Além disso, ao analisar sistemas de aterramento com foco na proteção contra transientes elétricos, tais como as descargas atmosféricas, torna-se importante obter não apenas a resistividade, mas também a permissividade elétrica do solo. Pois as descargas atmosféricas são consideradas fenômenos de baixa e relativamente alta frequência, ao decompor a sua forma de onda utilizando a transformada de Fourier encontram-se componentes significativas de corrente em frequências de até 1 MHz [4] [5]. Logo, modelar o solo para as frequências de até 1 MHz é fundamental na análise de sistemas de aterramento.*

*Um outro método muito empregado em diversas áreas para caracterizar o solo é o radar de penetração no solo (Ground-Penetrating Radar - GPR) [6] [7]. O GPR é um método de caracterização não destrutivo que transmite pequenos pulsos eletromagnéticos e capta as respostas refletidas pelo solo com a finalidade de montar uma imagem que caracterize o subsolo [6]. Além de montar uma imagem do subsolo, o GPR também pode obter as propriedades do solo como a resistividade e a permissividade elétrica relativa em função da frequência [7].*

*Apesar de o Maglab não possuir um equipamento de GPR, é possível utilizar sondas eletromagnéticas, como antenas, em conjunto com um analisador vetorial de rede para emulá-lo [8]. Assim, o presente trabalho propõe-se a investigar duas técnicas que possam ser empregadas para mensurar os parâmetros que caracterizam*



*o solo em função da frequência. Adicionalmente, modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos (MEF) foram empregados na tentativa de fazer comparações com os resultados obtidos nos processos de medição.*

## 1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

*Esse trabalho está dividido em cinco capítulos:*

*No capítulo 1, a introdução da dissertação é apresentada.*

*No capítulo 2, são abordados os princípios fundamentais necessários para compreender a caracterização eletromagnética dos materiais. Isso inclui as equações básicas do eletromagnetismo, as relações constitutivas, as propriedades dos materiais dielétricos, bem como os métodos utilizados para determinar tais propriedades.*

*No capítulo 3, as técnicas e os equipamentos empregados para tentar caracterizar as propriedades de algumas amostras de materiais dielétricos são descritos. Os métodos experimentais e de simulação são discutidos com ênfase nas técnicas de modelagem adotadas e nas simplificações feitas. Além disso, as amostras de materiais dielétricos selecionadas para o estudo são detalhadas.*

*No capítulo 4, os resultados obtidos a partir da modelagem experimental e do processo de simulação são apresentados. Esses resultados são discutidos e as limitações das metodologias utilizadas são comentadas.*

*No capítulo 5, as considerações finais do trabalho são feitas destacando as principais contribuições e apresentando ideias para futuras pesquisas.*

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

*Nesta seção, serão abordados os conceitos essenciais para compreender a caracterização eletromagnética dos materiais, incluindo as equações fundamentais do eletromagnetismo, as relações constitutivas, as propriedades dos materiais dielétricos e os métodos que podem ser utilizados para obter essas propriedades.*

### 2.1 CARACTERÍSTICAS ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS PARA ENGENHARIA ELÉTRICA

*Na engenharia elétrica atenta-se a estudar os materiais de forma macroscópica, buscando relacionar as suas propriedades e os campos eletromagnéticos [9] [10]. Para tanto, utilizam-se as Equações de Maxwell para expressar os campos eletromagnéticos, conforme o apresentado nas equações (1), (2), (3) e (4).*

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (3)$$

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

*E as relações constitutivas, mostradas nas equações (5), (6) e (7) que relacionam as propriedades dos materiais e os campos eletromagnéticos.*

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

*Em que:*

***D**: Vetor indução elétrica (C/m<sup>2</sup>);*

*$\rho_v$ : densidade volumétrica de carga elétrica (C/m<sup>3</sup>);*

***B**: Vetor indução magnética (T);*

***H**: Vetor campo magnético (A/m);*

***J**: Vetor densidade superficial de corrente (A/m<sup>2</sup>);*

***E**: Vetor campo elétrico (V/m);*

$\epsilon$ : Permissividade elétrica do material (F/m);

$\mu$ : Permeabilidade magnética do material (H/m);

$\sigma$ : Condutividade elétrica do material (S/m).

Conforme pode ser visto pelas Equações (5), (6) e (7) os campos eletromagnéticos estão relacionados as propriedades dos materiais pelos parâmetros da permissividade elétrica, da permeabilidade magnética e pela condutividade elétrica. Esses parâmetros mensuram o quanto um campo eletromagnético consegue transpassar um determinado material. Assim, esse conjunto de parâmetros caracterizam eletromagneticamente os materiais, e, portanto, são denominados como parâmetros constitutivos dos materiais.

De forma geral, os materiais são classificados em dielétricos (isolantes), magnéticos, condutores e semicondutores. Essa classificação depende de qual efeito eletromagnético é predominante, podendo ser a condução, polarização e a magnetização [9].

Neste trabalho há o interesse em caracterizar materiais não magnéticos e com baixa condutividade, como a madeira, o papel e a terra. Esses materiais podem ser classificados como materiais dielétricos com perdas ou quase condutores. Dessa forma os materiais de interesse dessa pesquisa serão analisados como materiais dielétricos com perdas.

## 2.2 MATERIAIS DIELÉTRICOS COM PERDAS

Os materiais dielétricos são caracterizados pela baixa presença de transportadores de cargas livres em sua estrutura (elétrons, íons ou vazios eletrônicos) [9], tornando a condutividade elétrica desses materiais muito baixa. Idealmente, apenas o vácuo apresenta condutividade elétrica nula. Além disso, alguns autores consideram que os materiais dielétricos são também não magnéticos [11].

Ao submeter um material dielétrico a um campo eletromagnético, dois efeitos de natureza elétrica se manifestam. Primeiro, há dissipação de energia por meio da condução das cargas livres no material. Segundo, há o armazenamento de energia por meio da formação de dipolos elétricos na estrutura do material, fenômeno conhecido como polarização [9].

Ambos os efeitos eletromagnéticos podem ser modelados pela permissividade elétrica complexa ( $\epsilon$ ). Em termos de condutividade e considerando o

domínio da frequência, a permissividade elétrica complexa pode ser expressa pela Equação (8) [9].

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon' - j\varepsilon'') = \left( \varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (8)$$

Em que:

$\boldsymbol{\varepsilon}$ : permissividade elétrica complexa (F/m);

$\varepsilon'$ : parte real da permissividade elétrica complexa que é associada ao efeito da polarização (F/m);

$\varepsilon''$ : parte imaginária da permissividade elétrica complexa que é associada ao efeito da condução (F/m);

$\sigma$ : Condutividade elétrica (S/m);

$\omega$ : frequência angular (rad/s).

Usualmente, expressa-se a permissividade elétrica de um material de forma relativa à permissividade elétrica do vácuo ( $\varepsilon_0$ ) [9]. Assim, têm-se a Equação (9).

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon' - j\varepsilon'')}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (9)$$

Em que:

$\boldsymbol{\varepsilon}_r$ : permissividade elétrica complexa relativa;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ : permissividade elétrica complexa (F/m);

$\varepsilon'$ : parte real da permissividade elétrica complexa (F/m);

$\varepsilon''$ : parte imaginária da permissividade elétrica complexa (F/m);

$\varepsilon_0$ : permissividade elétrica do vácuo ( $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  F/m);

$\varepsilon'_r$ : parte real da permissividade elétrica complexa relativa;

$\varepsilon''_r$ : parte imaginária da permissividade elétrica complexa relativa.

A relação entre a parte real e a parte imaginária da permissividade elétrica complexa é chamada de tangente de perdas elétricas, conforme expresso pela Equação (10), e é frequentemente empregada para caracterizar as propriedades dos materiais dielétricos [9].

$$\text{Tan } \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon'} \quad (10)$$

Em que:

$\text{Tan } \delta_e$ : tangente de perdas elétricas;

$\epsilon'$ : parte real da permissividade elétrica complexa (F/m);

$\epsilon''$ : parte imaginária da permissividade elétrica complexa (F/m);

$\sigma$ : Condutividade elétrica (S/m);

$\omega$ : frequência angular (rad/s).

Na análise de sistemas de aterramento em baixas frequências, comumente trabalha-se apenas com o parâmetro da resistividade elétrica do solo. A resistividade elétrica é inversamente proporcional a condutividade elétrica, o que é expresso na Equação (11).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (11)$$

Em que:

$\rho$ : Resistividade elétrica ( $\Omega\text{m}$ );

$\sigma$ : Condutividade elétrica (S/m).

### 2.3 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DO SOLO E DE ALGUNS MATERIAIS DE REFERÊNCIA

O solo pode ser definido como uma estrutura heterogênea composta por materiais orgânicos e inorgânicos, organizados em camadas horizontais. Há uma grande variedade de tipos de solo com diferentes composições, as quais influenciam diretamente nas suas propriedades eletromagnéticas. Além disso, fatores como umidade, compactação, granulação e temperatura do solo impactam nos valores dessas propriedades [12] [13].

Na Tabela 1, observa-se a condutividade de alguns tipos de solo no Brasil variando com a umidade. Por essa tabela, nota-se que a condutividade do solo varia significativamente dependendo do tipo de solo e da concentração de umidade.

Tabela 1 – Condutividade de algumas amostras de solo no Brasil em relação a umidade

Tipo de Solo	$\sigma$ (S/m)			
	U=0,1	U=0,2	U=0,3	U=0,4

Ca	Cambissolo	8,50E-05	4,28E-04	1,87E-03	2,89E-03
Ra	Solos Litólicos	1,29E-03	6,13E-03	9,26E-03	-
TB	Terra Bruna Estruturada	1,76E-04	1,36E-03	2,92E-03	1,14E-02
Pva	Podzólico Vermelho-Amarelo	7,46E-05	5,74E-04	2,15E-03	2,42E-03
LB	Latossolo Bruno	4,30E-05	3,03E-04	1,21E-03	4,35E-03
HG	Glei Pouco Húmico	1,44E-03	3,34E-03	6,02E-03	1,96E-02
Legenda: U: teor de umidade (massa <sub>água</sub> /massa <sub>solo</sub> ).					

Fonte: Coelho (2010) [14].

Além da influência da umidade, diversos pesquisadores estabeleceram equações empíricas para representar os parâmetros dielétricos do solo em função da frequência. Alguns desses modelos podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos empíricos utilizados para representar o comportamento eletromagnético do solo

Modelo	Autor	Equações	Limitação
A	Scott [15]	$\sigma(f) = \frac{10^K}{1000}$ $K = 0,028 + 1,098 \log(\sigma_0 10^3) - 0,068 \log(f) + 0,036(\log(\sigma_0 10^3))^2 - 0,046 \log(f) \log(\sigma_0 10^3) + 0,018(\log(f))^2$ $\varepsilon_r(f) = 10^D$ $D = 5,491 + 0,946 \log(\sigma_0 10^3) - 1,097 \log(f) + 0,069(\log(\sigma_0 10^3))^2 - 0,114 \log(f) \log(\sigma_0 10^3) + 0,067(\log(f))^2$	$100 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ MHz}$
B	Visacro e Portela [16]	$\sigma(f) = \frac{\sigma_0}{\left(\frac{100}{f}\right)^{0,072}}$ $\varepsilon_r(f) = 2,34 \cdot 10^6 \left(\frac{1}{\sigma_0}\right)^{-0,535} f^{-0,597}$	$100 \text{ Hz} \leq f \leq 2 \text{ MHz}$
C	Portela [17]	$\sigma(f) \pm j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(f) = \sigma_0 + \frac{11,71}{1000} \left( \cot\left(\frac{0,706\pi}{2} + j1\right) \left(\frac{f}{10^6}\right)^{0,706} \right)$	$100 \text{ Hz} \leq f \leq 2 \text{ MHz}$
D	Visacro e Alípio [18]	$\sigma(f) = \sigma_0 \left( 1 + 1500\sigma_0^{-0,73} \left(\frac{f - 100}{10^6}\right)^{0,65} \right)$ $\varepsilon_r(f) = 7,6 \cdot 10^3 f^{-0,4} + 1,3 \rightarrow f \geq 10^4 \text{ Hz}$ $\varepsilon_r(f) = \varepsilon_r(10^4 \text{ Hz}) \rightarrow f < 10^4 \text{ Hz}$	$100 \text{ Hz} \leq f \leq 4 \text{ MHz}$

Fonte: elaborado pelo autor baseado em [15] [16] [17] [18].

Na Tabela 2, tem-se que:

$\sigma(f)$ : condutividade do solo em função da frequência (S/m);

$f$ : frequência elétrica (Hz);

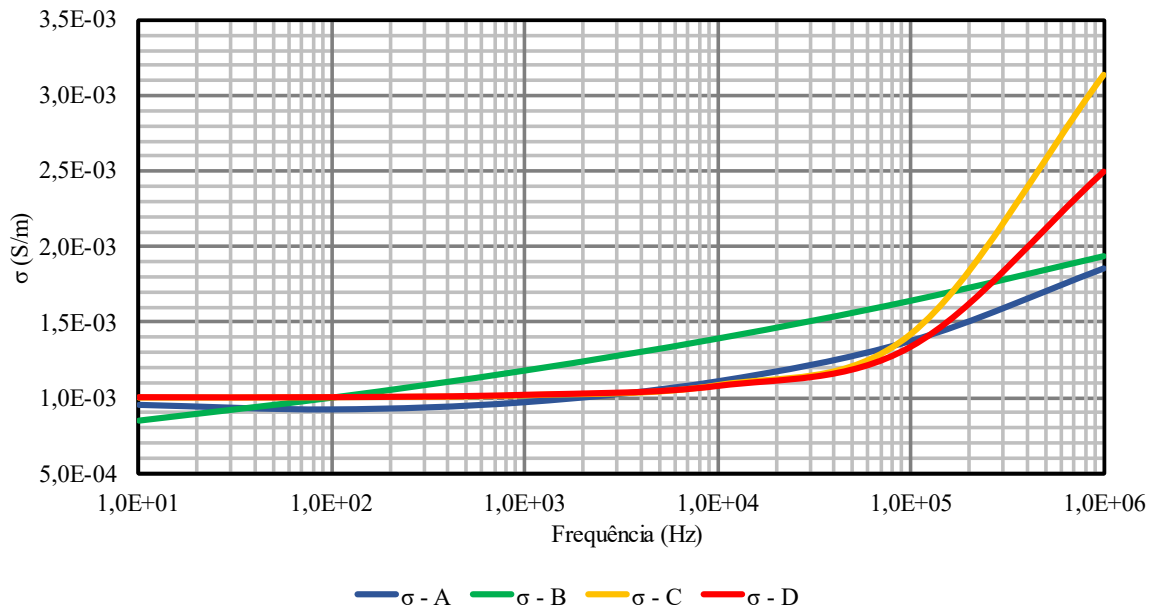
$\sigma_0$ : condutividade do solo em 100 Hz (S/m);

$\varepsilon_r$ : permissividade elétrica relativa do solo;

$\varepsilon_0$ : permissividade elétrica do vácuo (F/m).

De acordo com os modelos empíricos apresentados na Tabela 2, foram traçadas as curvas de condutividade e de permissividade elétrica considerando um solo com condutividade de  $10^{-3}$  S/m em 100 Hz ( $\sigma_0$ ). Essas curvas são apresentadas, respectivamente, na Figura 1 e na Figura 2.

Figura 1 – Valores de condutividade do solo pela frequência obtidos a partir de modelos empíricos

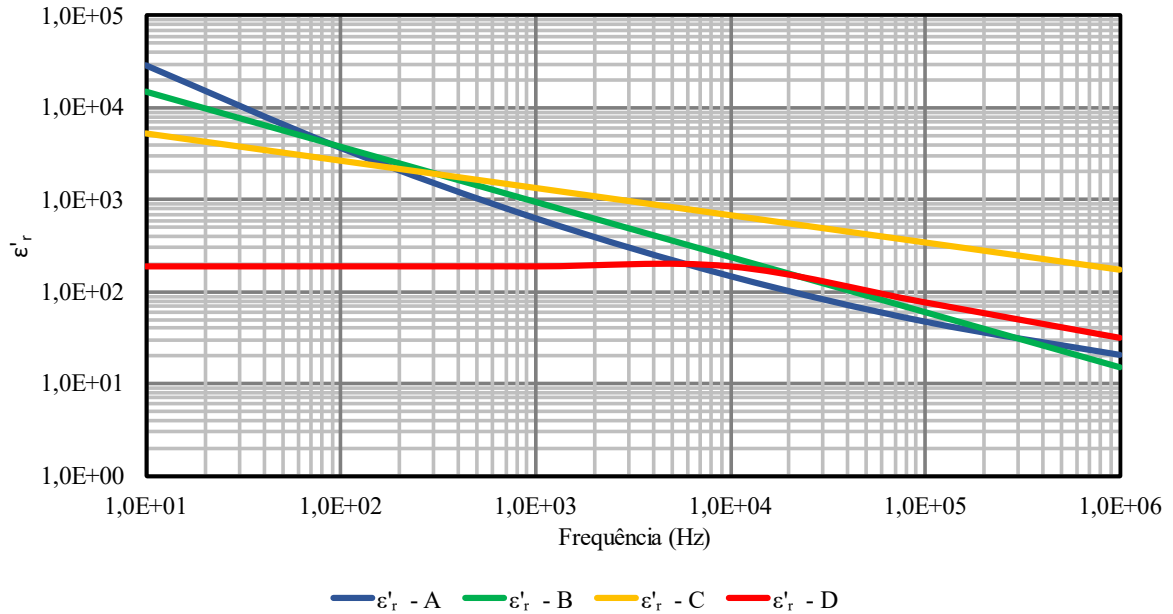


Fonte: elaborado pelo autor baseado em [15] [16] [17] [18].

Na Figura 1, observa-se o gráfico da condutividade elétrica do solo em função da frequência, obtido por meio dos modelos empíricos apresentados na Tabela 2. Nota-se em todos os modelos que a condutividade aumenta com o aumento da frequência elétrica. Para o intervalo observado de 100 Hz até 1 MHz (considerando também  $\sigma_0 = 10^{-3}$  S/m), a condutividade varia, aproximadamente, de 1 mS/m até 3,2 mS/m.

Na Figura 2, pode ser visto o gráfico da permissividade elétrica relativa do solo em função da frequência, obtido por meio dos modelos empíricos apresentados na Tabela 2. Por esse gráfico, observa-se que a permissividade do solo diminui com o aumento da frequência. Para o intervalo observado de 100 Hz até 1 MHz (considerando também  $\sigma_0 = 10^{-3}$  S/m), a permissividade varia, aproximadamente, de  $2 \times 10^4$  até 10.

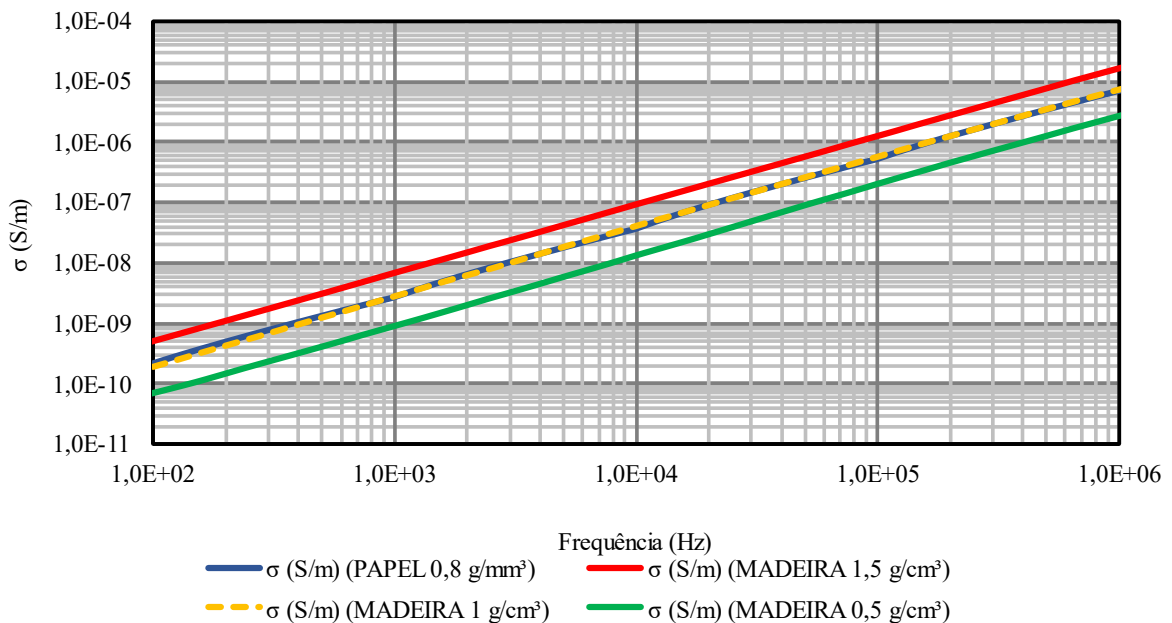
Figura 2 – Valores de permissividade relativa do solo pela frequência obtidos a partir de modelos empíricos



Fonte: elaborado pelo autor baseado em [15] [16] [17] [18].

Além de trabalhar com algumas amostras de solo, conforme será apresentado no item 3.3.3.1, também serão analisadas algumas amostras de madeira e de papel para verificar os procedimentos experimentais de medição das propriedades dielétricas desses materiais.

Figura 3 – Condutividade do papel e da madeira com diferentes densidades pela frequência

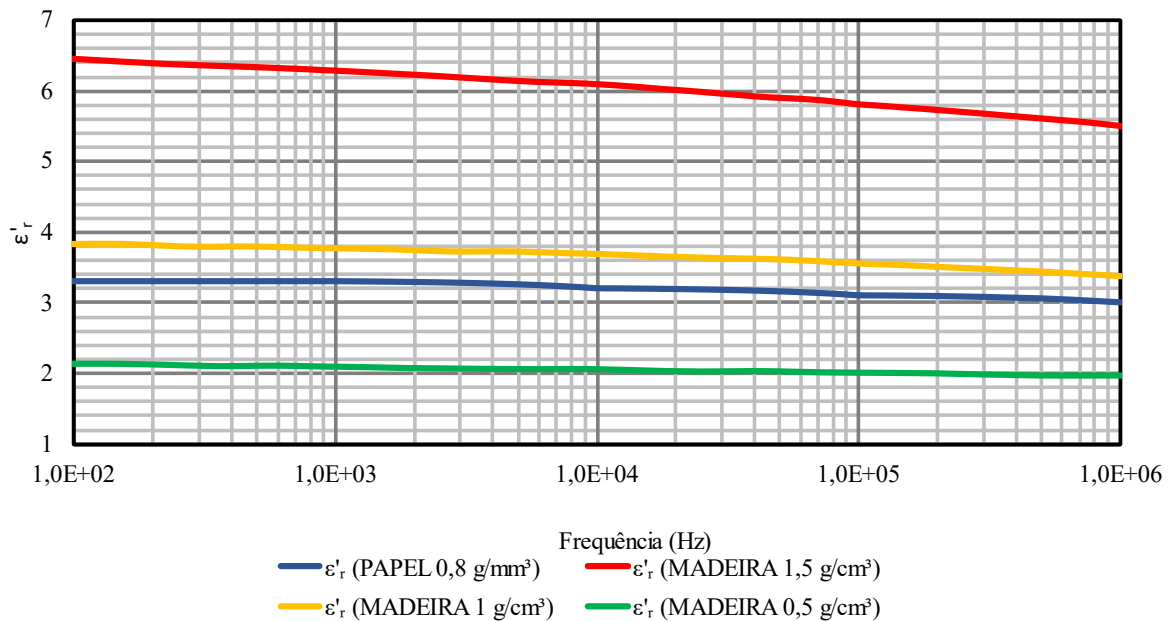


Fonte: elaborado pelo autor baseado em [19].



O papel e a madeira possuem valores de condutividade em baixas frequências semelhantes aos de algumas amostras de solo seco. Na Figura 3, pode-se ver um gráfico com os valores da condutividade elétrica do papel e da madeira com diferentes densidades em função da frequência.

Figura 4 – Permissividade elétrica do papel e da madeira com diferentes densidades pela frequência



Fonte: elaborado pelo autor baseado em [19].

Na Figura 4, é apresentado um gráfico com os valores de permissividade elétrica relativa do papel e da madeira com diferentes densidades em função da frequência.

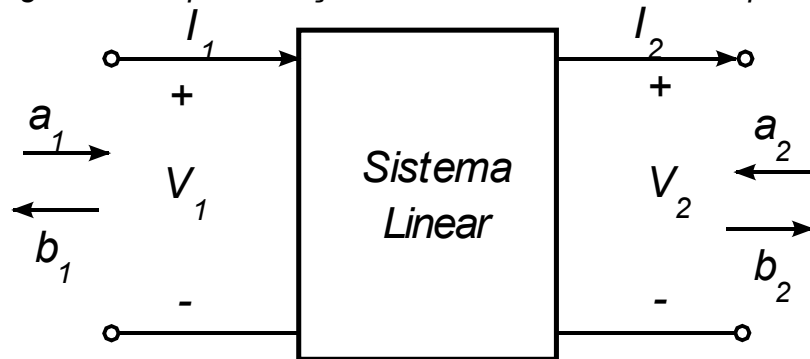
## 2.4 MODELOS MATRICIAIS

Os modelos matriciais são utilizados para representar sistemas lineares de duas portas e a sua compreensão é fundamental para entender os métodos usados neste trabalho para medir as propriedades dos materiais. Entre os diversos tipos, serão abordados neste trabalho o modelo matricial com parâmetros de espalhamento e o modelo matricial de impedância.

Na Figura 5 observa-se a representação de um sistema linear com duas portas. Com base nessa representação, na Equação (12) pode ser vista a matriz de

parâmetros de espalhamento, também denominada de matriz de parâmetros S [10].

Figura 5 – Representação de um sistema linear de 2 portas



Fonte: elaborado pelo autor baseado em [10].

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \rightarrow [S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Em que:

$a_1$ : onda que incide na porta 1;

$a_2$ : onda que incide na porta 2;

$b_1$ : onda que sai da porta 1;

$b_2$ : onda que sai da porta 2;

$[S]$ : matriz de parâmetros S;

$S_{11}$ : parâmetro de reflexão da porta 1;

$S_{12}$ : parâmetro de transmissão da porta 2 para a porta 1;

$S_{21}$ : parâmetro de transmissão da porta 1 para a porta 2;

$S_{22}$ : parâmetro de reflexão da porta 2.

A matriz de parâmetros S relaciona as ondas eletromagnéticas incidentes nas portas com os valores refletidos e transmitidos. Outra maneira de representar um sistema linear, conforme a Figura 5, é por meio de uma matriz de impedância como pode ser visto na Equação (13) [20]. A matriz de impedância relaciona as tensões elétricas nas portas com as correntes elétricas que circulam nos terminais.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} \rightarrow [Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Em que:

$V_1$ : tensão elétrica na porta 1 (V);

$V_2$ : tensão elétrica na porta 2 (V);

$I_1$ : corrente de entrada na porta 1 (A);

$I_2$ : corrente de saída na porta 2 (A);

$z_{11}$ : impedância de entrada de circuito aberto ( $\Omega$ );

$z_{12}$ : impedância de transferência da porta 2 para a porta 1 ( $\Omega$ );

$z_{21}$ : impedância de transferência da porta 1 para a porta 2 ( $\Omega$ );

$z_{22}$ : impedância de saída de circuito aberto ( $\Omega$ ).

Os parâmetros de ambos os modelos matriciais podem ser determinados utilizando uma fonte de sinal eletromagnético de teste. Ao relacionar as respostas obtidas em cada porta com a excitação correspondente da fonte, é possível determinar esses parâmetros.

## 2.5 MÉTODOS UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS DIELÉTRICOS

A caracterização das propriedades dos materiais é realizada com base nas interações entre um sinal eletromagnético e um material em questão. Essas interações podem ser interpretadas a partir dos sinais refletidos e transmitidos pelo material. E de acordo com as alterações causadas nos sinais, são determinadas as propriedades [21].

Tabela 3 – Classificação dos métodos utilizados para caracterizar os materiais

		Aberto	Fechado
Transmissão	Não resonante	Espaço livre	Guia de onda
	Resonante	Cavidade com duas portas	
Reflexão	Não resonante	Sonda coaxial de terminação aberta, Espaço livre	Guia de onda com curto-circuito
	Resonante	Cavidade com uma porta	

Fonte: Kraszewski (2004) [21]

Essas propriedades são geralmente caracterizadas em função da frequência. No entanto, métodos baseados tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo podem ser utilizados para determiná-las [21]. Esses métodos e os tipos de sensores usados são classificados conforme apresentado na Tabela 3 [21].

Em suma, os métodos baseados no domínio da frequência visam obter as propriedades dielétricas de um material pela análise de sua resposta a um sinal

*eletromagnético. Essa resposta é geralmente expressa por meio de valores de impedância, admitância ou parâmetros de espalhamento. Para tal análise, são utilizados equipamentos específicos, como analisadores de impedância, analisadores de rede e espectrômetros, cada um operando em uma faixa de frequência de interesse. Além disso, diversos tipos de sondas eletromagnéticas são utilizados para transmitir um sinal eletromagnético através de um material e captar a sua resposta; serão destacadas neste trabalho as antenas e as sondas coaxiais.*

## 2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

*Neste capítulo, foi realizada uma breve revisão de conceitos importantes para compreender o processo para obter as propriedades eletromagnéticas dos materiais. A classificação dos métodos utilizados nesse processo foi comentada e as propriedades eletromagnéticas de alguns materiais estudados foram apresentadas.*

*No próximo capítulo, serão abordadas as metodologias adotadas neste trabalho para caracterizar os parâmetros dos materiais e os equipamentos utilizados. Além disso, será apresentado um modelo de simulação desenvolvido com o objetivo de realizar comparações com os dados medidos.*

### 3 METODOLOGIA

*Este trabalho empregou duas técnicas diferentes para tentar caracterizar materiais dielétricos usando sinais eletromagnéticos de baixa frequência (<20 MHz). Nas técnicas que serão apresentadas, considera-se que os materiais são não magnéticos. A primeira técnica aborda a utilização de antenas para obter as propriedades dielétricas dos materiais, enquanto na segunda técnica é empregada uma sonda coaxial com terminação aberta.*

#### 3.1 EQUIPAMENTOS DO MAGLAB

*Neste item, serão descritos os equipamentos utilizados nos ensaios executados em laboratório. Observa-se que as metodologias abordadas neste trabalho consideram os equipamentos disponíveis no Maglab. Nenhum equipamento foi especificado ou adquirido exclusivamente para esta pesquisa. Assim, o desenvolvimento deste trabalho e os resultados obtidos estão condicionados às características desses equipamentos.*

##### 3.1.1 Analisador de rede vetorial

*O analisador de rede vetorial também conhecido pela sigla VNA (Vector Network Analyzer) é um equipamento de medição utilizado para caracterizar dispositivos lineares para a faixa de rádio frequência (RF) e de micro-ondas. Ele combina as funções de um gerador e de um receptor de sinal eletromagnético [22] [23].*

*Normalmente, um VNA possui duas portas que são conectadas ao dispositivo a ser caracterizado. Por meio dessas portas um sinal eletromagnético é injetado, e os sinais refletidos e transmitidos pelo dispositivo são medidos. Esses valores medidos são apresentados em diversos formatos, o que inclui os modelos matriciais descritos no item 2.4 [22].*

*O que difere um analisador de rede vetorial de um analisador de rede escalar é a sua capacidade medir, além da magnitude, a fase do sinal [22].*

*Nesse trabalho será utilizado um VNA modelo ZBN4 fabricado pela Rohde & Schwarz. Na Figura 6 pode ser vista uma foto desse equipamento.*

**Figura 6 – Analisador de rede vetorial R&S ZBN4**



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 4 observa-se as principais especificações técnicas do VNA ZBN4. Destaca-se que esse equipamento opera no intervalo de frequência entre 100 kHz até 4,5 GHz.

**Tabela 4 – Especificações técnicas do VNA R&S ZBN4**

Modelo	ZBN8	
Fabricante	Rohde & Schwarz	
Range de frequência	100 kHz até 4,5 GHz	
Conector	Tipo N fêmea	
Impedância	50 $\Omega$	
N° de portas	2	
Potência de entrada	-55 dBm até +10 dBm	
Incerteza da medida de transmissão	Magnitude	Fase
	Até 0,32 dB	Até 2,3°
Incerteza da medida de Reflexão	Magnitude	Fase
	Até 1 dB	Até 7,5°

Fonte: elaborado pelo autor com base em [24].

O processo para calibrar esse VNA pode ser conferido no Anexo C. E as especificações do cabo coaxial utilizado em conjunto com o VNA são apresentadas no Anexo D.

### 3.1.2 Ponte RLC

A ponte RLC é um analisador de impedância capaz de determinar o valor da impedância de um elemento passivo em baixas frequências e com alta precisão. Existem diversos tipos de pontes RLC que são elaboradas para atender a um determinado intervalo de frequência com uma certa precisão e operam com diferentes princípios de funcionamento [25] [26].

Para medir a impedância em baixas frequências (20 Hz até 200 kHz) o Maglab dispõe de uma ponte RLC modelo HAMEG HM8118 fabricado pela Rohde & Schwarz. Uma foto desta ponte RLC pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 – Ponte RLC R&S HAMEG HM8118



Fonte: elaborado pelo autor.

A ponte RLC do Maglab consegue medir a impedância (módulo e fase) identificada entre as portas. Para isso, a ponte utiliza um sinal em corrente alternada com magnitude e frequência ajustáveis. As principais especificações dessa ponte podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas da ponte RLC R&S HAMEG HM8118

Modelo	HAMEG HM8118
Fabricante	Rohde & Schwarz
Range de frequência	20 Hz até 200 kHz
Conector	Tipo BNC fêmea
Nº de portas	2 (dois conectores por porta)
Magnitude do sinal de teste	50mV até 1,5V
Precisão de base	0,05%

Fonte: elaborado pelo autor com base em [26].

Durante o processo de medição, a ponte estabelece um valor de tensão em corrente alternada na frequência analisada entre os terminais de potência que são denominados H-POT (High Potential) e L-POT (Low Potential), e mede a corrente que circula entre os terminais denominados como H-CUR (High Current) e L-CUR (Low Current). Ao fazer a relação entre a tensão estabelecida e a corrente medida obtém-se o valor da impedância.

Para conectar a ponte RLC ao dispositivo a ser caracterizado são utilizados dois cabos com pontas de testes Kelvin modelo R&S HZ184 e conectores BNC, os quais são mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Cabos R&S HZ184 com ponta de testes Kelvin. (a) O par de cabos utilizados. (b) Detalhe dos conectores BNC.



(a)

(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

As especificações técnicas desses cabos podem ser conferidas na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações técnicas do cabo R&S HZ184

Modelo	R&S HZ184
Fabricante	Rohde & Schwarz
Range de frequência	20 Hz até 200 kHz
Conector	Tipo BNC macho
N° de portas	2 (dois conectores por porta)
Comprimento	35cm

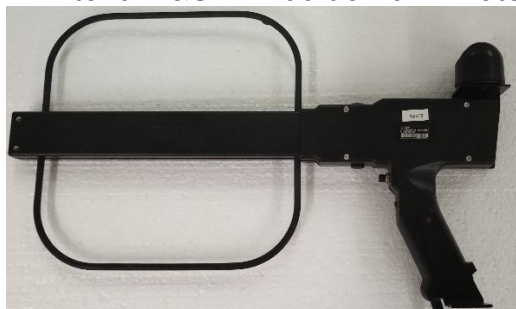
Fonte: elaborado pelo autor com base em [26].

No Anexo E deste trabalho, pode ser verificado o procedimento de calibração da ponte RLC HAMEG HM8118 utilizado.

### 3.1.3 Conjunto de antenas

Neste trabalho, para caracterizar os materiais dielétricos com o método do espaço livre, será utilizado um par de antenas de banda larga do Maglab. Esse par de antenas opera na faixa de 10 kHz até 20 MHz, e uma foto de uma das antenas pode vista na Figura 9.

Figura 9 – Antena R&S HE200 de 10 kHz até 20 MHz.



Fonte: elaborado pelo autor com base em [27].



As antenas R&S HE200 são diretivas, possuem polarização linear e funcionam de modo passivo e ativo. As principais características dessas antenas podem ser verificadas na Tabela 7.

*Tabela 7 – Especificações técnicas das antenas R&S HE200*

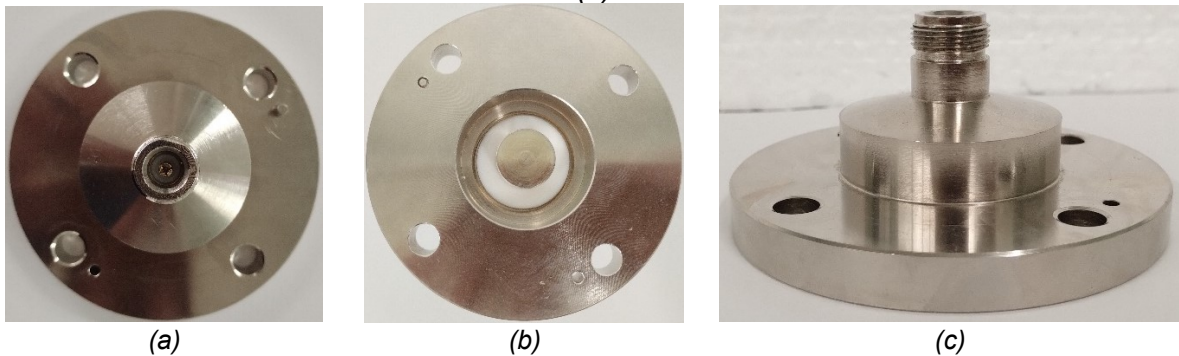
<i>ROE típico</i>	<i>&lt;2,5</i>
<i>Conector</i>	<i>Tipo N macho</i>
<i>Impedância nominal</i>	<i>50 Ω</i>
<i>Faixa de frequência</i>	<i>10 kHz – 20 MHz</i>

Fonte: elaborado pelo autor com base em [27].

### 3.1.4 Sonda coaxial

Na imagem da Figura 10 pode ser vista a sonda coaxial de terminação aberta do Maglab. Por observação, nota-se que a sonda é fabricada em uma liga de aço inox e, internamente, possui um dielétrico preenchido com um polímero. Geralmente, em sondas coaxiais, o material dielétrico utilizado é o teflon [28] [29].

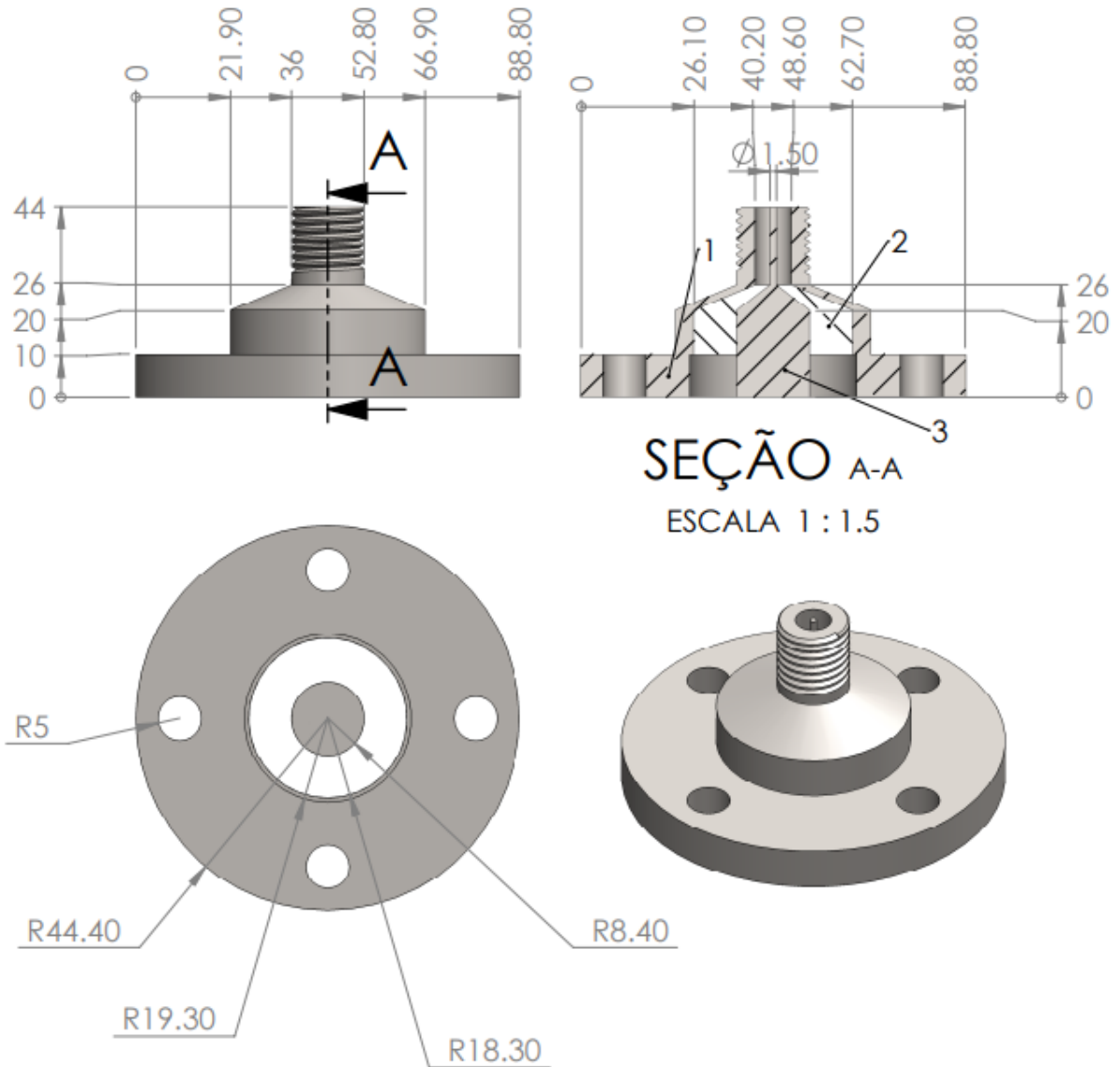
*Figura 10 – Sonda coaxial de terminação aberta do Maglab. (a) Vista superior. (b) Vista inferior. (c) Vista frontal.*



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 11 são mostradas representações dessa sonda coaxial com as suas dimensões. Na vista em corte mostrada na Figura 11 é indicado em “1” o condutor externo da sonda coaxial construído em aço inox, em “2” o material dielétrico interno da sonda e em “3” o condutor interno da sonda também construído em aço inox.

Figura 11 – Dimensões da Sonda coaxial do Maglab (dimensões em mm)



Fonte: elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que não há informações sobre a sonda, assim, as dimensões internas dela são estimadas com base nas medições da região externa e em modelos de outras sondas semelhantes, como as apresentadas em [28] [29].

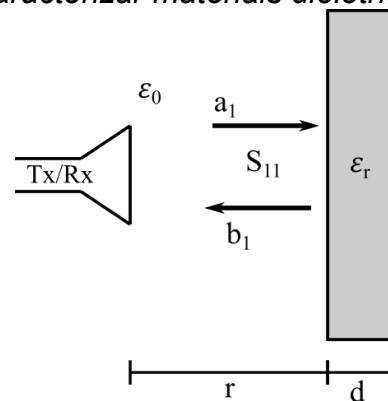
### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COM ANTENAS

A caracterização de materiais com antenas é uma técnica de espaço livre, baseada na teoria de ondas eletromagnéticas planas que pode ser realizada pelo método da reflexão ou pelo método da transmissão, conforme foi comentado na Tabela 3.

### 3.2.1 Método por reflexão

No método mais simples de caracterização por reflexão, é utilizada apenas uma porta, o que significa que a antena desempenha o papel de transmitir o sinal e, simultaneamente, captar sua reflexão. Neste método, a reflexão do sinal é influenciada pelas propriedades da amostra, e essa influência pode ser identificada por meio do parâmetro de reflexão ( $S_{11}$ ).

Figura 12 – Esquemático do método de reflexão com uma antena utilizado para caracterizar materiais dielétricos



Fonte: elaborado pelo autor baseado em [30].

Na Figura 12 pode ser observado um esquemático do método de caracterização dos materiais dielétricos por reflexão utilizando uma antena.

Nesse método, a impedância de entrada normalizada está relacionada ao parâmetro de reflexão normalizado medido e à permissividade elétrica relativa pela Equação (14). Além disso, o coeficiente de reflexão normalizado pode ser calculado pela Equação (15) [11] [31] [30].

$$\bar{Z} = \left( \frac{1 + \bar{\Gamma}}{1 - \bar{\Gamma}} \right) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (14)$$

$$\bar{S}_{11} = 20 \log \bar{\Gamma} = S_{11} - S_{110} \quad (15)$$

Em que:

$\bar{Z}$ : impedância característica do meio normalizada;

$\bar{\Gamma}$ : coeficiente de reflexão normalizado;

$\epsilon_r$ : permissividade elétrica relativa;

$\bar{S}_{11}$ : parâmetro de reflexão da porta 1 normalizado (dB);

$S_{11}$ : parâmetro de reflexão da porta 1 com a amostra (dB);

$S_{110}$ : parâmetro de reflexão da porta 1 medido sem a amostra (dB).

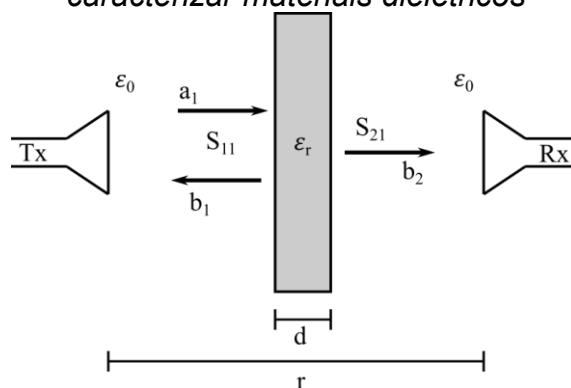
### 3.2.2 Método por transmissão

No método de transmissão, são utilizadas duas antenas, uma de cada lado da amostra de material. Uma das antenas é usada na transmissão da onda eletromagnética (Tx) e a outra para recepção (Rx). Conforme as propriedades da amostra, parte do sinal será refletido e parte do sinal será transmitido através dela. A porção do sinal refletido é quantificada pelo parâmetro de reflexão ( $S_{11}$ ), enquanto a parte transmitida é expressa pelo parâmetro de transmissão ( $S_{21}$ ).

Na Figura 13 pode ser observado o esquemático do método de transmissão com antenas utilizado para caracterizar os materiais dielétricos.

Baseado na atenuação e no deslocamento da fase do sinal, devido à presença da amostra, pode-se obter os parâmetros de permissividade e condutividade elétrica do material. A atenuação pode ser calculada pela Equação (16) e o deslocamento de fase pela Equação (17) [30] [32].

Figura 13 – Esquemático do método de transmissão com antenas utilizado para caracterizar materiais dielétricos



Fonte: elaborado pelo autor baseado em [30].

$$\Delta A = |b_2| - |b_{20}| \quad (16)$$

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 = \angle b_2 - \angle b_{20} \quad (17)$$

Em que:

$\Delta A$ : atenuação (dB);

$|b_2|$ : magnitude do sinal recebido através da amostra (dB);

$|b_{20}|$ : magnitude do sinal recebido sem a amostra (dB);

$\Delta\phi$ : deslocamento de fase (rad);

$\angle b_2$ : fase do sinal recebido através da amostra (rad);

$\angle b_{20}$ : fase do sinal recebido sem a amostra (rad).

Com os valores de atenuação e de deslocamento de fase calcula-se as constantes de atenuação e de fase da amostra pelas Equações (18) e (19) [30] [32].

$$\alpha = \frac{\Delta A}{8,686 d} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{\Delta\phi}{d} + \beta_0 \quad (19)$$

Em que:

$\alpha$ : constante de atenuação (Np/m);

$\Delta A$ : atenuação (dB);

$d$ : espessura da amostra (m) conforme descrito na Figura 13;

$\beta$ : constante de fase (rad/m);

$\Delta\phi$ : deslocamento de fase (rad);

$\beta_0$ : constante de fase no ar (rad/m).

Dessa forma, a permissividade elétrica relativa e a condutividade elétrica podem ser calculadas pelas Equações (20) e (21) [30] [32].

$$\epsilon'_r = \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)^2 \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{2\alpha\beta\epsilon_0\omega}{\beta_0^2} \quad (21)$$

Em que:

$\epsilon'_r$ : parte real da permissividade elétrica complexa relativa;

$\beta$ : constante de fase (rad/m);

$\beta_0$ : constante de fase no ar (rad/m);

$\sigma$ : Condutividade elétrica (S/m);

$\epsilon_0$ : permissividade elétrica do vácuo (F/m);

$\omega$ : frequência angular (rad/s);

$\alpha$ : constante de atenuação (Np/m).

### 3.2.3 Procedimento experimental para obter os parâmetros dos materiais com antenas

*Ambas as técnicas de medição no espaço livre descritas nos itens 3.2.1 e 3.2.2 dependem da diferença do sinal captado pela antena receptora na condição com e sem a amostra do material dielétrico. Portanto, é imprescindível que a configuração de medição permita identificar essa diferença. E isso é influenciado por diversos fatores como a faixa de frequência de medição, o conjunto de antenas utilizados, o tipo de amostra analisada, a potência radiada pelas antenas e a distância entre as antenas e a amostra.*

*Com o conjunto de antenas e com o VNA do Maglab, descritos nos itens 3.1.1 e 3.1.3, foi montada a configuração do método de transmissão apresentada na Figura 13 para avaliar os parâmetros de transmissão e reflexão ( $S_{11}$  e  $S_{21}$ ) com diferentes tipos de amostras. Nesse ensaio, as antenas, operando no modo ativo, foram excitadas pelo VNA com uma potência de 5 dBm (3,2 mW) para o intervalo de frequências de 100 kHz até 20 MHz. A distância  $r$  de 30 cm foi considerada entre as antenas, e assim a amostra estava a 15 cm de cada uma das antenas. O teste foi executado usando como amostra uma placa de aço inox (1,5 m por 0,9 m) com 1 mm de espessura e uma placa de madeira (0,7 m por 0,7 m) com 1 cm de espessura.*

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COM SONDA COAXIAL

*Para encontrar as propriedades que caracterizam o material das amostras é também necessário modelar a sonda coaxial. Portanto, a metodologia adotada pode ser dividida em algumas etapas, sendo elas:*

- *Modelagem da sonda coaxial por circuito equivalente;*
- *Procedimento experimental para a modelagem da sonda;*
- *Procedimento experimental para a caracterização dos materiais;*
- *Procedimento por simulação para a modelagem da sonda;*
- *Procedimento por simulação para a caracterização dos materiais.*

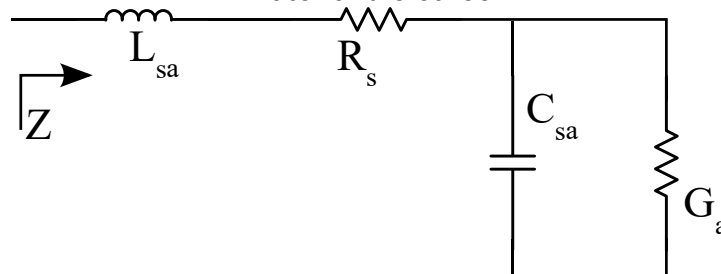
*Neste trabalho é utilizado uma sonda coaxial de terminação aberta para*

caracterizar os materiais dielétricos. Essa sonda pertence ao Maglab. Entretanto, não há informações sobre o modelo dela, pois o laboratório não dispõe da folha de dados que a caracterizam. Por isso, a caracterização da sonda será feita por meio de medições e análises computacionais.

### 3.3.1 Modelagem da sonda coaxial por circuito equivalente

Uma das formas de modelar a sonda coaxial é com o uso de um circuito equivalente. O circuito equivalente de uma sonda coaxial se assemelha ao de um capacitor com perdas devido ao seu comportamento predominante capacitivo [11] [33]. Entretanto, como será visto nas medidas, a sonda possui também uma componente indutiva que ganha relevância com o aumento da frequência. Portanto, um circuito RLGC será adotado para modelar a sonda. Na imagem da Figura 14 observa-se o circuito equivalente que modela o funcionamento da sonda coaxial com terminação aberta em contato com uma amostra de material dielétrico.

Figura 14 – Circuito equivalente da sonda coaxial em contato com uma amostra de material dielétrico



Fonte: elaborado pelo autor.

Sendo:

$Z$ : impedância vista na entrada da sonda coaxial ( $\Omega$ );

$L_{sa}$ : indutância da sonda coaxial e da amostra (H);

$R_s$ : resistência elétrica da sonda coaxial ( $\Omega$ );

$C_{sa}$ : capacitância da sonda e da amostra (F);

$G_a$ : condutância elétrica da amostra (S).

Em um processo de medição com a sonda coaxial, a grandeza obtida é a impedância de entrada ( $Z$ ). Portanto, por meio do circuito da Figura 14, obtêm-se as Equações (22), (23) e (24).

$$Z = R + jX \quad (22)$$

$$R = R_s + \frac{\frac{1}{G_a (\omega C_{sa})^2}}{\left(\frac{1}{G_a}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{sa}}\right)^2} \quad (23)$$

$$X = \omega L_{sa} - \frac{\frac{1}{G_a^2 \omega C_{sa}}}{\left(\frac{1}{G_a}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{sa}}\right)^2} \quad (24)$$

Nas quais:

$Z$ : impedância vista na entrada da sonda coaxial ( $\Omega$ );

$R$ : resistência elétrica medida na entrada da sonda ( $\Omega$ );

$X$ : reatância medida na entrada da sonda ( $\Omega$ );

$\omega$ : frequência elétrica angular do sinal medido (rad/s);

$L_{sa}$ : indutância da sonda coaxial e da amostra (H);

$R_s$ : resistência elétrica da sonda coaxial ( $\Omega$ );

$C_{sa}$ : capacitância da sonda e da amostra (F);

$G_a$ : condutância elétrica da amostra (S).

Como há o interesse em caracterizar a amostra, é necessário isolar os termos  $G_a$  e  $C_{sa}$  em função da impedância de entrada ( $Z$ ). Logo, chega-se as Equações (25) e (26).

$$G_a = \frac{R - R_s}{(R - R_s)^2 + (X - \omega L_{sa})^2} \quad (25)$$

$$C_{sa} = -\frac{1}{\omega} \left( \frac{X - \omega L_{sa}}{(R - R_s)^2 + (X - \omega L_{sa})^2} \right) \quad (26)$$

Em que:

$R$ : resistência elétrica medida na entrada da sonda ( $\Omega$ );

$X$ : reatância medida na entrada da sonda ( $\Omega$ );

$\omega$ : frequência elétrica angular do sinal medido (rad/s);

$L_{sa}$ : indutância da sonda coaxial e da amostra (H);

$R_s$ : resistência elétrica da sonda coaxial ( $\Omega$ );

$C_{sa}$ : capacitância da sonda e da amostra (F);

$G_a$ : condutância elétrica da amostra (S).



Os parâmetros da permissividade elétrica relativa e condutividade elétrica são determinados utilizando os termos obtidos nas Equações (25) e (26). Para tanto, são empregadas as Equações (27) e (28) [34].

$$\varepsilon_r' = \frac{C_{sa}}{C_s} \quad (27)$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 G_a}{C_s} \quad (28)$$

Em que:

$\varepsilon_r'$ : permissividade elétrica relativa da amostra;

$C_{sa}$ : capacitância da sonda e da amostra (F);

$C_s$ : capacitância da sonda coaxial (F);

$\sigma$ : condutividade elétrica da amostra (S/m);

$G_a$ : condutância elétrica da amostra (S).

A capacitância da sonda ( $C_s$ ) e a indutância da sonda ( $L_s$ ) podem ser obtidas por um ensaio de circuito aberto. A resistência da sonda ( $R_s$ ) pode ser determinada por meio de um ensaio de curto-circuito em baixa frequência ou em corrente contínua.

Como o interesse nesse trabalho é caracterizar materiais de baixa condutividade e não magnéticos ( $\mu_r = 1$ ), a indutância da sonda com a amostra é igual à indutância da própria sonda, o que é expresso pela Equação (29).

$$L_s = L_{sa} \quad (29)$$

Em que:

$L_s$ : indutância da própria sonda coaxial (H);

$L_{sa}$ : indutância da sonda coaxial e da amostra (H)

Também é importante frisar que a modelagem adotada considera que o material interno à sonda (Teflon) possui condutividade elétrica desprezível.

### 3.3.1.1 Ensaio de circuito aberto

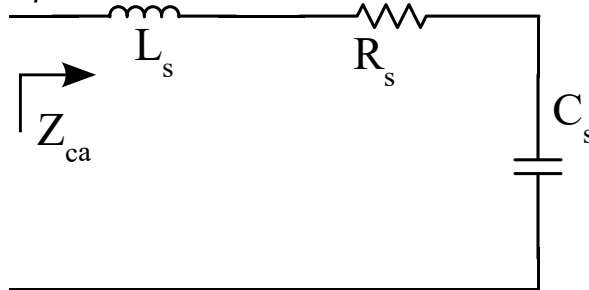
O ensaio de circuito aberto é utilizado para encontrar a frequência de ressonância da sonda coaxial e assim, determinar a capacitância da sonda ( $C_s$ ) e a indutância da sonda ( $L_s$ ). Nesse ensaio, o meio externo à sonda é preenchido por ar,

portanto, fazem-se as seguintes considerações:

- $\sigma \rightarrow 0 \text{ S/m}$ , o meio externo à sonda possui condutividade muito baixa, por consequência  $G_a \rightarrow 0 \text{ S}$ ;
- $\epsilon_r' \approx 1$ ,
- $\mu_r \approx 1$ .

Na Figura 15, pode-se observar o circuito equivalente para a sonda coaxial em um ensaio de circuito aberto. Por meio da análise desse circuito, obtêm-se as Equações (30), (31) e (32).

Figura 15 – Circuito equivalente da sonda coaxial em um ensaio de circuito aberto



Fonte: elaborado pelo autor.

$$Z_{ca} = R_{ca} + jX_{ca} \quad (30)$$

$$R_{ca} = R_s \quad (31)$$

$$X_{ca} = \omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \quad (32)$$

Sendo:

$Z_{ca}$ : impedância de entrada no ensaio de curto aberto ( $\Omega$ );

$R_{ca}$  resistência de entrada no ensaio de curto aberto ( $\Omega$ );

$X_{ca}$ : reatância de entrada no ensaio de curto aberto ( $\Omega$ );

$\omega$ : frequência elétrica angular do sinal medido (rad/s);

$L_s$ : indutância da sonda coaxial (H);

$R_s$ : resistência elétrica da sonda coaxial ( $\Omega$ );

$C_s$ : capacitância da sonda (F).

Logo, para frequência de ressonância em circuito aberto ( $\omega_0$ ), e considerando a Equação (32), chega-se à Equação (33).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_s L_s}} \rightarrow L_s = \frac{1}{C_s \omega_0^2} \quad (33)$$

Em que:

$\omega_0$ : frequência angular de ressonância da sonda para circuito aberto (rad/s);

$L_s$ : indutância da sonda coaxial (H);

$C_s$ : capacitância da sonda (F).

Substituindo a Equação (33) na (32) e isolando o termo  $C_s$  encontra-se a Equação (34).

$$C_s = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2 \omega X_{ca}} \quad (34)$$

Em que:

$\omega_0$ : frequência angular de ressonância da sonda para circuito aberto (rad/s);

$\omega$ : frequência elétrica angular do sinal medido (rad/s);

$X_{ca}$ : reatância de entrada no ensaio de curto aberto ( $\Omega$ );

$C_s$ : capacitância da sonda (F).

Com o valor de  $C_s$ , aplica-se a Equação (33) para encontrar o valor de  $L_s$ . Observa-se que na teoria, para valores de frequência menores que a frequência de ressonância, os valores de  $C_s$  e  $L_s$  serão constantes [33].

Além disso, conforme ilustrado no circuito da Figura 15, para frequências baixas, o circuito estará em estado aberto devido ao efeito capacitivo da sonda. Portanto, a Equação (31) não pode ser aplicada para estimar a resistência do corpo da sonda ( $R_s$ ), pois não haverá fluxo de corrente. E para frequências altas, haverá a influência do dielétrico interno da sonda, assim, a resistência interna da sonda será estimada em um ensaio de curto-circuito.

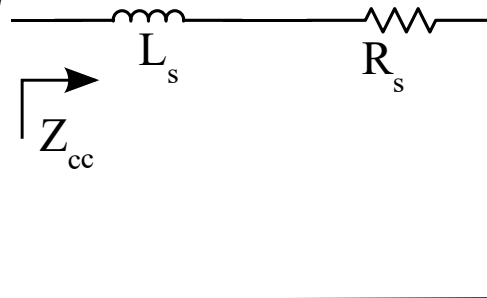
### 3.3.1.2 Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito é utilizado para encontrar a resistência da sonda ( $R_s$ ). Neste ensaio, as terminações da sonda são colocadas em curto-circuito por meio do contato com uma amostra condutora. De maneira ideal, faz-se as seguintes considerações no ensaio de curto-circuito:

- $\sigma \rightarrow \infty$  S/m, a amostra colocada nos terminais da sonda possui condutividade

muito alta, por consequência  $G \rightarrow \infty S$ .

Figura 16 – Circuito equivalente da sonda coaxial em um ensaio de curto-circuito



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 16 observa-se o circuito equivalente da sonda coaxial em um ensaio de curto-circuito. Com base na análise desse circuito, pode-se chegar nas Equações (35), (36) e (37).

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \quad (35)$$

$$R_{cc} = R_s \quad (36)$$

$$X_{cc} = \omega L \quad (37)$$

Sendo:

$Z_{cc}$ : impedância de entrada no ensaio de curto-circuito ( $\Omega$ );

$R_{cc}$ : resistência de entrada no ensaio de curto-circuito ( $\Omega$ );

$X_{cc}$ : reatância de entrada no ensaio de curto-circuito ( $\Omega$ );

$\omega$ : frequência elétrica angular do sinal medido (rad/s);

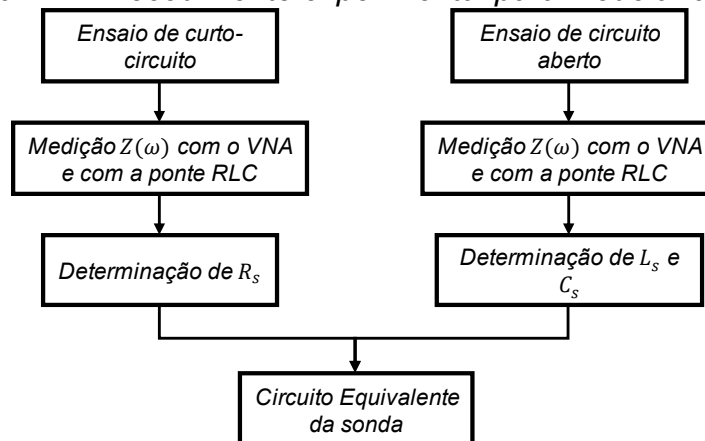
$L$ : indutância da sonda e da amostra condutora (H)

A resistência do corpo da sonda pode ser estimada pela Equação (36). Ressalta-se que a amostra condutora influencia nas linhas de fluxo magnético, assim, a Equação (37) não pode ser utilizada para estimar o efeito indutivo da sonda.

### 3.3.2 Procedimento experimental para a modelagem da sonda

O procedimento experimental executado para modelar a sonda coaxial segue os conceitos estabelecidos no item 3.3.1, e pode ser observado pelo fluxograma da Figura 17.

Figura 17 – Procedimento experimental para modelar a sonda



Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, a escolha do procedimento também considerou os equipamentos de medição disponíveis no Maglab.

### 3.3.2.1 Ensaios para levantar os parâmetros da sonda coaxial do Maglab

Conforme discutido no item 3.3.1, é necessário executar os ensaios de circuito aberto e curto-circuito na sonda coaxial para sua caracterização. Esses ensaios são executados utilizando a ponte RLC HAMEG HM8118 (descrita no item 3.1.2) para o intervalo de frequência de 20 Hz até 200 kHz, com uma excitação de 1 V<sub>RMS</sub>. E para o intervalo de frequência de 200 kHz até 4,5 GHz, utiliza-se o VNA ZBN4 (descrito no item 3.1.1) com uma excitação de 0 dBm (1 mW).

Figura 18 – Ensaio de circuito aberto com a sonda coaxial e a HAMEG HM8118

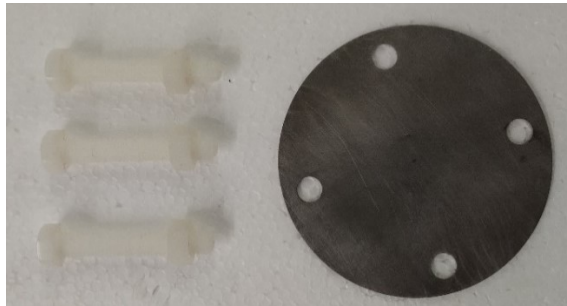


Fonte: elaborado pelo autor.

No ensaio de circuito aberto a sonda é colocada sobre uma placa de isopor com os terminais abertos e virados para o espaço livre, conforme pode ser visto na

Figura 18.

Figura 19 – Ensaio de curto-circuito com a sonda coaxial e a HAMEG HM8118. (a) Parafusos e chapa de metal utilizados. (b) Ensaio de curto-circuito



(a)



(b)

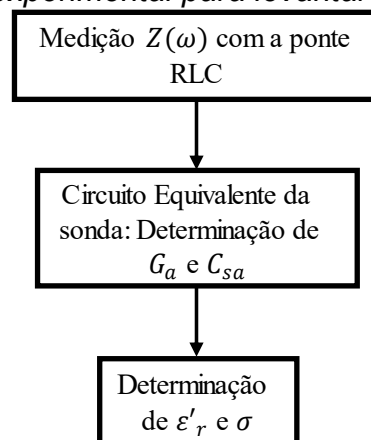
Fonte: elaborado pelo autor.

No ensaio de curto-circuito, os terminais da sonda são colocados em curto-circuito com o auxílio de uma chapa de aço inox de 1,5mm fixada com parafusos e porcas de plástico, conforme pode ser visto na Figura 19.

### 3.3.3 Procedimento experimental para determinar os parâmetros dos materiais

O procedimento experimental executado para determinar os parâmetros dos materiais segue os conceitos estabelecidos no item 3.3.1 e pode ser observado pelo fluxograma da Figura 20.

Figura 20 – Procedimento experimental para levantar os parâmetros dos materiais



Fonte: elaborado pelo autor.

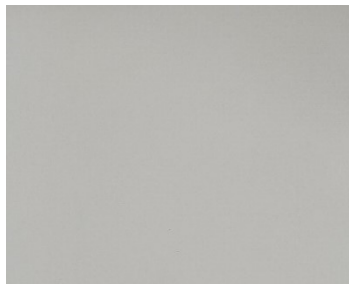
Esse procedimento compreende a caracterização dos materiais para o

intervalo de frequência de 20Hz até 200kHz. Para isso, será utilizado a ponte RLC do Maglab, apresentada no item 3.1.2, com uma excitação de  $1 V_{RMS}$ .

### 3.3.3.1 Escolha das amostras dos materiais

Para confeccionar as amostras utilizadas no procedimento experimental, foram escolhidos materiais não magnéticos e com propriedades semelhantes às encontradas no solo. Todas as amostras têm espessura maior que 19,32 mm, que é o valor do raio entre o condutor central e externo da sonda conforme mostrado na Figura 11, e uma área de superfície maior que  $62 \text{ cm}^2$ , que é o valor da superfície de contato da sonda. Fotos das superfícies das amostras selecionadas podem ser verificadas na Figura 21.

Figura 21 – Materiais dielétricos utilizados nas amostras. (a) Papel. (b) Madeira pinus. (c) Areia de construção seca. (d) Terra de plantio úmida. (e) Argila úmida. (f) Cimento



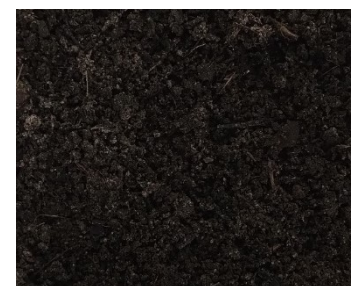
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 8, pode-se conferir algumas informações sobre as amostras usadas no procedimento de medição e caracterização.

*Tabela 8 – Descrição das amostras com detalhes*

<b>Material</b>	<b>Descrição</b>	<b>Marca/Fabricante</b>	<b>Condição</b>	<b>Espessura da amostra (mm)</b>
<i>Papel</i>	<i>Bloco de folhas de ofício brancas com 75g/cm<sup>2</sup> fabricada com fibra de cana de açúcar</i>	<i>PROPAL/Carvajal</i>	<i>Seca em condição ambiente</i>	<i>56</i>
<i>Madeira de pinus</i>	<i>Bloco de madeira de pinus</i>	<i>-</i>	<i>Seca em condição ambiente</i>	<i>40</i>
<i>Areia</i>	<i>Areia branca fina usada na construção civil</i>	<i>-</i>	<i>Seca em condição ambiente</i>	<i>50</i>
<i>Terra</i>	<i>Terra com matéria orgânica usada em jardinagem</i>	<i>-</i>	<i>Úmida em condição ambiente</i>	<i>50</i>
<i>Argila</i>	<i>Bloco de argila usado em artesanato</i>	<i>Argilas Catarinense</i>	<i>Úmida em condição ambiente</i>	<i>50</i>
<i>Cimento</i>	<i>Cimento usado na construção civil</i>	<i>Votoran/Votorantim</i>	<i>Seco em condição ambiente</i>	<i>50</i>

*Fonte: elaborado pelo autor.*

É importante ressaltar que todas as amostras foram compactadas manualmente e estavam em condições ambientes. Não houve um controle preciso na umidade e na compactação das amostras.

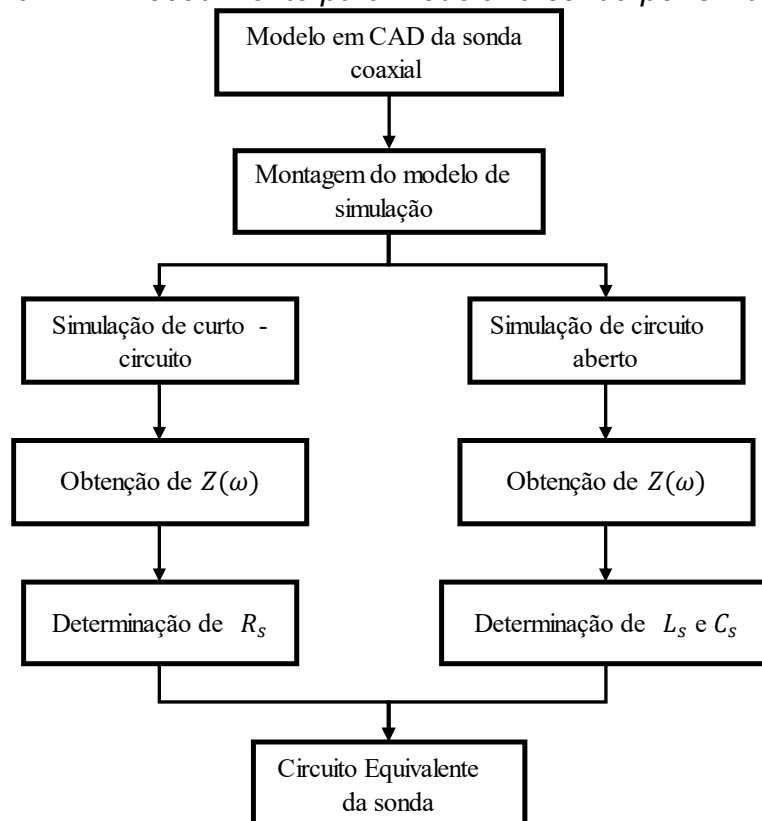
#### **3.3.4 Procedimento por simulação para modelar a sonda coaxial**

*Para verificar a modelagem da sonda, será realizado um procedimento de simulação utilizando o método dos elementos finitos. Na Figura 22, observa-se o fluxograma do procedimento de simulação adotado para modelar a sonda coaxial de terminação aberta, a qual foi descrita no item 3.1.4.*

*As simulações foram feitas utilizando o software ANSYS HFSS, o qual permite realizar análises eletromagnéticas considerando o equacionamento de onda completa pelo método dos elementos finitos. Uma das respostas que pode ser obtida da simulação com esse software é o valor da impedância da porta de excitação. Dessa forma, a metodologia apresentada no item 3.3.1 pode ser aplicada com os resultados da simulação.*



Figura 22 – Procedimento para modelar a sonda por simulação



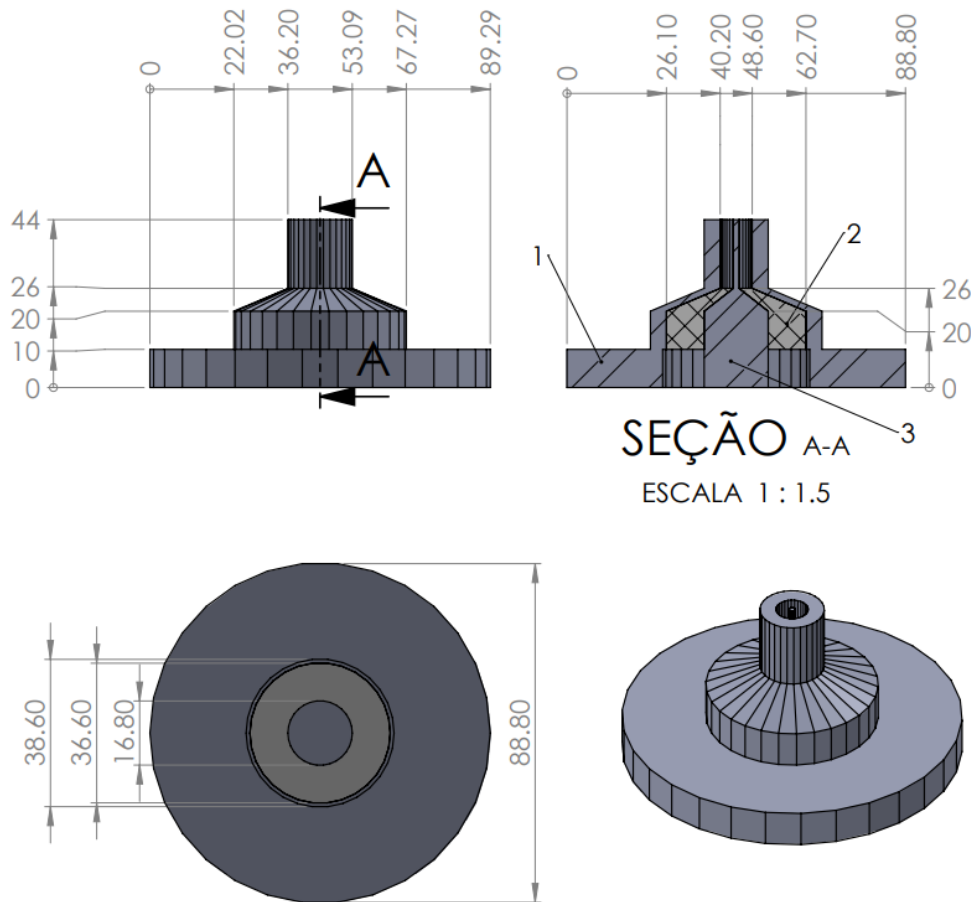
Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.3.4.1 Modelo de simulação da sonda coaxial com terminação aberta

Um modelo em CAD (Computer Aided Design) foi desenvolvido com base nas dimensões reais da sonda, as quais foram apresentadas na Figura 11. Com o uso da ferramenta computacional SOLIDWORKS foi montado o modelo em CAD da sonda como pode ser visto na Figura 23.

Conforme mostrado na Figura 23, as superfícies arredondas e curvas do modelo CAD da sonda foram simplificadas para um modelo facetado com 30 lados com a finalidade de simplificar e otimizar a solução por MEF. Além disso, conforme comentado no item 3.1.4, a parte externa e a parte interna da sonda, 1 e 3 da Figura 23, são fabricados em aço inox e o material dielétrico colocado entre essas partes, 2 da Figura 23, é o teflon.

Figura 23 – Dimensões do modelo em CAD da sonda coaxial do Maglab (dimensões em mm)



Fonte: elaborado pelo autor.

O modelo em CAD da sonda é importado para dentro da plataforma do ANSYS HFSS, após, são atribuídas as propriedades dos materiais, conforme descrito na Tabela 9.

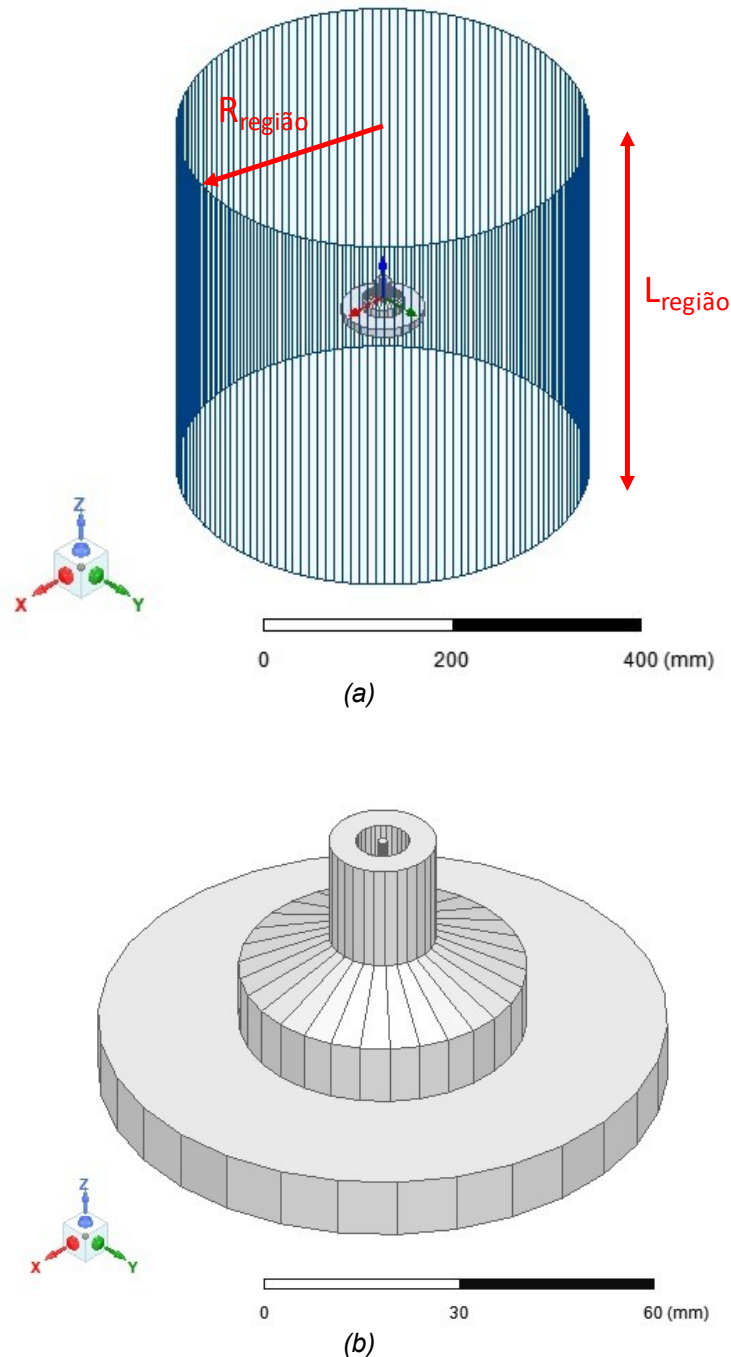
Tabela 9 – Propriedades dos materiais consideradas no modelo de simulação

Material	Permissividade elétrica relativa	Tangente de perdas elétricas	Condutividade (S/m)
Aço inox	1	-	1100000
Teflon	2,1	0,001	-
Ar	1,0006	0	0

Fonte: ANSYS [35].

Uma região de ar no formato de prisma com 150 lados é criada em torno da sonda, conforme pode ser visto na Figura 24 (a). O raio ( $R_{região}$ ) e o comprimento ( $L_{região}$ ) são cinco e dez vezes maior que o raio externo da sonda, respectivamente. Na Figura 24 (b) é mostrado uma imagem do modelo simulado da sonda.

Figura 24 – Modelo de simulação da sonda coaxial com terminação aberta montado no ANSYS HFSS. (a) Região de análise da simulação. (b) Modelo da sonda simulado

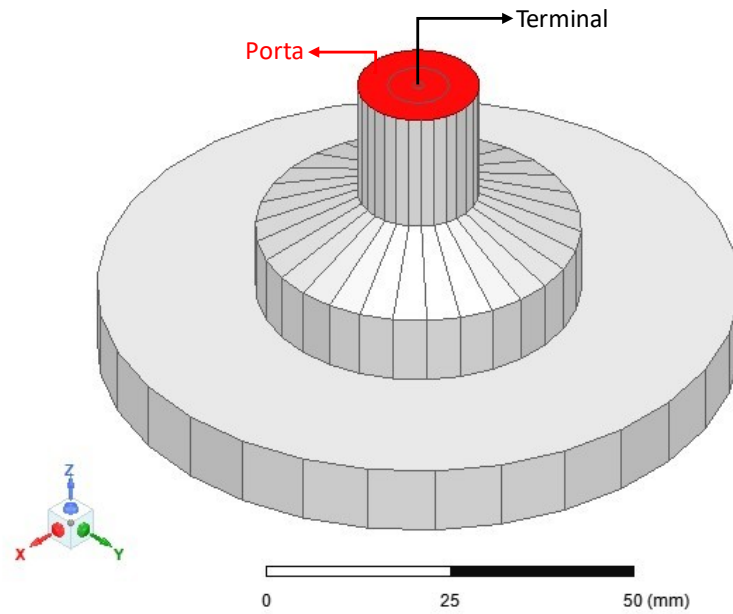


Fonte: elaborado pelo autor.

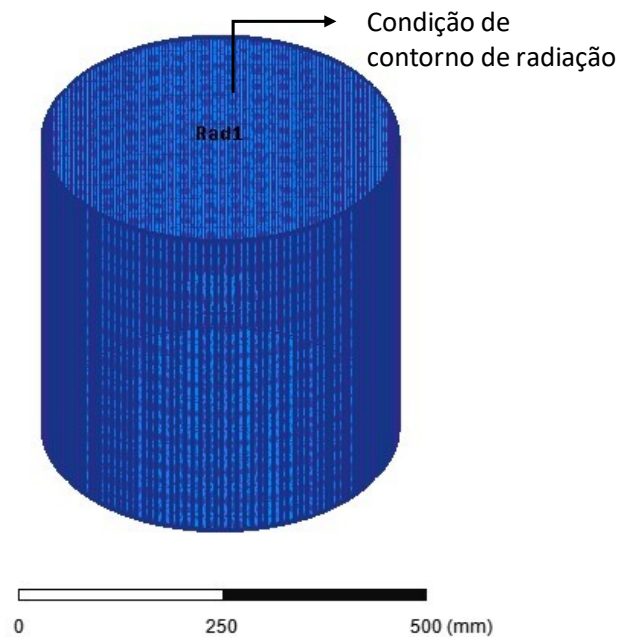
Na simulação, o modelo é excitado por meio do terminal de uma porta de onda com a tensão de 1V, como é mostrado na Figura 25 (a). Nas faces externas da região de análise é atribuída a condição de contorno de radiação para evitar que haja a reflexão de campo eletromagnético. Na Figura 25 (b) pode ser vista essa condição de

contorno.

Figura 25 – Condições de contorno. (a) Excitação. (b) Modelo da sonda simulado



(a)



(b)

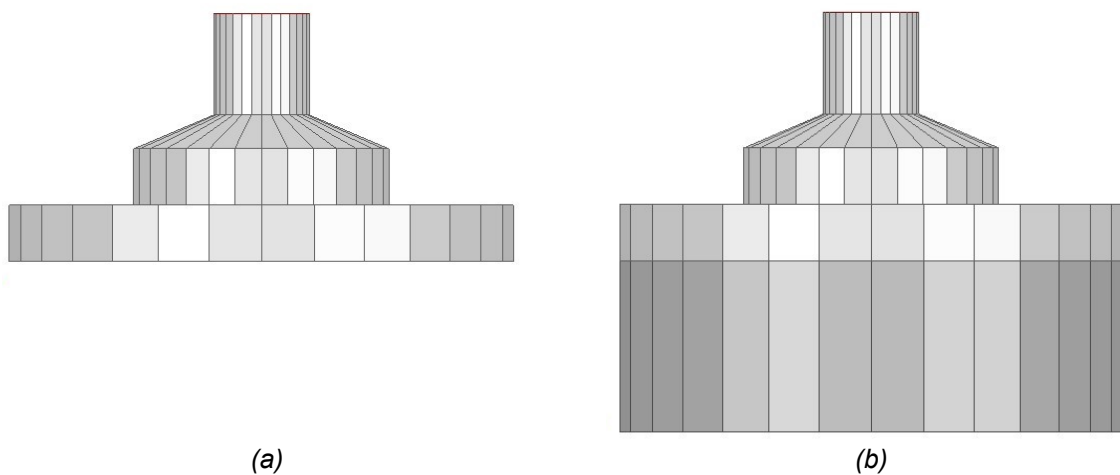
Fonte: elaborado pelo autor.

O processo de caracterização do modelo da sonda simulado é semelhante ao descrito no item 3.3.1 e tem como base no circuito equivalente.

### 3.3.4.2 Simulação de circuito aberto e curto-circuito para caracterizar o modelo simulado

Para obter o circuito equivalente do modelo simulado da sonda são executadas as simulações de circuito aberto e curto-circuito. Na simulação de circuito aberto a sonda está em contato apenas com o ar como pode ser observado na Figura 26 (a), ou seja, os terminais da sonda estão em aberto.

Figura 26 – Simulação para caracterizar o modelo da sonda. (a) Circuito aberto. (b) Curto-circuito



Fonte: elaborado pelo autor.

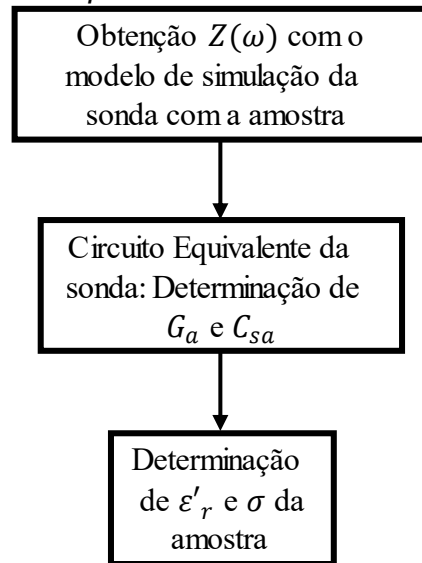
Já para simular o curto-circuito é criado um prisma de aço inox na superfície da sonda, conforme é mostrado na Figura 26 (b). Esse prisma possui 30 lados, o mesmo diâmetro externo da sonda e uma espessura de 3 cm.

As simulações de aberto e curto-circuito foram executadas para o intervalo de frequência de 20 Hz até 5 GHz com 63 amostras de frequência em uma escala logarítmica.

### 3.3.5 Procedimento por simulação para determinar os parâmetros dos materiais

Na Figura 27, verifica-se o fluxograma do procedimento para caracterizar uma amostra a partir dos resultados das simulações. Esse procedimento considera a metodologia de modelagem da sonda por circuito equivalente apresentada no item 3.3.1.

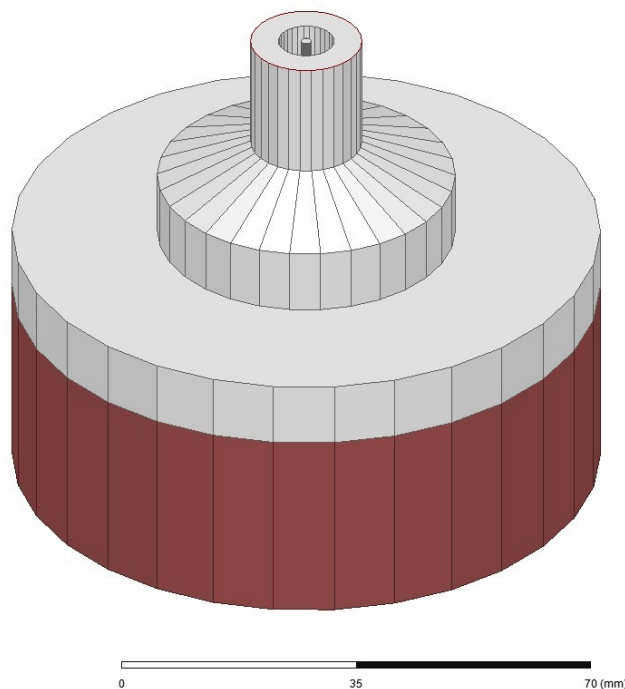
Figura 27 – Procedimento para caracterizar uma amostra por simulação



Fonte: elaborado pelo autor.

Para verificar esse procedimento foi criada uma amostra no formato de prisma com 30 lados, espessura de 3 cm, condutividade de 0,001 S/m e permissividade relativa de 15. Essa amostra possui o mesmo diâmetro externo da sonda e pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 – Modelo de simulação da sonda com amostra



Fonte: elaborado pelo autor.

*A simulação foi executada para uma varredura de frequências em escala logarítmica. O intervalo de frequências foi de 20 Hz até 200 KHz com 29 pontos observados.*

### 3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

*Este capítulo abordou duas metodologias que foram utilizadas na tentativa de caracterizar os parâmetros de condutividade e permissividade elétrica dos materiais. A primeira metodologia envolveu o uso de um conjunto de antenas com um VNA para caracterizar as amostras nas frequências entre 100 kHz e 20 MHz.*

*O segundo método de caracterização é baseado na utilização de uma sonda coaxial com terminação aberta. Neste método, além da sonda, uma ponte RLC foi usada para caracterizar seis amostras com baixa condutividade nas frequências entre 20 Hz e 200 kHz. Também foi abordado um modelo de simulação da sonda coaxial, elaborado pelo MEF com uma solução de onda completa.*

*No próximo capítulo, serão vistos e analisados os resultados obtidos no processo de medições e simulação.*

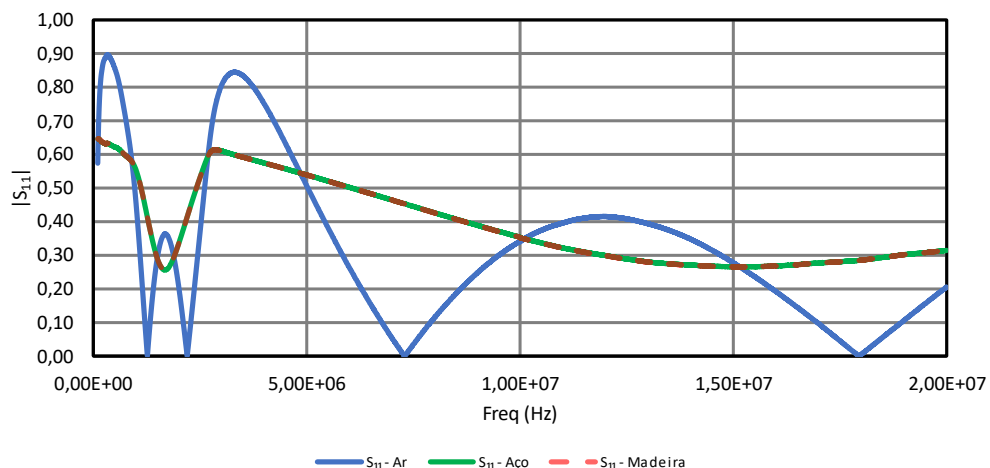
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o processo experimental de medição usando as antenas e a sonda coaxial. Além disso, também serão vistos os resultados do processo de simulação pelo MEF da sonda coaxial.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS COM ANTENAS

O ensaio para obtenção dos parâmetros eletromagnéticos de amostras usando antenas foi executado conforme descrito no item 3.2.3.

Figura 29 – Parâmetro de reflexão medido nas frequências de 100 kHz até 20 MHz



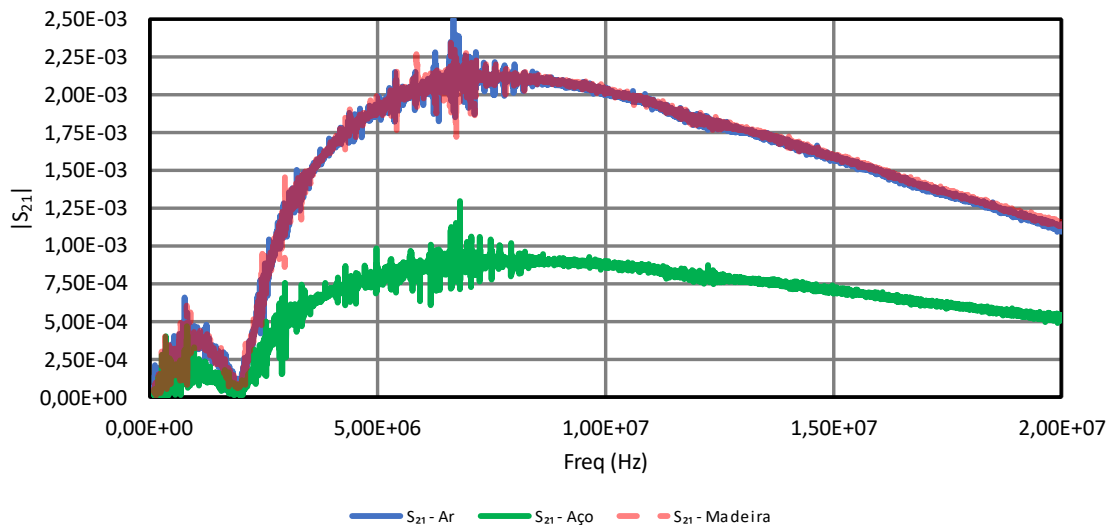
Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 29, pode-se observar o parâmetro de reflexão na entrada da antena medido no ensaio para a faixa de frequência de 100 kHz até 20 MHz. Nota-se que “ $S_{11} - Ar$ ” é a medida sem a amostra, ou seja, apenas ar; “ $S_{11} - Aço$ ” a medida para a placa de aço e “ $S_{11} - Madeira$ ” a medida para a placa de madeira. Verifica-se pelo gráfico que a inclusão das amostras de aço e de madeira resultou no mesmo valor de reflexão, não há uma diferença significativa que possa ser utilizada para obter os parâmetros das amostras aplicando o método descrito no item 3.2.1.

Na Figura 30 são apresentados os parâmetros de transmissão medidos para as frequências de 100 kHz até 20 MHz para as condições sem amostra ( $S_{21} - Ar$ ), com a placa de aço ( $S_{21} - Aço$ ) e com a placa de madeira ( $S_{21} - Madeira$ ).



Figura 30 – Parâmetro de transmissão medido nas frequências de 100 kHz até 20 MHz



Fonte: elaborado pelo autor.

Pelas medições da Figura 30, verifica-se que o parâmetro de transmissão obtido com a placa de madeira é praticamente idêntico ao medido sem a amostra. Alguma diferença é observada apenas com a placa de aço, o que era esperado devido à alta condutividade do material.

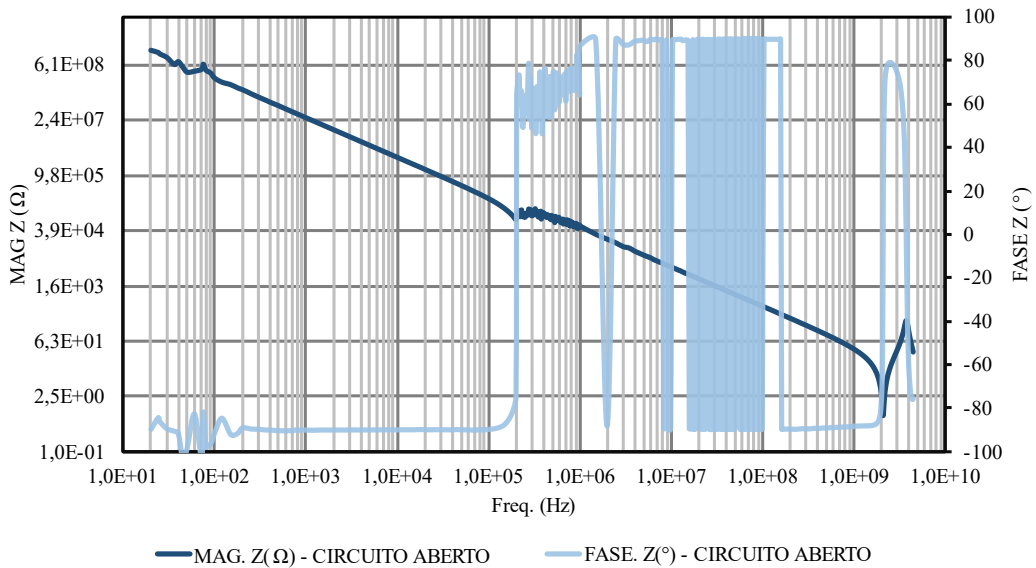
Todavia, como o interesse deste trabalho é caracterizar propriedades do solo, as quais, em determinadas condições, são semelhantes à da madeira, conforme foi apresentado no item 2.3, o método de caracterização por transmissão apresentado no item 3.2.2 não poderá ser utilizado na faixa de frequência de interesse (<1 MHz) para as condições apresentadas.

Então, como não foi possível caracterizar as propriedades dos materiais dielétricos na frequência de interesse com esse conjunto de antenas, adotou-se outra metodologia baseada na utilização de uma sonda coaxial de terminação aberta, como descrito no item 3.2.3.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA SONDA COAXIAL

As primeiras medidas foram realizadas com o objetivo de caracterizar a sonda coaxial. Com esse intuito e conforme descrito no procedimento apresentado no item 3.3.2, foram executados os ensaios de circuito aberto e curto-circuito com a sonda coaxial para a faixa de frequência de 20 Hz até 4,5 GHz usando a ponte RLC e o VNA.

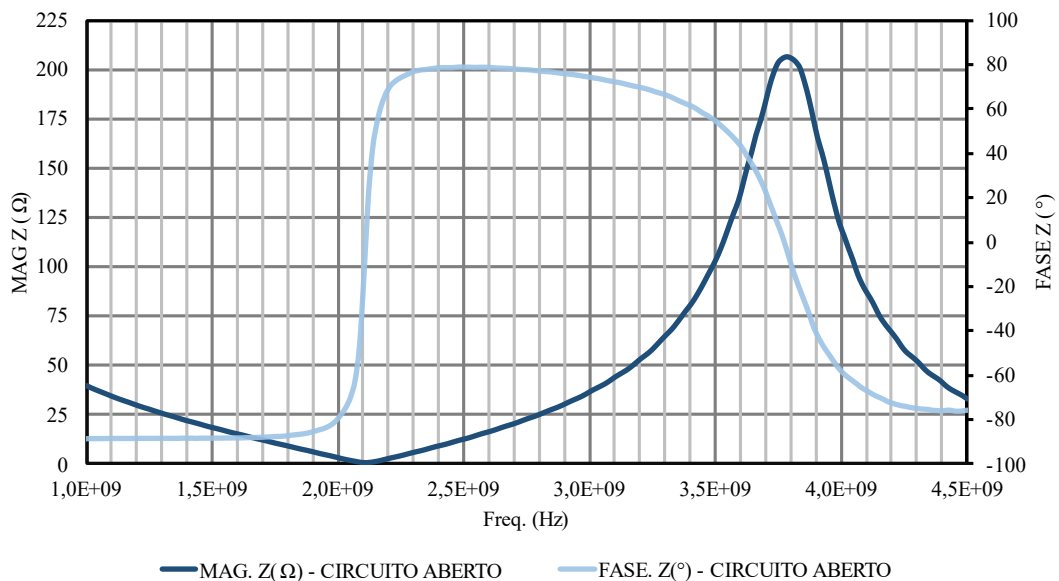
Figura 31 – Magnitude e fase da impedância de circuito aberto da sonda coaxial de 20 Hz até 4,5 GHz (escala logarítmica)



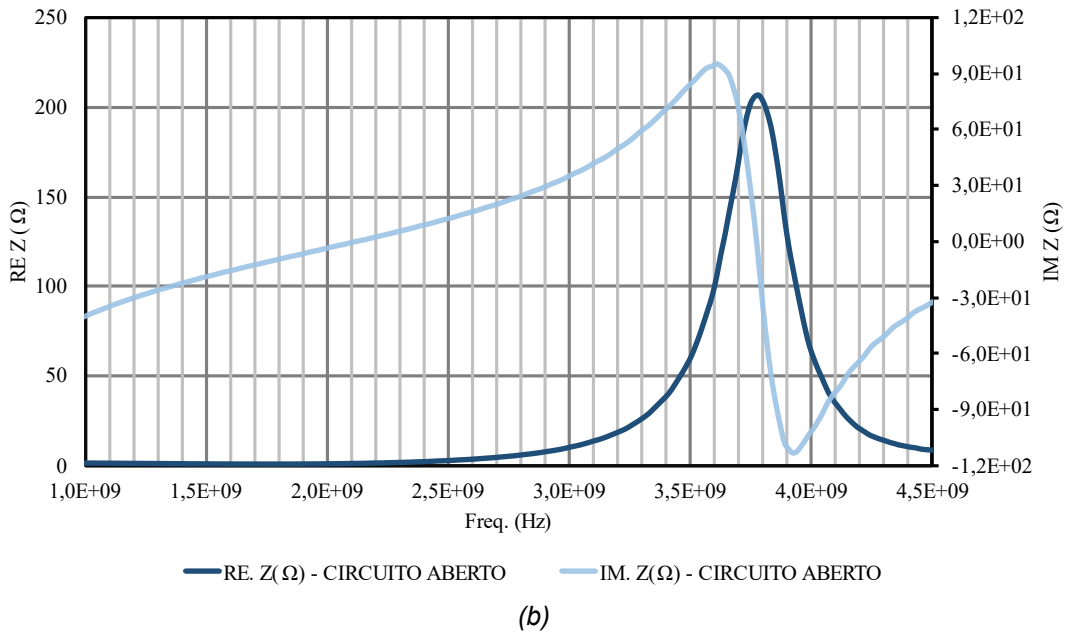
Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 31 pode ser visto um gráfico em escala logarítmica com as medidas de magnitude e fase da impedância da sonda coaxial em circuito aberto para a faixa de frequência de 20 Hz até 4,5 GHz. Nota-se pela fase que a sonda em aberto possui um comportamento capacitivo até aproximadamente 90 kHz. Logo, a modelagem por circuito equivalente pode apresentar uma boa resposta para até esta frequência.

Figura 32 – Impedância de circuito aberto da sonda coaxial de 1 GHz até 4,5 GHz. (a) Magnitude e fase. (b) Resistência e reatância.



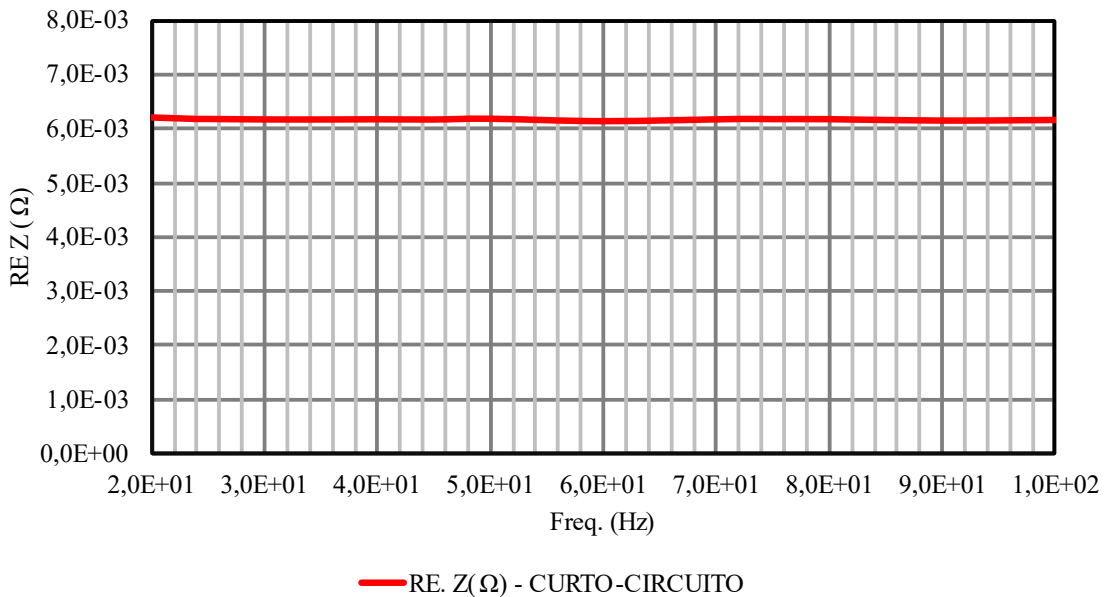
(a)



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 32, são mostrados gráficos da impedância da sonda em circuito aberto para a faixa de frequência de 1 GHz até 4,5 GHz. Por meio desses gráficos, percebe-se que há uma frequência de ressonância em aproximadamente 3,76 GHz, o que servirá para modelar a sonda, conforme descrito no item 3.3.1.

Figura 33 – Resistência da sonda coaxial de 20 Hz até 100 Hz.



Fonte: elaborado pelo autor.

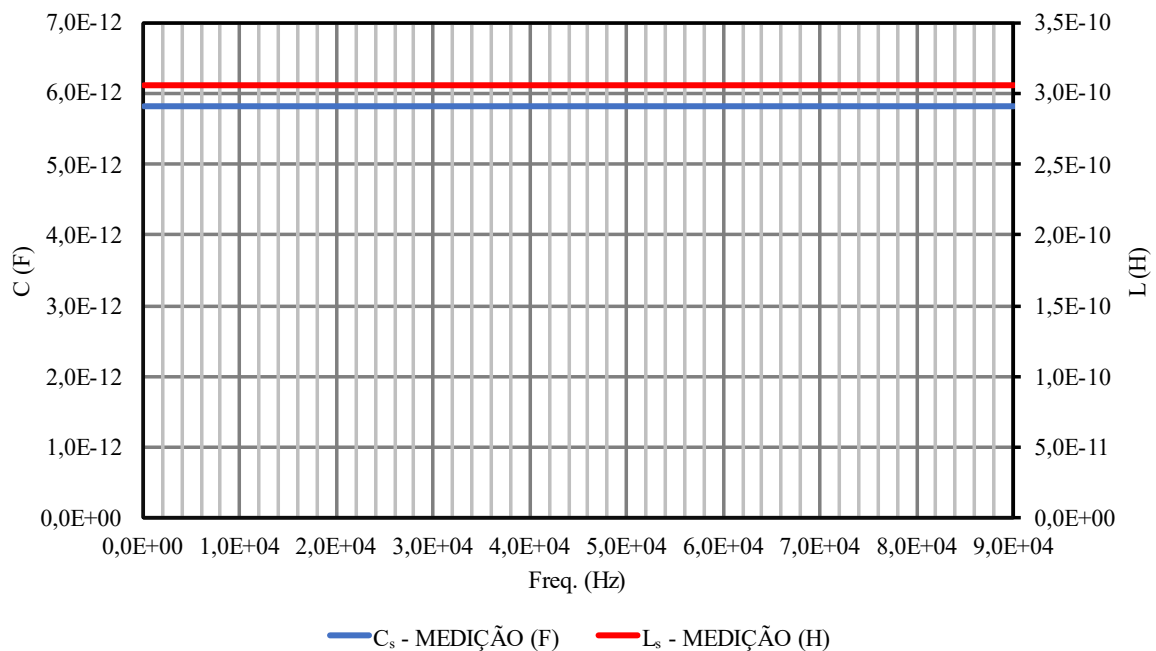
No ensaio de curto-circuito, como visto no item 3.3.1, buscou-se identificar a

resistência interna da sonda para o menor valor de frequência mensurável. No gráfico da Figura 33, observa-se os valores de resistência obtidos para a sonda no ensaio de curto-circuito para a faixa de frequência de 20 Hz até 100 Hz.

Conforme observado na Figura 33, a resistência média de curto-circuito da sonda coaxial é de aproximadamente 6,18 m $\Omega$ . Com esses dados e aplicando a técnica de modelagem apresentada no item 3.3.1, são obtidos os parâmetros do circuito equivalente da sonda coaxial em circuito aberto. Assim, considerando o circuito da Figura 15, encontram-se:

- $R_S = 6,18 \text{ m}\Omega$ ;
- $C_S$  e  $L_S$  variam de acordo com a frequência. Por isso, adota-se valores médios conforme o gráfico da Figura 34.

Figura 34 – Capacitância e indutância da sonda em circuito aberto para as frequências de 20 Hz até 90 kHz

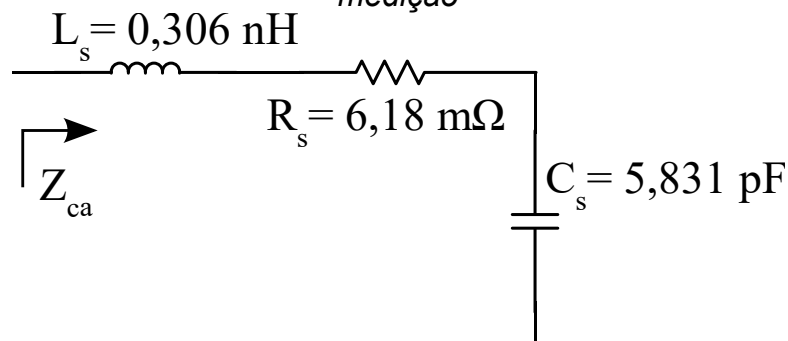


Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, foi assumido, em média, o valor de  $C_S = 5,831 \text{ pF}$  e  $L_S = 0,306 \text{ nH}$ . Isso contribuirá para reduzir o ruído na medição dos parâmetros das amostras. Assim, o circuito equivalente a ser usado está representado na Figura 35.

Com o procedimento de caracterização da sonda coaxial concluído e com o circuito equivalente apresentado na Figura 35, o procedimento para caracterizar as amostras poderá ser executado conforme o descrito no item 3.3.5.

Figura 35 – Circuito equivalente da sonda coaxial em circuito aberto obtido por medição



Fonte: elaborado pelo autor.

Após várias análises e medidas, foram selecionadas algumas amostras que estão de acordo com os objetivos deste trabalho, que é a caracterização de materiais com vistas à modelagem de sistemas de aterramento. Desta forma, as amostras escolhidas, descritas no item 3.3.3.1, foram as seguintes:

- Papel;
- Madeira;
- Areia;
- Terra;
- Argila;
- Cimento.

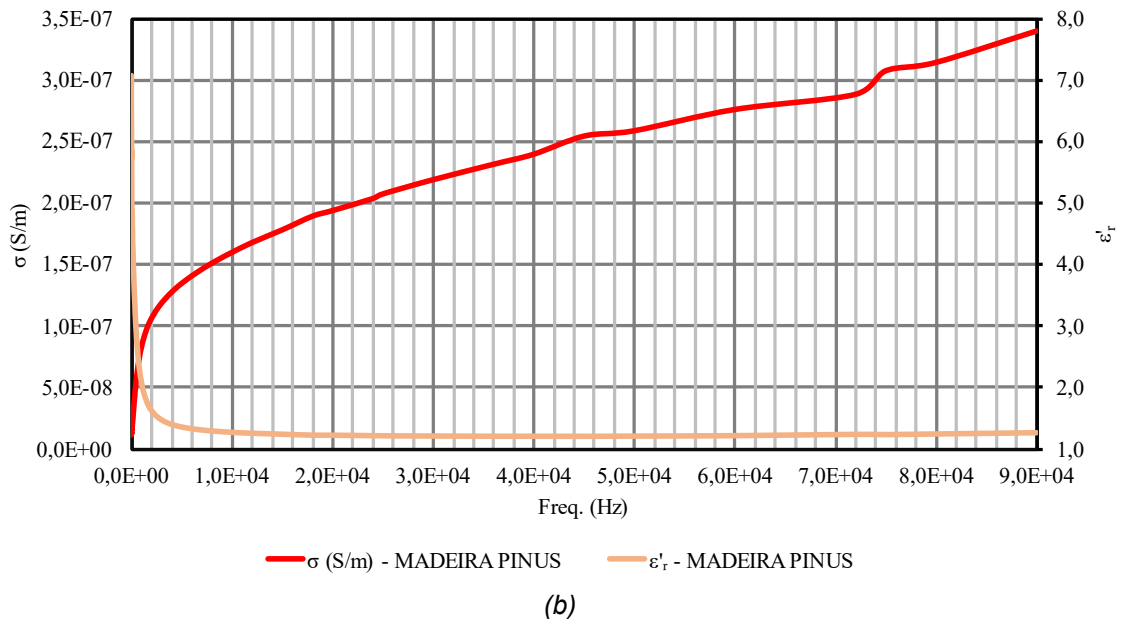
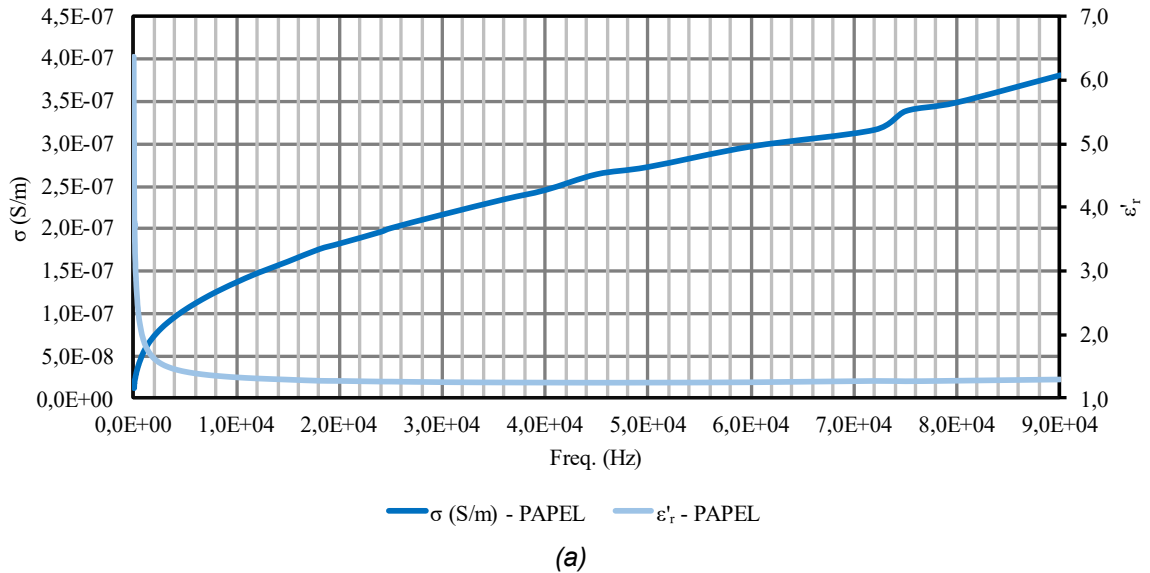
#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Com a ponte RLC e a sonda, foram feitas medições de impedância das amostras descritas no item 3.3.3.1. De posse dos valores de impedância medidos nessas amostras e considerando o circuito equivalente da sonda apresentado na Figura 35, aplica-se o equacionamento abordado no item 3.3.1 para obter os valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa de cada uma das amostras.

Na Figura 36, podem ser observados os gráficos com os valores da condutividade e permissividade elétrica relativa obtidos a partir das medições nas amostras de papel e madeira para o intervalo de frequências de 20 Hz até 90 kHz. Nesses gráficos, nota-se que nas amostras de papel e de madeira, a condutividade elétrica obtida aumenta com o aumento da frequência, enquanto, a permissividade elétrica diminui. Essa característica está de acordo com os valores descritos em diversas medições de materiais dielétricos presentes na literatura [34] [19] e descritas

no item 2.3.

**Figura 36 – Valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidos a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz. (a) Papel. (b) Madeira.**

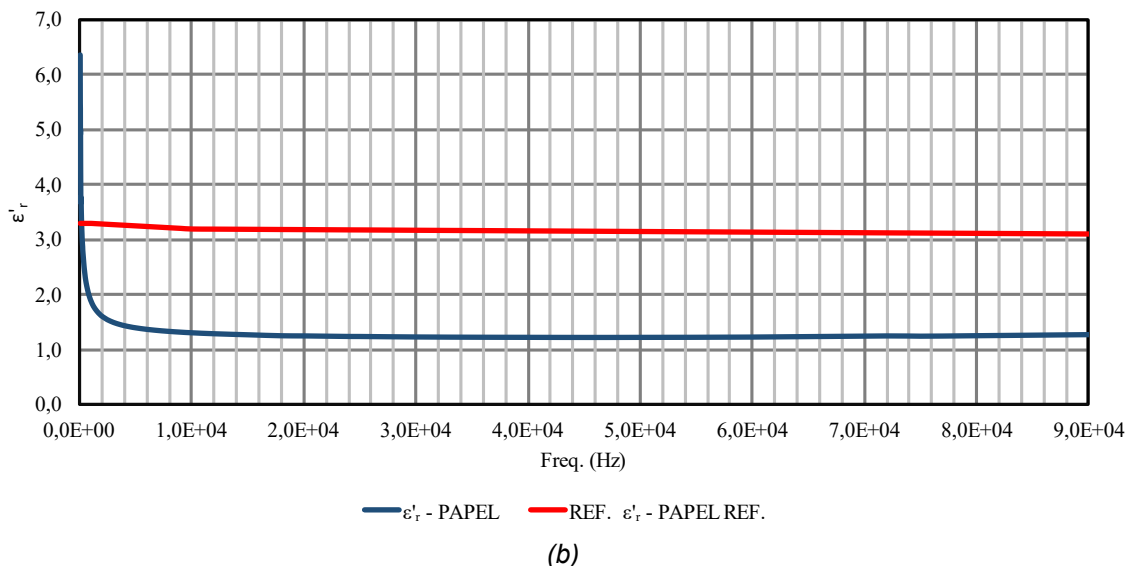
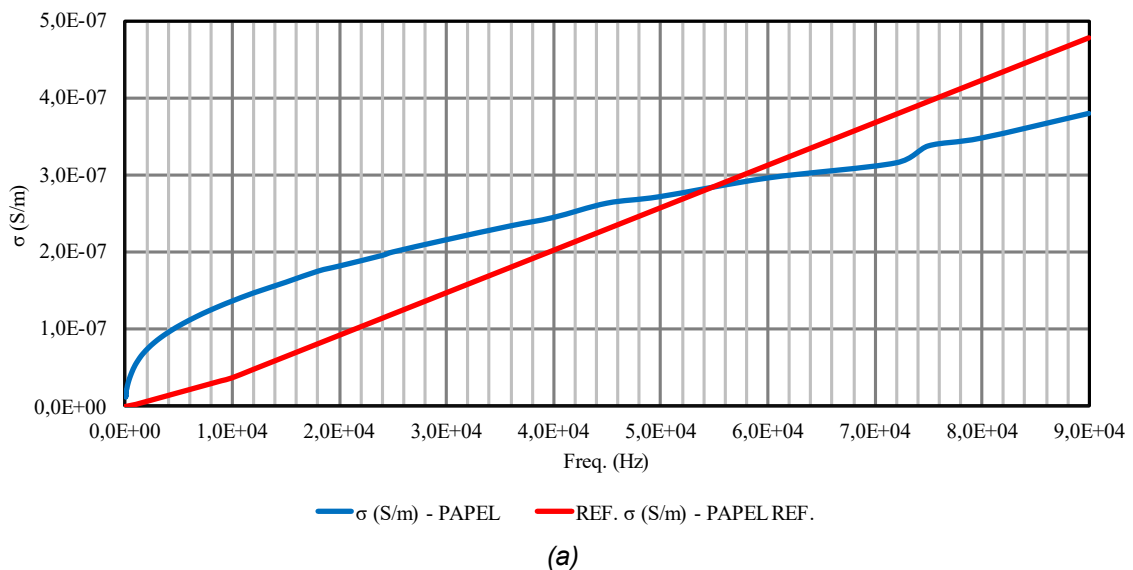


Fonte: elaborado pelo autor.

Nos gráficos da Figura 37, são apresentados os valores das propriedades dielétricas do papel obtidos por meio da medição, em comparação com os valores obtidos por [19] e apresentados no item 2.3. A amostra de papel medida, conforme descrito no item 3.3.3.1, consiste em um bloco de folhas com densidade de  $0,75 \text{ g/cm}^3$  em condições ambientes, o que significa que a amostra pode conter umidade. Por outro lado, em [19], as medidas foram realizadas em papel com densidade de  $0,8$

$g/cm^3$ , previamente seco em forno. Levando em conta a presença de umidade, espera-se que a amostra apresente uma condutividade e permissividade elétrica maiores do que os valores encontrados para uma amostra de papel seco em forno. O que é confirmado nas medidas apresentadas nos gráficos.

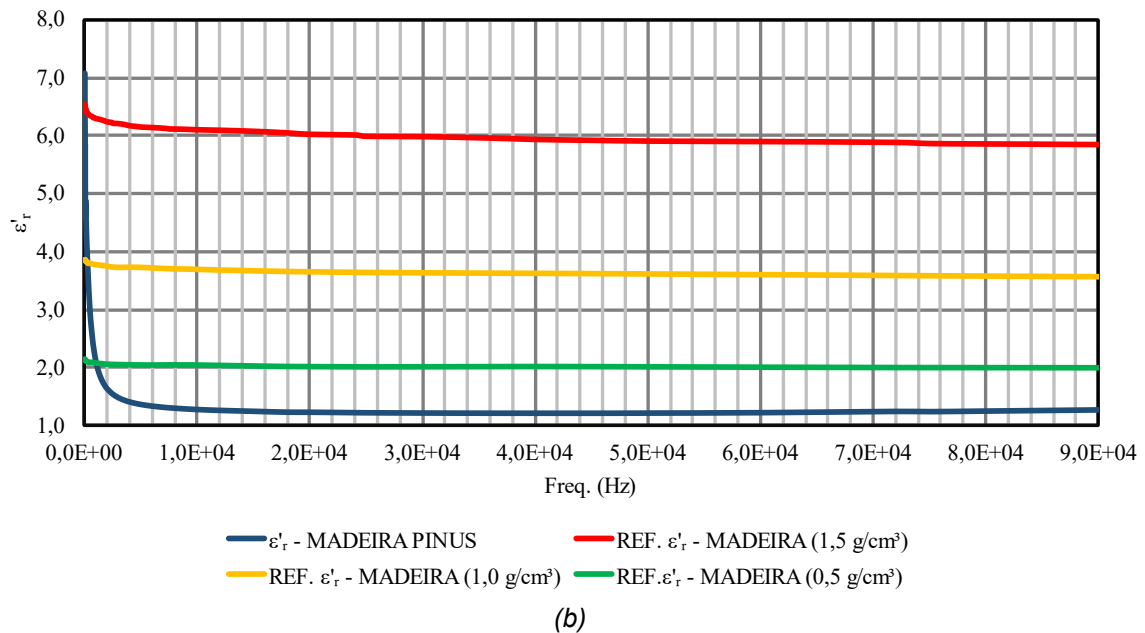
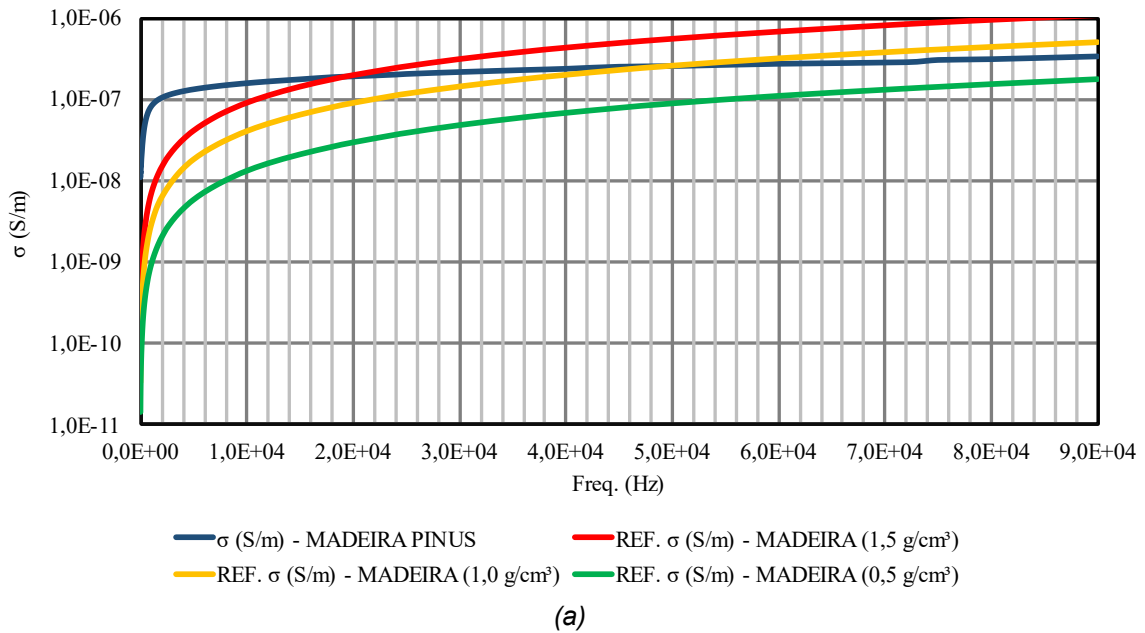
Figura 37 – Comparação das propriedades dielétricas do papel medidas para 20 Hz até 90 kHz com os valores obtidos por [19]. (a) Condutividade. (b) Permissividade elétrica relativa



Fonte: elaborado pelo autor com base em [19].

Além disso, o acentuado declínio, ao longo da frequência, do valor da permissividade relativa obtido por meio do processo de medição pode estar relacionado à limitação de tensão elétrica do equipamento utilizado, pois no ensaio foi utilizada uma tensão de 1 V.

Figura 38 – Comparação das propriedades dielétricas da madeira de pinus medidas para 20 Hz até 90 kHz com os valores obtidos por [19]. (a) Condutividade. (b) Permissividade elétrica relativa

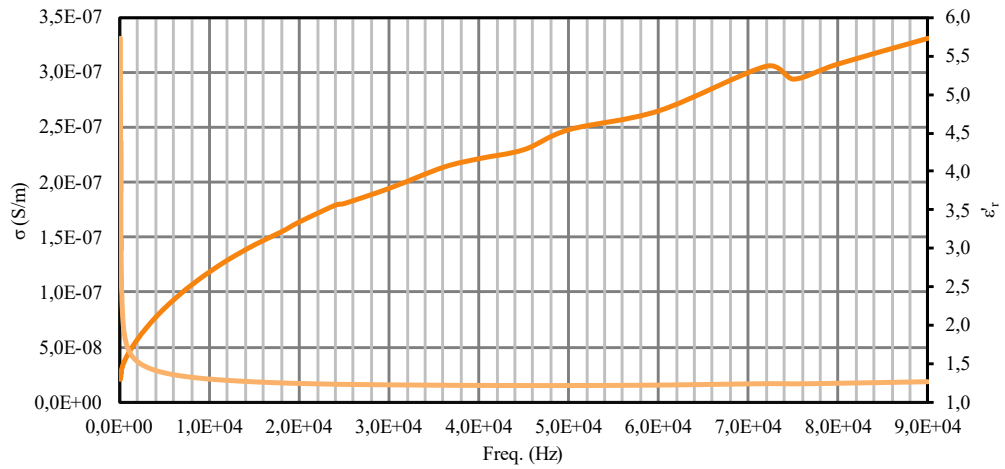


Fonte: elaborado pelo autor com base em [19].

Na Figura 38, são apresentados gráficos que comparam os valores de condutividade e permissividade medidos com aqueles obtidos por [19], descritos no item 2.3, referentes à madeira seca em forno com densidade de 0,5 g/cm<sup>3</sup> até 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Observa-se nos gráficos um padrão consistente nas curvas, apesar das possíveis discrepâncias devido às variações de umidade e densidade.

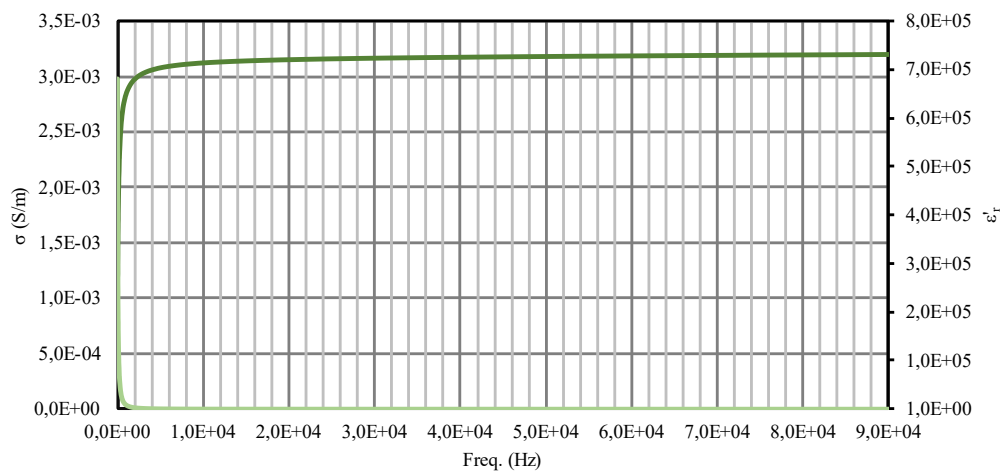


Figura 39 – Valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidas a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz. (a) Areia. (b) Terra. (c) Argila. (d) Cimento.



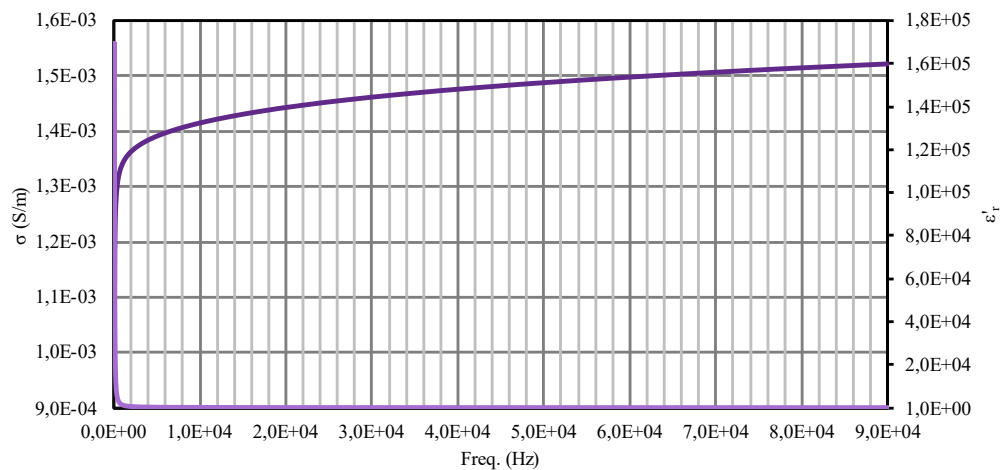
—  $\sigma$  (S/m) - AREIA —  $\epsilon'_r$  - AREIA

(a)



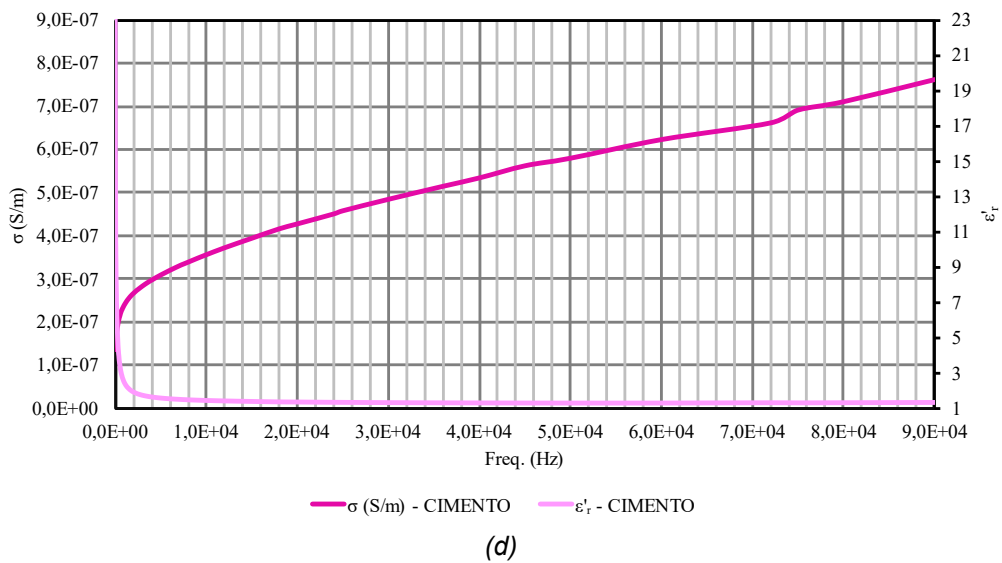
—  $\sigma$  (S/m) - TERRA —  $\epsilon'_r$  - TERRA

(b)



—  $\sigma$  (S/m) - ARGILA —  $\epsilon'_r$  - ARGILA

(c)



Na Figura 39, são apresentados os gráficos com os valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidos nas medições das amostras de areia, terra, argila e cimento. Essas amostras são descritas no item 3.3.3.1.

Algumas das medições apresentadas na Figura 39 correspondem a materiais encontrados no solo, tais como areia, terra e argila. No caso das medidas obtidas para a areia seca, apresentadas no gráfico da Figura 39 (a), em frequências inferiores a 100 Hz, a condutividade está na faixa de até  $10^{-7}$  S/m, e a permissividade elétrica relativa é aproximadamente 6. Estes valores estão em concordância com os obtidos por outros autores em [36] e apresentados no item 2.3.

As medições obtidas para a terra e a argila, mostradas nos gráficos da Figura 39 (a) e (b), respectivamente, revelam que os valores de condutividade estão na faixa de até  $10^{-3}$  S/m, correspondendo a uma resistividade de 1000  $\Omega.m$  em baixas frequências. Esses valores estão dentro das expectativas para esse tipo de material [3] [9] [18]. Quanto aos valores de permissividade elétrica relativa, eles alcançam até  $10^6$  nas medidas realizadas em frequências menores que 100 Hz, em linha com estudos anteriores realizados por autores como Scott, Longmire, Smith, Visacro e Alípio [37] [38] [18]. Esse alto valor de permissividade elétrica relativa é atribuído, por esses autores, à polarização intensa na interface entre a amostra e a sonda metálica. Eles apontam que essa polarização pode interferir na medição da permissividade elétrica real do solo, uma vez que ocorre apenas na interface entre o solo e o eletrodo de medição, não abrangendo toda a amostra. Assim, alguns modelos analíticos, apresentados no item 2.3 e desenvolvidos empiricamente, são propostos para corrigir

as medições da permissividade elétrica do solo.

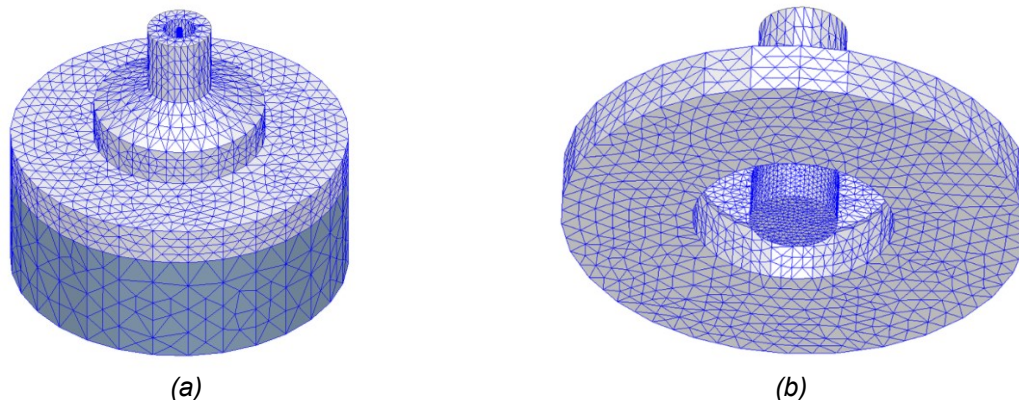
O Anexo A deste trabalho contém as tabelas com todos os valores de impedância medidos na sonda coaxial com as diferentes amostras estudadas para o intervalo de 20 Hz até 90 kHz. Também podem ser vistos nessas tabelas os valores dos parâmetros calculados com base nas impedâncias medidas. Já no Anexo B, podem ser vistos gráficos em escala logarítmica que comparam os valores dos parâmetros dielétricos de cada uma das amostras medidas.

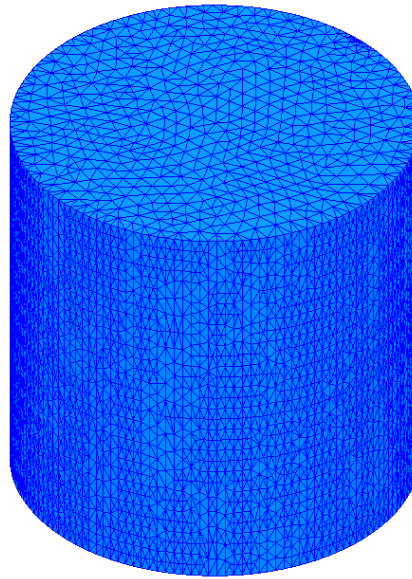
Após determinar os valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa, observou-se que, para medições de até 90 kHz e considerando a faixa de condutividade das amostras analisadas, a resistência interna da sonda ( $R_S$ ) e a indutância da sonda ( $L_S$ ) possuem valores praticamente desprezíveis na determinação da condutância e capacitância da sonda com amostra, vide as equações (25) e (26). Portanto, um circuito de admitância simples, composto por uma capacitância em paralelo com uma condutância, também seria capaz de obter os parâmetros de condutividade e permissividade elétrica das amostras com uma precisão adequada.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DA SONDA COAXIAL E DA AMOSTRA POR SIMULAÇÃO

Por meio de um processo de simulação com MEF, conforme foi descrito nos itens 3.3.4 e 3.3.5, buscou-se caracterizar a sonda e a amostra. Para isso, foram realizadas três simulações: a sonda em circuito aberto, a sonda em curto-circuito e a sonda com uma amostra de material com propriedades conhecidas.

Figura 40 – Malha de elementos finitos gerada na simulação da sonda em curto-circuito. (a) Sonda. (b) Superfície inferior da sonda. (c) Região de análise





(c)

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 40, pode ser observada a malha de elementos finitos gerada no processo de simulação da sonda em curto-circuito, sendo em (a) a malha de elementos finitos na sonda e no prisma de aço inox, (b) a malha de finitos na superfície inferior da sonda e (c) a malha gerada sobre superfície da região de análise.

Tabela 10 – Detalhes sobre as simulações executadas

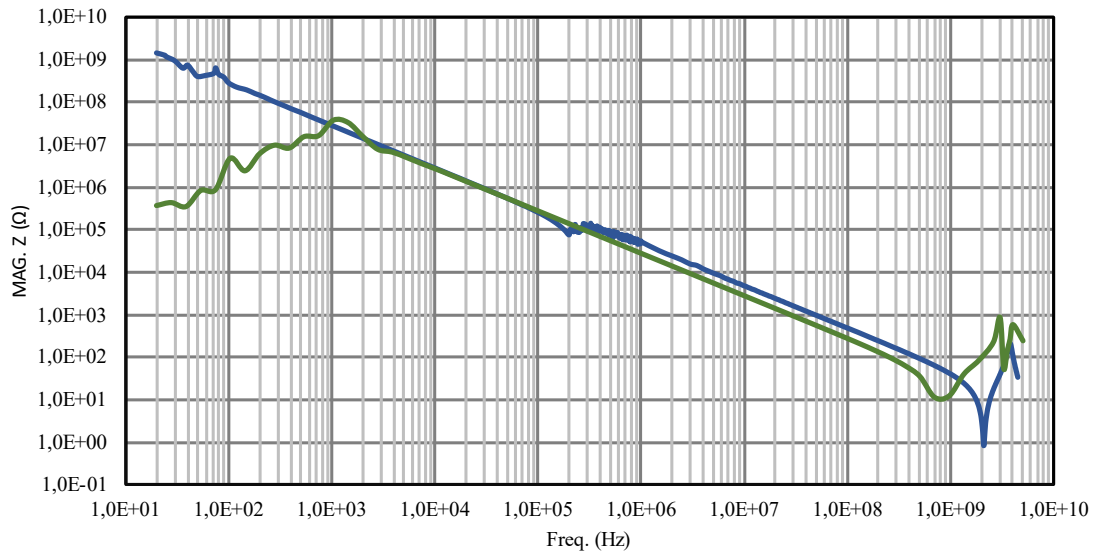
Simulação	Nº de elementos de malha analisados
Sonda em circuito aberto	305742
Sonda em curto-circuito	305744
Sonda com amostra	325051

Fonte: Elaborado pelo autor.

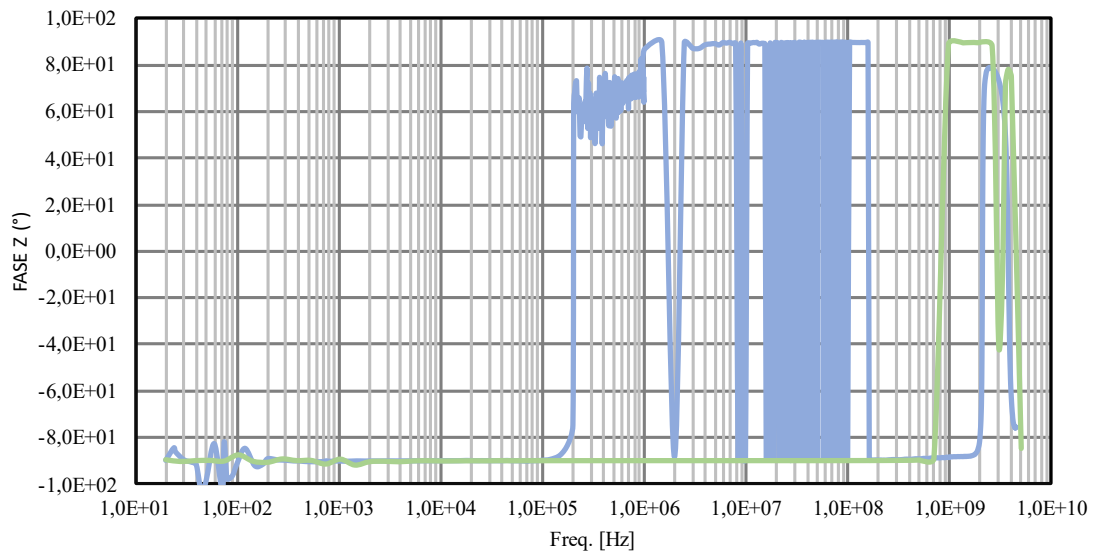
Na Tabela 10 é apresentado o número de elementos finitos analisados em cada simulação. As simulações da sonda em circuito aberto e com a amostra possuem uma malha de elementos finitos semelhante àquela mostrada na Figura 40.

Na Figura 41 são mostrados dois gráficos que comparam os valores de magnitude e fase da impedância medida e simulada com a sonda em circuito aberto. Nota-se, pelo gráfico da Figura 41 (a), que os valores da magnitude da impedância em circuito aberto da sonda obtidos por simulação diferem dos valores medidos, especialmente, nas frequências entre 20 Hz e 4 kHz e entre 300 MHz e 4,5 GHz. Ao analisar o valor da fase obtido por simulação, mostrado no gráfico da Figura 41 (b), observa-se que o modelo simulado da sonda mantém um comportamento capacitivo até aproximadamente 500 MHz, o que também difere dos dados medidos.

Figura 41 – Impedância de circuito aberto da sonda coaxial de 20 Hz até 4,5 GHz obtida por simulação e por medição (escala logarítmica). (a) Magnitude. (b) Fase.



(a)

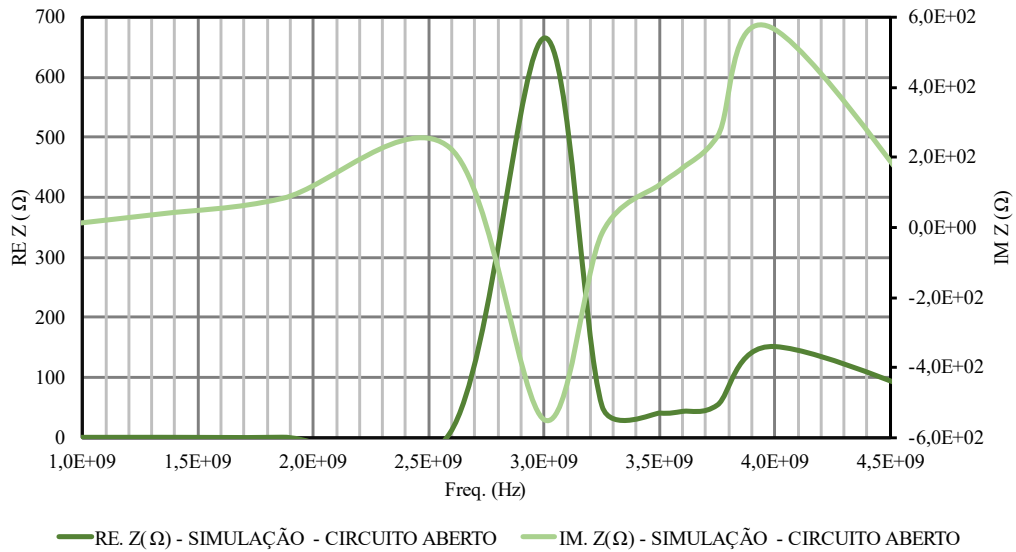


(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

No gráfico da Figura 42 são mostrados os valores de resistência e de reatância obtidos com a simulação da sonda em circuito aberto. Observa-se que a frequência de ressonância do modelo simulado é de aproximadamente 2,59 GHz, valor este diferente do valor 3,76 GHz medido no modelo real da sonda.

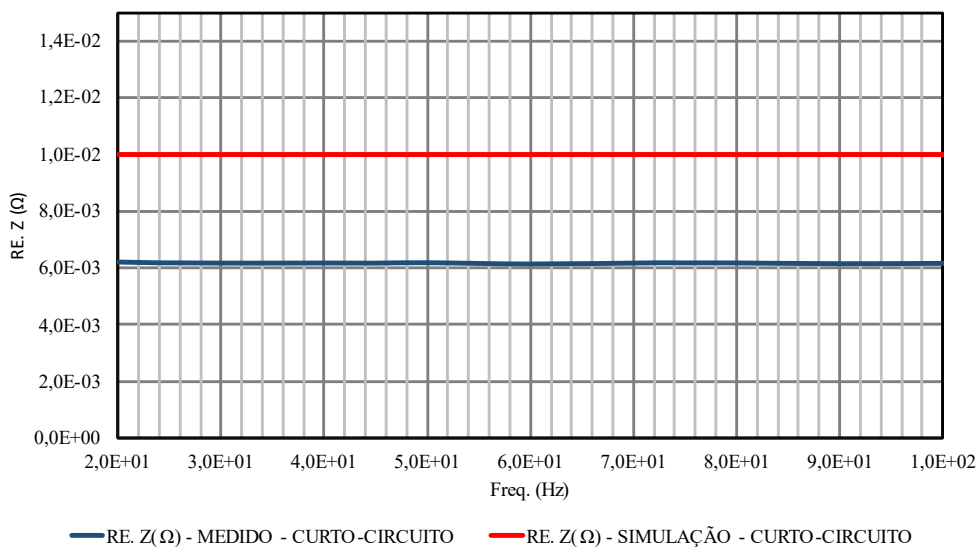
**Figura 42 – Resistência e reatância de circuito aberto da sonda coaxial de 1 GHz até 4,5 GHz obtida por simulação**



Fonte: elaborado pelo autor.

No gráfico da Figura 43 observa-se a resistência de curto-circuito da sonda obtida por simulação e por medição para o intervalo de frequências de 20 Hz até 100 Hz. Com base nos resultados obtidos por simulação e seguindo a formulação apresentada no item 3.3.1, obtém-se o circuito equivalente da sonda para circuito aberto, o qual pode ser visto na Figura 44.

**Figura 43 – Resistência de curto-circuito da sonda coaxial de 20 Hz até 100 Hz obtida por simulação e por medição**

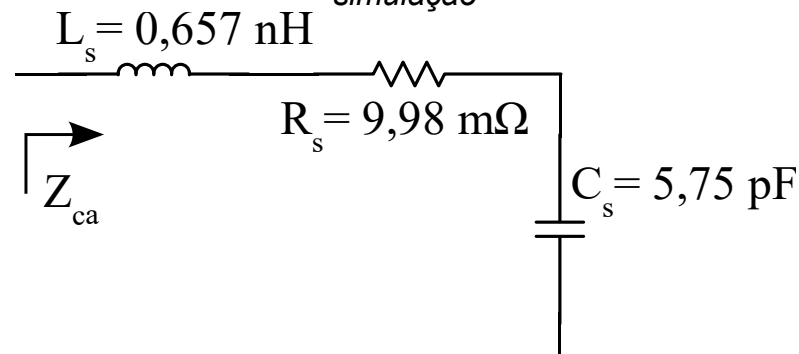


Fonte: elaborado pelo autor.

A simulação também foi executada considerando uma amostra de um material

com propriedades conhecidas e constantes ao longo da frequência, conforme apresentado no item 3.3.5. Ao aplicar o método descrito no item 3.3.1, considerando o circuito equivalente da Figura 44, estima-se a condutividade e a permissividade elétrica relativa mostradas na Figura 45.

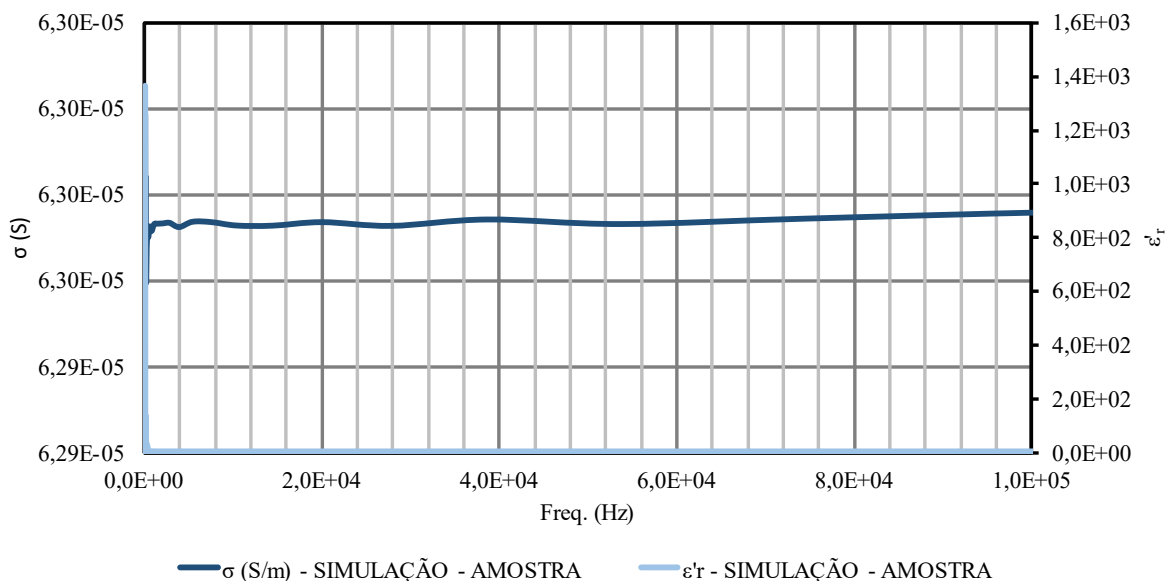
Figura 44 – Circuito equivalente da sonda coaxial em circuito aberto obtido por simulação



Fonte: elaborado pelo autor.

Com a aplicação do método do circuito equivalente, esperava-se encontrar os valores da condutividade elétrica e da permissividade elétrica relativa da amostra iguais aos configurados na simulação, ou seja,  $\epsilon'_r = 15$  e  $\sigma = 0,001 \text{ S/m}$ . Entretanto, os resultados obtidos por meio da simulação são bem diferentes dos valores configurados, como pode ser observado na Figura 45.

Figura 45 – Condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidas de uma amostra simulada para as frequências de 20 Hz até 100 kHz



Fonte: elaborado pelo autor.

*O modelo simulado da sonda demonstra um comportamento comparável ao modelo real, como pode ser visto nos gráficos da Figura 41 e da Figura 43. Porém, os circuitos equivalentes obtidos a partir dos dados de simulação e de medição da sonda são diferentes. Essa discrepância pode estar relacionada às dimensões e características construtivas da parte interna da sonda. O formato e as medidas da sonda, descritos na Figura 11, são apenas uma estimativa. Além disso, as propriedades dos materiais que constituem a sonda consideradas no modelo de simulação podem também diferir do modelo real.*

*Sendo assim, é importante mencionar que a solução de onda completa por MEF do ANSYS HFSS pode apresentar problemas de precisão [35]. Em análises de baixa frequência, as características do campo eletromagnético podem se tornar quase estáticas, resultando em comprimentos de onda muito longos em comparação com o tamanho do domínio do problema. Nesse tipo de situação, o software pode ter dificuldades em lidar com uma escala de valores muito grande, comprometendo os resultados. Isso pode explicar a divergência observada no gráfico da Figura 41 (a) no intervalo de 20 Hz até 4 kHz. Os autores em [39] e em [40] abordam a imprecisão da análise em baixa frequência usando uma solução de onda completa com MEF e indicam a utilização de métodos híbridos para tentar contornar o problema.*

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

*Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos com o processo de medição e simulação utilizando o conjunto de antenas e a sonda coaxial.*

*No caso da caracterização das propriedades dielétricas com as antenas, os resultados preliminares demonstraram que a configuração utilizada não consegue captar alterações significativas no sinal eletromagnético refletido e transmitido por amostras de materiais com baixa condutividade. De forma que uma segunda metodologia de obtenção das propriedades eletromagnéticas dos materiais foi investigada utilizando uma sonda coaxial.*

*Nessa segunda metodologia, por meio dos valores medidos nos ensaios de circuito aberto, notou-se uma alteração significativa no comportamento da sonda coaxial para frequências acima de 90 kHz. Os gráficos com os valores de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa obtidos por meio do processo*



*de medição foram apresentados nesse capítulo. Ao analisar esses valores, verificou-se uma semelhança entre os dados obtidos nas medições e os valores apresentados por outros autores utilizados como referência. Nas medidas de algumas amostras de materiais que compõem o solo, observou-se um forte efeito da polarização, o que é descrito pelas referências.*

*No entanto, os resultados obtidos com o modelo de simulação da sonda coaxial divergiram bastante dos valores obtidos nas medições do modelo real. Isso pode ser decorrente de falhas na modelagem das características internas da sonda devido à falta de dados e da possível limitação do software utilizado para analisar a estruturas na faixa de 20 Hz até 4 kHz.*

*No próximo capítulo, serão apresentadas as considerações finais deste trabalho, juntamente com sugestões de pontos que podem ser melhorados em trabalhos futuros para aprimorar os resultados desta pesquisa.*

## 5 CONCLUSÃO

*Neste trabalho, buscou-se caracterizar as propriedades dielétricas de materiais não magnéticos e com baixo valor de condutividade. Foram analisados dois métodos de medição com o objetivo de utilizá-los futuramente para caracterizar as propriedades do solo em frequências abaixo de 1 MHz.*

*Os resultados indicam que a caracterização das propriedades dielétricas de materiais apresenta desafios significativos, especialmente em frequências baixas e para amostras com baixa condutividade. Enquanto o método do espaço livre usado neste trabalho com antenas se mostrou inviável na faixa de frequência de 100 kHz a 20 MHz, devido à sua incapacidade de identificar alterações nos materiais dielétricos, o uso da sonda coaxial se mostrou eficaz para frequências de 20 Hz a 90 kHz. Esse segundo método possibilitou a detecção de mudanças mesmo em materiais com baixa condutividade, como a madeira seca, conforme ilustrado na Figura 36.*

*A modelagem da sonda coaxial com base em um circuito equivalente demonstrou ser uma abordagem promissora, proporcionando uma boa resposta no intervalo de frequências estudado. Isso permitiu estimar a condutividade elétrica e a permissividade elétrica relativa de diversas amostras de materiais, com resultados coerentes com estudos anteriores.*

*É importante ressaltar, no entanto, que foram identificadas limitações nos métodos estudados. A mudança abrupta no comportamento da impedância medida acima de 90 kHz ao medir a sonda coaxial em circuito aberto indica uma restrição na modelagem por circuito equivalente, enquanto a divergência dos resultados obtidos em baixas frequências pelo software baseado em MEF aponta para desafios de desenvolver um modelo de simulação que consiga descrever o comportamento da sonda adequadamente.*

*Conclui-se que, apesar das limitações encontradas, os resultados apresentam um caminho a ser explorado no campo da caracterização de materiais com baixa condutividade. O que poderá contribuir futuramente com as pesquisas desenvolvidas no Gemco, principalmente, na área de aterramento elétrico.*

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

*Os resultados promissores e as dificuldades encontradas no desenvolvimento*

*deste trabalho indicam as áreas de pesquisa que podem ser exploradas. Sugerem-se os seguintes pontos para aprimorar a caracterização dos parâmetros dos materiais utilizando a sonda coaxial:*

- A realização de novas medidas com o objetivo de caracterizar melhor a sonda coaxial, especialmente para frequências acima de 90 kHz. Pode-se considerar a utilização de outros instrumentos de medição além do VNA utilizado neste trabalho.*
- A medição das propriedades dos materiais utilizando um par de sondas coaxiais idênticas. Ao colocar as sondas de forma oposta e uma amostra de material entre elas, é possível medir, além da impedância de entrada, a impedância de transferência, a qual poderá ser utilizada também para caracterizar as propriedades da amostra.*
- A análise de possíveis interferências nas medidas, prestando atenção às interfaces de contato entre a sonda e as amostras. Além disso, é importante controlar as condições de umidade, compactação e dimensões das amostras.*
- O aperfeiçoamento do modelo de simulação buscando resolver os problemas da modelagem em baixa frequência. Esse modelo aperfeiçoado seria muito útil na compreensão fenômenos específicos, como a influência da espessura da amostra e a análise de amostras compostas por mais de um material;*
- A melhoria dos resultados da sonda nas frequências mais elevadas realizando a calibração do VNA com a sonda. Para isso, seria necessário desenvolver uma estrutura com impedância de  $50 \Omega$ , constante no intervalo de frequência de interesse, que pudesse ser conectada à superfície da sonda. Essa estrutura poderia ser, por exemplo, uma cavidade ressonante ou um tipo de circuito impresso;*
- O estudo mais aprofundado das propriedades do solo com foco no efeito da polarização. Isso incluiria análises detalhadas sobre fatores como umidade do solo, frequência e intensidade do sinal durante o processo de medição.*

## REFERÊNCIAS

- [1] J. V. da Silva, *Um Estudo da Resistividade do Solo em Sistemas de Aterramento: Simulação Numérica e Modelo Matemático*, Florianópolis: Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2021.
- [2] A. Raizer, E. P. Elias, J. V. da Silva, M. V. F. da Luz, V. L. Coelho, V. M. A. Raupp e M. Telló, "A comparative analysis of grounding in different structures: Operational vs. finite element method models," *Electric Power Systems Research*, n° 230, 2024.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 7117-1. *Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geolétrica*, 2020.
- [4] M. Telló, G. A. D. Dias, A. Raizer, H. D. Almaguer, T. I. Mustafa e V. L. Coelho, *Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixa e Alta Frequências*, Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- [5] S. Visacro, *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*, São Paulo: Artliber, 2005.
- [6] X. L. Travassos, M. F. Pantoja e N. Ida, *Ground Penetrating Radar: Improving sensing and imaging through numerical modeling*, Londres: The Institution of Engineering and Technology, 2021.
- [7] N. Chatasen, A. Boonpoonga, K. Athikulwongse, K. Kaemarungsi e P. Akkaraekthalin, "Mapping the Physical and Dielectric Properties of Layered Soil Using Short-Time Matrix Pencil Method-Based Ground-Penetrating Radar," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 105610-10561, 2020.
- [8] S. Lambot, I. v. d. Bosch, B. Stockbroeckx, P. Druyts, M. Vanclooster e E. Slob, "Frequency Dependence of the Soil Electromagnetic Properties Derived from Ground-Penetrating Radar Signal Inversion," *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, vol. 6, n° 1, pp. 73-87, 2005.
- [9] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*, Danvers: John Wiley & Sons, 2012.
- [10] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, Nova Jersey: ECE Department Rutgers University, 2016.
- [11] L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan e V. K. Varadan, *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*, Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
- [12] H. G. dos Santos, P. K. T. Jacomine, L. H. C. dos Anjos, V. Á. de Oliveira, J. F. Lumberras, M. R. Coelho, J. A. de Almeida, J. C. de Araújo Filho, J. B. de Oliveira e T. J. F. Cunha, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, Brasília: Embrapa, 2018.
- [13] S. Visacro Filho, *Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento.*, São Paulo: Artliber, 2002.
- [14] V. L. Coelho, *ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO FRENTE À AÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS*, Florianópolis: Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [15] J. H. Scott, *Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soil*, Serviço

Geológico dos Estados Unidos, 1983.

- [16] S. Visacro e C. Portela, "Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems," em *Symposium High Voltage Engineering, Braunschweig*, 1987.
- [17] C. M. Portela, "Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior," em *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatability, Seattle*, 1999.
- [18] R. S. Alipio, *Dependência da frequência dos parâmetros do solo: Efeito no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos*, Belo Horizonte: Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2013.
- [19] G. I. Torgovnikov, *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials*, Siracusa: Springer, 1993.
- [20] C. K. Alexander e M. N. O. Sadiku, *Fundamentos de Circuitos Elétricos*, Nova Iorque: McGraw-Hill, 2013.
- [21] A. W. Kraszewski e S. O. Nelson, "Microwave Permittivity Determination in Agricultural Products," *Microwave Power & Electromagnetic Energy*, vol. 39, nº 1, pp. 41-52, 2004.
- [22] Keysight Technologies, *Application note: Exploring the architectures of network analyzers*, 2024.
- [23] Keysight Technologies, *Application note: Understanding the fundamental principles of vector network analysis*, 2022.
- [24] Rohde & Schwarz, *R&S®ZBN Vector Network Analyzer (First Generation)*, Rohde & Schwarz, 2022.
- [25] Keysight Technologies, *Application note: Impedance measurement handbook*, 2020.
- [26] Rohde & Schwarz, *R&S®HM8118 Programmable LCR-Bridge: User Manual*, Munique: Rohde & Schwarz, 2016.
- [27] Rohde & Schwarz, *Manual: Active Directional Antenna HE200*, Munich: Rohde & Schwarz, 1998.
- [28] B. Filali, F. Boone, J. Rhazi e G. Ballivy, "Design and Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for the Measurement of the Dielectric Properties of Concrete," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, nº 10, pp. 2322-2328, 2008.
- [29] G. P. Otto e W. C. Chew, "Improved Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for Dielectric Measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, nº 4, pp. 742-746, 1991.
- [30] B. d. C. Lima, *Uma análise dos métodos para a medição das propriedades dielétricas dos materiais*, Florianópolis: Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2013.
- [31] N. Tamyis, A. Ramli e D. K. Ghodgaonkar, "Free Space Measurement of Complex Permittivity And Complex Permeability Of Magnetic Materials Using Open Circuit and Short Circuit Method At Microwave Frequencies," em *Student Conference on Research and Development Proceedings, Shah Alam*, 2002.
- [32] S. Trabelsi e S. O. Nelson, "Microwave Moisture Sensor for Rapid and Nondestructive Grading of Peanuts," em *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon), Concord*, 2010.

- [33] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [34] S. Gabriel, R. W. Lau e C. Gabriel, "The Dielectric Properties of Biological Tissues: II. Measurements in the Frequency Range 10Hz to 20GHz," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 41, pp. 2251-2269, 1996.
- [35] ANSYS, *HFSS online help*, Canonsburg, 2022.
- [36] A. D. B. Manjunath, F. Khan, N. Noyanbayev, N. Harid, H. Griffiths, R. P. Nogueira, N. T. C. De Oliveira, M. Haddad e S. Ramanujam, "Investigation into Variation of Resistivity and Permittivity of Aqueous Solutions and Soils with Frequency and Current Density," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, n° 2, pp. 443-455, 2022.
- [37] J. H. Scott, R. D. Carroll e D. R. Cunningham, "Dielectric Constant and Electrical Conductivity Measurements of Moist Rock: A New Laboratory Method," *Geophysical Research*, vol. 72, n° 20, pp. 5101-5115, 1967.
- [38] C. L. Longmire e K. S. Smith, *A Universal Impedance for Soils*, Washington: Defense Nuclear Agency, 1975.
- [39] R. Hong, K. Chen, X. Hou, Q. Sun, N. Liu e H. Q. Liu, "Mixed Finite Element Method for Full-wave Simulation of Bioelectromagnetism From DC to Microwave Frequencies," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 67, n° 10, pp. 2765-2772, 2020.
- [40] J. Zhu e D. Jiao, "Eliminating the Low-Frequency Breakdown Problem in 3-D Full-Wave Finite-Element-Based Analysis of Integrated Circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, n° 10, pp. 2633-2645, 2010.

## ANEXO A – TABELAS COM OS DADOS MEDIDOS

*Nas tabelas a seguir poderão ser vistos todos os valores de impedância medidos nas amostras com a sonda coaxial para o intervalo de frequências de 20 Hz até 90 kHz, e os valores dos parâmetros calculados a partir dessas medidas.*

**Tabela 11 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de papel**

f (Hz)	PAPEL								
	MAG. Z( $\Omega$ )	FASE Z( $^{\circ}$ )	RE. Z( $\Omega$ )	IM. Z( $\Omega$ )	G <sub>a</sub> (S)	C <sub>sa</sub> (F)	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	$\epsilon'_r$
20	1,06E+08	-2,97E+01	9,21E+07	-5,25E+07	8,20E-09	3,72E-11	1,24E-08	8,04E+07	6,37E+00
24	9,97E+07	-3,10E+01	8,54E+07	-5,14E+07	8,59E-09	3,43E-11	1,30E-08	7,67E+07	5,88E+00
25	9,84E+07	-3,16E+01	8,38E+07	-5,16E+07	8,65E-09	3,39E-11	1,31E-08	7,63E+07	5,82E+00
30	9,27E+07	-3,40E+01	7,68E+07	-5,18E+07	8,95E-09	3,20E-11	1,36E-08	7,37E+07	5,49E+00
36	8,52E+07	-3,73E+01	6,78E+07	-5,16E+07	9,33E-09	3,14E-11	1,42E-08	7,07E+07	5,39E+00
40	8,35E+07	-3,71E+01	6,66E+07	-5,04E+07	9,55E-09	2,88E-11	1,45E-08	6,91E+07	4,93E+00
45	8,05E+07	-4,07E+01	6,10E+07	-5,25E+07	9,41E-09	2,87E-11	1,43E-08	7,01E+07	4,92E+00
50	7,44E+07	-4,31E+01	5,43E+07	-5,08E+07	9,83E-09	2,92E-11	1,49E-08	6,71E+07	5,01E+00
60	8,11E+07	-5,05E+01	5,16E+07	-6,26E+07	7,84E-09	2,52E-11	1,19E-08	8,41E+07	4,33E+00
72	6,66E+07	-4,35E+01	4,83E+07	-4,58E+07	1,09E-08	2,29E-11	1,65E-08	6,05E+07	3,92E+00
75	6,45E+07	-4,10E+01	4,87E+07	-4,23E+07	1,17E-08	2,16E-11	1,77E-08	5,63E+07	3,70E+00
80	6,25E+07	-4,39E+01	4,51E+07	-4,33E+07	1,15E-08	2,21E-11	1,75E-08	5,72E+07	3,78E+00
90	5,85E+07	-4,53E+01	4,12E+07	-4,16E+07	1,20E-08	2,15E-11	1,82E-08	5,49E+07	3,68E+00
100	5,35E+07	-4,71E+01	3,64E+07	-3,92E+07	1,27E-08	2,18E-11	1,93E-08	5,19E+07	3,74E+00
120	4,75E+07	-4,74E+01	3,22E+07	-3,49E+07	1,43E-08	2,06E-11	2,16E-08	4,63E+07	3,52E+00
150	4,28E+07	-5,05E+01	2,72E+07	-3,30E+07	1,49E-08	1,91E-11	2,25E-08	4,44E+07	3,28E+00
180	3,83E+07	-5,17E+01	2,37E+07	-3,00E+07	1,62E-08	1,81E-11	2,45E-08	4,08E+07	3,11E+00
200	3,58E+07	-5,21E+01	2,20E+07	-2,83E+07	1,72E-08	1,75E-11	2,60E-08	3,84E+07	3,00E+00
240	3,19E+07	-5,37E+01	1,89E+07	-2,57E+07	1,86E-08	1,68E-11	2,82E-08	3,55E+07	2,88E+00
250	3,12E+07	-5,37E+01	1,85E+07	-2,52E+07	1,89E-08	1,64E-11	2,87E-08	3,48E+07	2,82E+00
300	2,77E+07	-5,50E+01	1,59E+07	-2,27E+07	2,07E-08	1,57E-11	3,14E-08	3,19E+07	2,69E+00
360	2,48E+07	-5,61E+01	1,39E+07	-2,06E+07	2,25E-08	1,48E-11	3,41E-08	2,93E+07	2,53E+00
400	2,32E+07	-5,67E+01	1,27E+07	-1,94E+07	2,36E-08	1,43E-11	3,58E-08	2,79E+07	2,46E+00
450	2,16E+07	-5,74E+01	1,16E+07	-1,82E+07	2,50E-08	1,38E-11	3,78E-08	2,64E+07	2,37E+00
500	2,02E+07	-5,80E+01	1,07E+07	-1,72E+07	2,62E-08	1,33E-11	3,98E-08	2,51E+07	2,29E+00
600	1,80E+07	-5,91E+01	9,23E+06	-1,54E+07	2,86E-08	1,27E-11	4,33E-08	2,31E+07	2,17E+00
720	1,59E+07	-6,02E+01	7,92E+06	-1,38E+07	3,12E-08	1,20E-11	4,73E-08	2,11E+07	2,06E+00
750	1,55E+07	-6,03E+01	7,68E+06	-1,35E+07	3,19E-08	1,19E-11	4,84E-08	2,07E+07	2,04E+00
800	1,49E+07	-6,08E+01	7,25E+06	-1,30E+07	3,28E-08	1,17E-11	4,97E-08	2,01E+07	2,00E+00
900	1,37E+07	-6,16E+01	6,54E+06	-1,21E+07	3,46E-08	1,13E-11	5,25E-08	1,90E+07	1,94E+00
1000	1,28E+07	-6,23E+01	5,95E+06	-1,13E+07	3,63E-08	1,10E-11	5,51E-08	1,82E+07	1,89E+00
1200	1,13E+07	-6,36E+01	5,02E+06	-1,01E+07	3,92E-08	1,05E-11	5,95E-08	1,68E+07	1,80E+00

1500	9,65E+06	-6,53E+01	4,03E+06	-8,77E+06	4,32E-08	9,99E-12	6,55E-08	1,53E+07	1,71E+00
1800	8,46E+06	-6,68E+01	3,33E+06	-7,78E+06	4,65E-08	9,61E-12	7,04E-08	1,42E+07	1,65E+00
2000	7,83E+06	-6,77E+01	2,97E+06	-7,24E+06	4,85E-08	9,41E-12	7,35E-08	1,36E+07	1,61E+00
2400	6,81E+06	-6,92E+01	2,42E+06	-6,37E+06	5,20E-08	9,10E-12	7,89E-08	1,27E+07	1,56E+00
2500	6,60E+06	-6,96E+01	2,30E+06	-6,19E+06	5,29E-08	9,04E-12	8,01E-08	1,25E+07	1,55E+00
3000	5,72E+06	-7,11E+01	1,86E+06	-5,41E+06	5,67E-08	8,77E-12	8,60E-08	1,16E+07	1,50E+00
3600	4,93E+06	-7,26E+01	1,48E+06	-4,71E+06	6,08E-08	8,55E-12	9,21E-08	1,09E+07	1,47E+00
4000	4,52E+06	-7,34E+01	1,29E+06	-4,34E+06	6,32E-08	8,43E-12	9,58E-08	1,04E+07	1,45E+00
4500	4,10E+06	-7,43E+01	1,11E+06	-3,95E+06	6,61E-08	8,30E-12	1,00E-07	9,97E+06	1,42E+00
5000	3,75E+06	-7,50E+01	9,68E+05	-3,62E+06	6,89E-08	8,20E-12	1,04E-07	9,58E+06	1,41E+00
6000	3,21E+06	-7,63E+01	7,59E+05	-3,11E+06	7,38E-08	8,04E-12	1,12E-07	8,93E+06	1,38E+00
7200	2,73E+06	-7,75E+01	5,92E+05	-2,67E+06	7,93E-08	7,90E-12	1,20E-07	8,32E+06	1,35E+00
7500	2,64E+06	-7,77E+01	5,59E+05	-2,58E+06	8,06E-08	7,87E-12	1,22E-07	8,19E+06	1,35E+00
8000	2,49E+06	-7,81E+01	5,12E+05	-2,44E+06	8,26E-08	7,82E-12	1,25E-07	7,98E+06	1,34E+00
9000	2,24E+06	-7,88E+01	4,34E+05	-2,20E+06	8,66E-08	7,75E-12	1,31E-07	7,62E+06	1,33E+00
10000	2,04E+06	-7,94E+01	3,75E+05	-2,00E+06	9,03E-08	7,68E-12	1,37E-07	7,31E+06	1,32E+00
12000	1,73E+06	-8,03E+01	2,89E+05	-1,70E+06	9,72E-08	7,58E-12	1,47E-07	6,78E+06	1,30E+00
15000	1,40E+06	-8,14E+01	2,10E+05	-1,39E+06	1,06E-07	7,47E-12	1,61E-07	6,20E+06	1,28E+00
18000	1,19E+06	-8,21E+01	1,64E+05	-1,18E+06	1,16E-07	7,37E-12	1,76E-07	5,69E+06	1,26E+00
20000	1,07E+06	-8,26E+01	1,39E+05	-1,06E+06	1,20E-07	7,35E-12	1,82E-07	5,48E+06	1,26E+00
24000	9,03E+05	-8,33E+01	1,06E+05	-8,97E+05	1,29E-07	7,29E-12	1,96E-07	5,10E+06	1,25E+00
25000	8,68E+05	-8,34E+01	9,97E+04	-8,62E+05	1,32E-07	7,29E-12	2,01E-07	4,98E+06	1,25E+00
30000	7,29E+05	-8,40E+01	7,60E+04	-7,25E+05	1,43E-07	7,24E-12	2,17E-07	4,61E+06	1,24E+00
36000	6,11E+05	-8,46E+01	5,77E+04	-6,08E+05	1,55E-07	7,21E-12	2,35E-07	4,26E+06	1,24E+00
40000	5,51E+05	-8,49E+01	4,91E+04	-5,48E+05	1,62E-07	7,20E-12	2,46E-07	4,07E+06	1,23E+00
45000	4,90E+05	-8,51E+01	4,19E+04	-4,88E+05	1,74E-07	7,19E-12	2,64E-07	3,78E+06	1,23E+00
50000	4,41E+05	-8,54E+01	3,50E+04	-4,40E+05	1,80E-07	7,20E-12	2,73E-07	3,66E+06	1,23E+00
60000	3,66E+05	-8,59E+01	2,63E+04	-3,65E+05	1,96E-07	7,23E-12	2,97E-07	3,37E+06	1,24E+00
72000	3,00E+05	-8,64E+01	1,88E+04	-3,00E+05	2,09E-07	7,35E-12	3,17E-07	3,16E+06	1,26E+00
75000	2,89E+05	-8,63E+01	1,87E+04	-2,89E+05	2,23E-07	7,32E-12	3,39E-07	2,95E+06	1,26E+00
80000	2,69E+05	-8,64E+01	1,67E+04	-2,69E+05	2,30E-07	7,37E-12	3,49E-07	2,86E+06	1,26E+00
90000	2,36E+05	-8,66E+01	1,40E+04	-2,35E+05	2,51E-07	7,48E-12	3,81E-07	2,62E+06	1,28E+00

Fonte: elaborado pelo autor.

**Tabela 12 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de madeira**

f (Hz)	MADEIRA PINUS								
	MAG. Z( $\Omega$ )	FASE Z( $^\circ$ )	RE. Z( $\Omega$ )	IM. Z( $\Omega$ )	G <sub>a</sub> (S)	C <sub>sa</sub> (F)	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	$\epsilon'_t$
20	1,10E+08	-3,49E+01	9,05E+07	-6,30E+07	7,44E-09	4,13E-11	1,13E-08	8,86E+07	7,08E+00
24	1,03E+08	-3,65E+01	8,26E+07	-6,12E+07	7,82E-09	3,84E-11	1,19E-08	8,44E+07	6,58E+00
25	1,01E+08	-3,75E+01	8,05E+07	-6,18E+07	7,82E-09	3,82E-11	1,19E-08	8,44E+07	6,55E+00
30	9,43E+07	-4,01E+01	7,21E+07	-6,07E+07	8,11E-09	3,62E-11	1,23E-08	8,13E+07	6,21E+00
36	8,55E+07	-4,40E+01	6,16E+07	-5,94E+07	8,41E-09	3,59E-11	1,28E-08	7,84E+07	6,15E+00
40	8,32E+07	-4,42E+01	5,96E+07	-5,80E+07	8,62E-09	3,34E-11	1,31E-08	7,65E+07	5,72E+00



45	7,82E+07	-4,82E+01	5,21E+07	-5,83E+07	8,53E-09	3,37E-11	1,29E-08	7,73E+07	5,78E+00
50	7,20E+07	-5,06E+01	4,57E+07	-5,57E+07	8,81E-09	3,41E-11	1,34E-08	7,48E+07	5,85E+00
60	7,18E+07	-4,65E+01	4,94E+07	-5,20E+07	9,60E-09	2,68E-11	1,46E-08	6,87E+07	4,59E+00
72	6,17E+07	-5,27E+01	3,73E+07	-4,91E+07	9,82E-09	2,85E-11	1,49E-08	6,71E+07	4,89E+00
75	6,01E+07	-5,09E+01	3,79E+07	-4,66E+07	1,05E-08	2,74E-11	1,59E-08	6,28E+07	4,70E+00
80	5,72E+07	-5,32E+01	3,43E+07	-4,58E+07	1,05E-08	2,78E-11	1,59E-08	6,30E+07	4,77E+00
90	5,23E+07	-5,46E+01	3,03E+07	-4,26E+07	1,11E-08	2,75E-11	1,68E-08	5,95E+07	4,72E+00
100	4,71E+07	-5,60E+01	2,63E+07	-3,91E+07	1,19E-08	2,80E-11	1,80E-08	5,56E+07	4,81E+00
120	4,13E+07	-5,70E+01	2,25E+07	-3,46E+07	1,32E-08	2,69E-11	2,00E-08	5,00E+07	4,62E+00
150	3,53E+07	-5,83E+01	1,86E+07	-3,01E+07	1,49E-08	2,55E-11	2,26E-08	4,43E+07	4,38E+00
180	3,08E+07	-5,85E+01	1,61E+07	-2,63E+07	1,70E-08	2,45E-11	2,57E-08	3,89E+07	4,20E+00
200	2,85E+07	-5,82E+01	1,50E+07	-2,42E+07	1,85E-08	2,38E-11	2,81E-08	3,56E+07	4,07E+00
240	2,49E+07	-5,83E+01	1,31E+07	-2,12E+07	2,11E-08	2,26E-11	3,20E-08	3,13E+07	3,88E+00
250	2,42E+07	-5,80E+01	1,28E+07	-2,05E+07	2,19E-08	2,23E-11	3,32E-08	3,01E+07	3,83E+00
300	2,13E+07	-5,77E+01	1,14E+07	-1,80E+07	2,51E-08	2,11E-11	3,81E-08	2,62E+07	3,61E+00
360	1,89E+07	-5,69E+01	1,03E+07	-1,58E+07	2,89E-08	1,96E-11	4,38E-08	2,28E+07	3,36E+00
400	1,77E+07	-5,65E+01	9,77E+06	-1,47E+07	3,13E-08	1,88E-11	4,74E-08	2,11E+07	3,22E+00
450	1,65E+07	-5,60E+01	9,22E+06	-1,37E+07	3,40E-08	1,78E-11	5,15E-08	1,94E+07	3,05E+00
500	1,55E+07	-5,55E+01	8,79E+06	-1,28E+07	3,65E-08	1,69E-11	5,54E-08	1,81E+07	2,90E+00
600	1,39E+07	-5,50E+01	8,00E+06	-1,14E+07	4,11E-08	1,56E-11	6,24E-08	1,60E+07	2,67E+00
720	1,26E+07	-5,47E+01	7,29E+06	-1,03E+07	4,58E-08	1,43E-11	6,95E-08	1,44E+07	2,45E+00
750	1,23E+07	-5,46E+01	7,15E+06	-1,00E+07	4,70E-08	1,40E-11	7,13E-08	1,40E+07	2,41E+00
800	1,19E+07	-5,47E+01	6,89E+06	-9,72E+06	4,86E-08	1,36E-11	7,36E-08	1,36E+07	2,34E+00
900	1,12E+07	-5,47E+01	6,46E+06	-9,14E+06	5,16E-08	1,29E-11	7,82E-08	1,28E+07	2,21E+00
1000	1,06E+07	-5,50E+01	6,07E+06	-8,67E+06	5,42E-08	1,23E-11	8,22E-08	1,22E+07	2,11E+00
1200	9,62E+06	-5,57E+01	5,42E+06	-7,95E+06	5,85E-08	1,14E-11	8,87E-08	1,13E+07	1,95E+00
1500	8,51E+06	-5,72E+01	4,61E+06	-7,15E+06	6,37E-08	1,05E-11	9,66E-08	1,03E+07	1,80E+00
1800	7,67E+06	-5,88E+01	3,98E+06	-6,56E+06	6,76E-08	9,86E-12	1,03E-07	9,75E+06	1,69E+00
2000	7,20E+06	-5,98E+01	3,62E+06	-6,22E+06	6,99E-08	9,55E-12	1,06E-07	9,44E+06	1,64E+00
2400	6,42E+06	-6,18E+01	3,04E+06	-5,66E+06	7,36E-08	9,10E-12	1,12E-07	8,96E+06	1,56E+00
2500	6,25E+06	-6,23E+01	2,91E+06	-5,53E+06	7,44E-08	9,01E-12	1,13E-07	8,86E+06	1,55E+00
3000	5,53E+06	-6,44E+01	2,39E+06	-4,99E+06	7,81E-08	8,66E-12	1,18E-07	8,44E+06	1,48E+00
3600	4,85E+06	-6,66E+01	1,92E+06	-4,45E+06	8,18E-08	8,37E-12	1,24E-07	8,06E+06	1,44E+00
4000	4,48E+06	-6,79E+01	1,68E+06	-4,15E+06	8,40E-08	8,23E-12	1,27E-07	7,85E+06	1,41E+00
4500	4,09E+06	-6,93E+01	1,44E+06	-3,82E+06	8,65E-08	8,09E-12	1,31E-07	7,63E+06	1,39E+00
5000	3,76E+06	-7,05E+01	1,25E+06	-3,54E+06	8,87E-08	7,98E-12	1,35E-07	7,43E+06	1,37E+00
6000	3,24E+06	-7,25E+01	9,72E+05	-3,09E+06	9,27E-08	7,82E-12	1,41E-07	7,11E+06	1,34E+00
7200	2,77E+06	-7,44E+01	7,46E+05	-2,67E+06	9,70E-08	7,68E-12	1,47E-07	6,80E+06	1,32E+00
7500	2,68E+06	-7,48E+01	7,02E+05	-2,58E+06	9,80E-08	7,65E-12	1,49E-07	6,73E+06	1,31E+00
8000	2,53E+06	-7,54E+01	6,38E+05	-2,45E+06	9,96E-08	7,61E-12	1,51E-07	6,62E+06	1,30E+00
9000	2,28E+06	-7,65E+01	5,34E+05	-2,22E+06	1,03E-07	7,53E-12	1,56E-07	6,43E+06	1,29E+00
10000	2,08E+06	-7,74E+01	4,55E+05	-2,03E+06	1,05E-07	7,48E-12	1,60E-07	6,26E+06	1,28E+00
12000	1,76E+06	-7,88E+01	3,43E+05	-1,73E+06	1,11E-07	7,39E-12	1,68E-07	5,96E+06	1,27E+00

15000	1,43E+06	-8,03E+01	2,41E+05	-1,41E+06	1,18E-07	7,30E-12	1,78E-07	5,61E+06	1,25E+00
18000	1,21E+06	-8,13E+01	1,84E+05	-1,20E+06	1,25E-07	7,21E-12	1,89E-07	5,28E+06	1,24E+00
20000	1,09E+06	-8,20E+01	1,53E+05	-1,08E+06	1,28E-07	7,20E-12	1,94E-07	5,16E+06	1,23E+00
24000	9,19E+05	-8,29E+01	1,14E+05	-9,12E+05	1,34E-07	7,16E-12	2,04E-07	4,91E+06	1,23E+00
25000	8,84E+05	-8,31E+01	1,07E+05	-8,78E+05	1,37E-07	7,15E-12	2,07E-07	4,82E+06	1,23E+00
30000	7,41E+05	-8,39E+01	7,92E+04	-7,36E+05	1,44E-07	7,12E-12	2,19E-07	4,57E+06	1,22E+00
36000	6,19E+05	-8,46E+01	5,86E+04	-6,17E+05	1,53E-07	7,10E-12	2,32E-07	4,32E+06	1,22E+00
40000	5,58E+05	-8,49E+01	4,92E+04	-5,56E+05	1,58E-07	7,10E-12	2,40E-07	4,17E+06	1,22E+00
45000	4,96E+05	-8,52E+01	4,14E+04	-4,95E+05	1,68E-07	7,10E-12	2,55E-07	3,93E+06	1,22E+00
50000	4,46E+05	-8,56E+01	3,40E+04	-4,45E+05	1,71E-07	7,12E-12	2,59E-07	3,86E+06	1,22E+00
60000	3,70E+05	-8,61E+01	2,49E+04	-3,69E+05	1,82E-07	7,16E-12	2,76E-07	3,62E+06	1,23E+00
72000	3,03E+05	-8,67E+01	1,75E+04	-3,02E+05	1,90E-07	7,28E-12	2,89E-07	3,47E+06	1,25E+00
75000	2,92E+05	-8,66E+01	1,73E+04	-2,91E+05	2,03E-07	7,26E-12	3,08E-07	3,25E+06	1,25E+00
80000	2,71E+05	-8,68E+01	1,53E+04	-2,71E+05	2,07E-07	7,32E-12	3,15E-07	3,18E+06	1,25E+00
90000	2,38E+05	-8,69E+01	1,27E+04	-2,37E+05	2,24E-07	7,44E-12	3,40E-07	2,94E+06	1,28E+00

Fonte: elaborado pelo autor.

**Tabela 13 - Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de areia**

f (Hz)	AREIA								
	MAG. Z( $\Omega$ )	FASE Z( $^{\circ}$ )	RE. Z( $\Omega$ )	IM. Z( $\Omega$ )	G <sub>a</sub> (S)	C <sub>sa</sub> (F)	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	$\epsilon'_r$
20	6,98E+07	-1,71E+01	6,68E+07	-2,05E+07	1,37E-08	3,35E-11	2,08E-08	4,82E+07	5,74E+00
24	6,82E+07	-1,83E+01	6,47E+07	-2,14E+07	1,39E-08	3,06E-11	2,11E-08	4,74E+07	5,24E+00
25	6,73E+07	-1,87E+01	6,38E+07	-2,15E+07	1,41E-08	3,03E-11	2,13E-08	4,69E+07	5,19E+00
30	6,50E+07	-2,00E+01	6,10E+07	-2,22E+07	1,45E-08	2,79E-11	2,19E-08	4,56E+07	4,79E+00
36	6,32E+07	-2,17E+01	5,87E+07	-2,34E+07	1,47E-08	2,59E-11	2,23E-08	4,49E+07	4,44E+00
40	6,14E+07	-2,29E+01	5,66E+07	-2,39E+07	1,50E-08	2,52E-11	2,27E-08	4,40E+07	4,32E+00
45	5,88E+07	-2,19E+01	5,46E+07	-2,19E+07	1,58E-08	2,24E-11	2,39E-08	4,18E+07	3,85E+00
50	6,09E+07	-2,47E+01	5,54E+07	-2,54E+07	1,49E-08	2,18E-11	2,26E-08	4,42E+07	3,74E+00
60	5,29E+07	-3,08E+01	4,54E+07	-2,71E+07	1,62E-08	2,57E-11	2,46E-08	4,06E+07	4,40E+00
72	5,13E+07	-2,45E+01	4,66E+07	-2,13E+07	1,77E-08	1,79E-11	2,69E-08	3,72E+07	3,07E+00
75	5,11E+07	-2,56E+01	4,61E+07	-2,21E+07	1,77E-08	1,79E-11	2,68E-08	3,74E+07	3,08E+00
80	5,14E+07	-2,67E+01	4,60E+07	-2,31E+07	1,74E-08	1,74E-11	2,63E-08	3,80E+07	2,98E+00
90	4,89E+07	-3,01E+01	4,23E+07	-2,45E+07	1,77E-08	1,82E-11	2,68E-08	3,73E+07	3,11E+00
100	4,89E+07	-3,05E+01	4,21E+07	-2,48E+07	1,76E-08	1,65E-11	2,67E-08	3,74E+07	2,83E+00
120	4,53E+07	-3,29E+01	3,80E+07	-2,46E+07	1,85E-08	1,59E-11	2,81E-08	3,56E+07	2,73E+00
150	4,21E+07	-3,51E+01	3,45E+07	-2,42E+07	1,94E-08	1,45E-11	2,94E-08	3,40E+07	2,48E+00
180	3,91E+07	-3,78E+01	3,09E+07	-2,39E+07	2,02E-08	1,39E-11	3,07E-08	3,26E+07	2,38E+00
200	3,78E+07	-3,95E+01	2,92E+07	-2,40E+07	2,04E-08	1,34E-11	3,09E-08	3,23E+07	2,29E+00
240	3,49E+07	-4,22E+01	2,59E+07	-2,34E+07	2,12E-08	1,28E-11	3,22E-08	3,10E+07	2,19E+00
250	3,43E+07	-4,25E+01	2,53E+07	-2,31E+07	2,15E-08	1,26E-11	3,26E-08	3,06E+07	2,15E+00
300	3,15E+07	-4,54E+01	2,21E+07	-2,24E+07	2,23E-08	1,20E-11	3,38E-08	2,96E+07	2,06E+00
360	2,87E+07	-4,85E+01	1,90E+07	-2,15E+07	2,31E-08	1,16E-11	3,50E-08	2,85E+07	1,98E+00
400	2,72E+07	-5,01E+01	1,74E+07	-2,09E+07	2,35E-08	1,12E-11	3,57E-08	2,80E+07	1,92E+00

450	2,53E+07	-5,20E+01	1,56E+07	-1,99E+07	2,44E-08	1,10E-11	3,70E-08	2,71E+07	1,89E+00
500	2,38E+07	-5,36E+01	1,41E+07	-1,91E+07	2,50E-08	1,08E-11	3,78E-08	2,64E+07	1,85E+00
600	2,12E+07	-5,65E+01	1,17E+07	-1,76E+07	2,61E-08	1,04E-11	3,96E-08	2,53E+07	1,79E+00
720	1,87E+07	-5,91E+01	9,61E+06	-1,61E+07	2,74E-08	1,01E-11	4,15E-08	2,41E+07	1,74E+00
750	1,82E+07	-5,97E+01	9,20E+06	-1,57E+07	2,77E-08	1,01E-11	4,20E-08	2,38E+07	1,72E+00
800	1,74E+07	-6,06E+01	8,53E+06	-1,52E+07	2,82E-08	9,96E-12	4,27E-08	2,34E+07	1,71E+00
900	1,60E+07	-6,23E+01	7,44E+06	-1,41E+07	2,91E-08	9,79E-12	4,42E-08	2,26E+07	1,68E+00
1000	1,48E+07	-6,36E+01	6,56E+06	-1,32E+07	3,01E-08	9,66E-12	4,56E-08	2,19E+07	1,66E+00
1200	1,29E+07	-6,58E+01	5,27E+06	-1,17E+07	3,18E-08	9,40E-12	4,82E-08	2,08E+07	1,61E+00
1500	1,08E+07	-6,82E+01	4,00E+06	-1,00E+07	3,44E-08	9,14E-12	5,22E-08	1,92E+07	1,57E+00
1800	9,30E+06	-7,00E+01	3,17E+06	-8,74E+06	3,67E-08	8,94E-12	5,57E-08	1,80E+07	1,53E+00
2000	8,53E+06	-7,10E+01	2,78E+06	-8,06E+06	3,83E-08	8,82E-12	5,80E-08	1,72E+07	1,51E+00
2400	7,32E+06	-7,25E+01	2,21E+06	-6,98E+06	4,12E-08	8,64E-12	6,24E-08	1,60E+07	1,48E+00
2500	7,07E+06	-7,28E+01	2,09E+06	-6,76E+06	4,18E-08	8,60E-12	6,34E-08	1,58E+07	1,47E+00
3000	6,05E+06	-7,41E+01	1,65E+06	-5,82E+06	4,51E-08	8,43E-12	6,84E-08	1,46E+07	1,45E+00
3600	5,17E+06	-7,54E+01	1,31E+06	-5,01E+06	4,89E-08	8,27E-12	7,41E-08	1,35E+07	1,42E+00
4000	4,72E+06	-7,60E+01	1,14E+06	-4,58E+06	5,12E-08	8,18E-12	7,76E-08	1,29E+07	1,40E+00
4500	4,26E+06	-7,67E+01	9,80E+05	-4,14E+06	5,40E-08	8,08E-12	8,19E-08	1,22E+07	1,39E+00
5000	3,88E+06	-7,73E+01	8,54E+05	-3,79E+06	5,67E-08	8,00E-12	8,59E-08	1,16E+07	1,37E+00
6000	3,30E+06	-7,83E+01	6,72E+05	-3,23E+06	6,16E-08	7,86E-12	9,34E-08	1,07E+07	1,35E+00
7200	2,81E+06	-7,91E+01	5,29E+05	-2,76E+06	6,71E-08	7,74E-12	1,02E-07	9,83E+06	1,33E+00
7500	2,70E+06	-7,93E+01	5,01E+05	-2,66E+06	6,85E-08	7,71E-12	1,04E-07	9,63E+06	1,32E+00
8000	2,55E+06	-7,96E+01	4,59E+05	-2,51E+06	7,05E-08	7,67E-12	1,07E-07	9,35E+06	1,31E+00
9000	2,29E+06	-8,01E+01	3,93E+05	-2,26E+06	7,46E-08	7,59E-12	1,13E-07	8,84E+06	1,30E+00
10000	2,08E+06	-8,06E+01	3,40E+05	-2,06E+06	7,83E-08	7,53E-12	1,19E-07	8,42E+06	1,29E+00
12000	1,76E+06	-8,13E+01	2,66E+05	-1,74E+06	8,54E-08	7,43E-12	1,29E-07	7,72E+06	1,27E+00
15000	1,44E+06	-8,22E+01	1,95E+05	-1,42E+06	9,45E-08	7,33E-12	1,43E-07	6,98E+06	1,26E+00
18000	1,21E+06	-8,29E+01	1,50E+05	-1,20E+06	1,02E-07	7,24E-12	1,55E-07	6,45E+06	1,24E+00
20000	1,10E+06	-8,32E+01	1,30E+05	-1,09E+06	1,08E-07	7,20E-12	1,64E-07	6,09E+06	1,24E+00
24000	9,23E+05	-8,37E+01	1,01E+05	-9,17E+05	1,18E-07	7,14E-12	1,79E-07	5,58E+06	1,22E+00
25000	8,87E+05	-8,39E+01	9,39E+04	-8,82E+05	1,19E-07	7,13E-12	1,81E-07	5,53E+06	1,22E+00
30000	7,44E+05	-8,45E+01	7,10E+04	-7,41E+05	1,28E-07	7,10E-12	1,95E-07	5,14E+06	1,22E+00
36000	6,23E+05	-8,50E+01	5,47E+04	-6,21E+05	1,41E-07	7,07E-12	2,14E-07	4,68E+06	1,21E+00
40000	5,62E+05	-8,53E+01	4,62E+04	-5,60E+05	1,46E-07	7,05E-12	2,21E-07	4,51E+06	1,21E+00
45000	5,01E+05	-8,57E+01	3,80E+04	-4,99E+05	1,52E-07	7,05E-12	2,30E-07	4,35E+06	1,21E+00
50000	4,50E+05	-8,58E+01	3,32E+04	-4,49E+05	1,63E-07	7,05E-12	2,48E-07	4,03E+06	1,21E+00
60000	3,74E+05	-8,63E+01	2,44E+04	-3,73E+05	1,75E-07	7,08E-12	2,65E-07	3,77E+06	1,21E+00
72000	3,07E+05	-8,65E+01	1,90E+04	-3,06E+05	2,02E-07	7,19E-12	3,06E-07	3,27E+06	1,23E+00
75000	2,95E+05	-8,67E+01	1,69E+04	-2,95E+05	1,94E-07	7,17E-12	2,94E-07	3,40E+06	1,23E+00
80000	2,75E+05	-8,68E+01	1,54E+04	-2,75E+05	2,03E-07	7,22E-12	3,08E-07	3,25E+06	1,24E+00
90000	2,41E+05	-8,70E+01	1,26E+04	-2,40E+05	2,18E-07	7,34E-12	3,31E-07	3,02E+06	1,26E+00

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de terra

f (Hz)	TERRA								
	MAG. Z( $\Omega$ )	FASE Z( $^\circ$ )	RE. Z( $\Omega$ )	IM. Z( $\Omega$ )	$G_a$ (S)	$C_{sa}$ (F)	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	$\epsilon'_r$
20	1,11E+03	-3,37E+01	9,26E+02	-6,18E+02	7,47E-04	3,97E-06	1,13E-03	8,83E+02	6,81E+05
24	1,24E+03	-3,75E+01	9,87E+02	-7,56E+02	6,39E-04	3,25E-06	9,68E-04	1,03E+03	5,57E+05
25	1,23E+03	-3,77E+01	9,69E+02	-7,50E+02	6,46E-04	3,18E-06	9,79E-04	1,02E+03	5,45E+05
30	1,15E+03	-3,72E+01	9,12E+02	-6,94E+02	6,95E-04	2,80E-06	1,05E-03	9,49E+02	4,80E+05
36	1,07E+03	-3,66E+01	8,62E+02	-6,41E+02	7,47E-04	2,46E-06	1,13E-03	8,83E+02	4,21E+05
40	1,03E+03	-3,62E+01	8,35E+02	-6,10E+02	7,81E-04	2,27E-06	1,18E-03	8,45E+02	3,89E+05
45	9,91E+02	-3,56E+01	8,06E+02	-5,77E+02	8,20E-04	2,08E-06	1,24E-03	8,04E+02	3,56E+05
50	9,57E+02	-3,51E+01	7,83E+02	-5,50E+02	8,55E-04	1,91E-06	1,30E-03	7,72E+02	3,28E+05
60	9,00E+02	-3,39E+01	7,47E+02	-5,03E+02	9,22E-04	1,65E-06	1,40E-03	7,15E+02	2,82E+05
72	8,48E+02	-3,26E+01	7,14E+02	-4,57E+02	9,93E-04	1,41E-06	1,51E-03	6,64E+02	2,41E+05
75	8,38E+02	-3,25E+01	7,07E+02	-4,50E+02	1,01E-03	1,36E-06	1,53E-03	6,55E+02	2,33E+05
80	8,22E+02	-3,20E+01	6,97E+02	-4,36E+02	1,03E-03	1,28E-06	1,56E-03	6,39E+02	2,20E+05
90	7,93E+02	-3,11E+01	6,79E+02	-4,10E+02	1,08E-03	1,15E-06	1,64E-03	6,11E+02	1,98E+05
100	7,69E+02	-3,02E+01	6,64E+02	-3,87E+02	1,12E-03	1,04E-06	1,70E-03	5,87E+02	1,79E+05
120	7,31E+02	-2,87E+01	6,41E+02	-3,51E+02	1,20E-03	8,71E-07	1,82E-03	5,50E+02	1,49E+05
150	6,90E+02	-2,66E+01	6,17E+02	-3,09E+02	1,30E-03	6,88E-07	1,96E-03	5,09E+02	1,18E+05
180	6,62E+02	-2,48E+01	6,01E+02	-2,78E+02	1,37E-03	5,61E-07	2,08E-03	4,81E+02	9,62E+04
200	6,47E+02	-2,38E+01	5,92E+02	-2,62E+02	1,41E-03	4,97E-07	2,14E-03	4,67E+02	8,52E+04
240	6,25E+02	-2,20E+01	5,79E+02	-2,34E+02	1,48E-03	3,98E-07	2,25E-03	4,44E+02	6,83E+04
250	6,20E+02	-2,17E+01	5,76E+02	-2,29E+02	1,50E-03	3,80E-07	2,27E-03	4,40E+02	6,51E+04
300	6,01E+02	-1,99E+01	5,65E+02	-2,04E+02	1,56E-03	3,00E-07	2,37E-03	4,22E+02	5,15E+04
360	5,85E+02	-1,81E+01	5,56E+02	-1,81E+02	1,63E-03	2,35E-07	2,47E-03	4,06E+02	4,03E+04
400	5,76E+02	-1,71E+01	5,51E+02	-1,70E+02	1,66E-03	2,03E-07	2,51E-03	3,98E+02	3,49E+04
450	5,68E+02	-1,61E+01	5,46E+02	-1,57E+02	1,69E-03	1,72E-07	2,57E-03	3,90E+02	2,96E+04
500	5,61E+02	-1,52E+01	5,41E+02	-1,47E+02	1,72E-03	1,48E-07	2,61E-03	3,83E+02	2,54E+04
600	5,50E+02	-1,36E+01	5,35E+02	-1,30E+02	1,77E-03	1,14E-07	2,68E-03	3,73E+02	1,95E+04
720	5,41E+02	-1,22E+01	5,29E+02	-1,15E+02	1,81E-03	8,66E-08	2,74E-03	3,65E+02	1,48E+04
750	5,39E+02	-1,20E+01	5,28E+02	-1,12E+02	1,81E-03	8,16E-08	2,75E-03	3,64E+02	1,40E+04
800	5,36E+02	-1,15E+01	5,26E+02	-1,07E+02	1,83E-03	7,41E-08	2,77E-03	3,61E+02	1,27E+04
900	5,31E+02	-1,07E+01	5,22E+02	-9,88E+01	1,85E-03	6,19E-08	2,80E-03	3,57E+02	1,06E+04
1000	5,27E+02	-1,00E+01	5,19E+02	-9,20E+01	1,87E-03	5,26E-08	2,83E-03	3,53E+02	9,03E+03
1200	5,21E+02	-8,96E+00	5,15E+02	-8,12E+01	1,90E-03	3,96E-08	2,87E-03	3,48E+02	6,80E+03
1500	5,15E+02	-7,78E+00	5,10E+02	-6,97E+01	1,93E-03	2,79E-08	2,92E-03	3,43E+02	4,79E+03
1800	5,10E+02	-6,93E+00	5,06E+02	-6,15E+01	1,95E-03	2,09E-08	2,95E-03	3,39E+02	3,59E+03
2000	5,08E+02	-6,48E+00	5,04E+02	-5,73E+01	1,96E-03	1,77E-08	2,97E-03	3,37E+02	3,04E+03
2400	5,04E+02	-5,76E+00	5,01E+02	-5,06E+01	1,98E-03	1,32E-08	3,00E-03	3,34E+02	2,27E+03
2500	5,03E+02	-5,62E+00	5,01E+02	-4,92E+01	1,98E-03	1,24E-08	3,00E-03	3,33E+02	2,12E+03
3000	5,00E+02	-4,99E+00	4,98E+02	-4,35E+01	1,99E-03	9,24E-09	3,02E-03	3,31E+02	1,58E+03
3600	4,97E+02	-4,43E+00	4,95E+02	-3,84E+01	2,01E-03	6,88E-09	3,04E-03	3,29E+02	1,18E+03
4000	4,95E+02	-4,14E+00	4,94E+02	-3,58E+01	2,01E-03	5,81E-09	3,05E-03	3,28E+02	9,96E+02

4500	4,94E+02	-3,84E+00	4,93E+02	-3,31E+01	2,02E-03	4,80E-09	3,06E-03	3,26E+02	8,23E+02
5000	4,92E+02	-3,59E+00	4,91E+02	-3,08E+01	2,03E-03	4,04E-09	3,07E-03	3,25E+02	6,94E+02
6000	4,90E+02	-3,20E+00	4,90E+02	-2,73E+01	2,04E-03	3,01E-09	3,09E-03	3,24E+02	5,17E+02
7200	4,89E+02	-2,85E+00	4,88E+02	-2,43E+01	2,04E-03	2,25E-09	3,10E-03	3,23E+02	3,86E+02
7500	4,88E+02	-2,78E+00	4,88E+02	-2,37E+01	2,05E-03	2,11E-09	3,10E-03	3,22E+02	3,62E+02
8000	4,88E+02	-2,68E+00	4,87E+02	-2,28E+01	2,05E-03	1,90E-09	3,11E-03	3,22E+02	3,27E+02
9000	4,87E+02	-2,49E+00	4,86E+02	-2,12E+01	2,05E-03	1,58E-09	3,11E-03	3,21E+02	2,71E+02
10000	4,86E+02	-2,34E+00	4,86E+02	-1,99E+01	2,06E-03	1,34E-09	3,12E-03	3,21E+02	2,30E+02
12000	4,85E+02	-2,11E+00	4,84E+02	-1,79E+01	2,06E-03	1,01E-09	3,13E-03	3,20E+02	1,73E+02
15000	4,83E+02	-1,88E+00	4,83E+02	-1,58E+01	2,07E-03	7,19E-10	3,14E-03	3,19E+02	1,23E+02
18000	4,82E+02	-1,72E+00	4,82E+02	-1,45E+01	2,07E-03	5,50E-10	3,14E-03	3,18E+02	9,43E+01
20000	4,82E+02	-1,64E+00	4,81E+02	-1,38E+01	2,08E-03	4,73E-10	3,15E-03	3,18E+02	8,11E+01
24000	4,81E+02	-1,52E+00	4,81E+02	-1,28E+01	2,08E-03	3,66E-10	3,15E-03	3,17E+02	6,28E+01
25000	4,80E+02	-1,50E+00	4,80E+02	-1,26E+01	2,08E-03	3,47E-10	3,15E-03	3,17E+02	5,94E+01
30000	4,80E+02	-1,41E+00	4,79E+02	-1,18E+01	2,08E-03	2,72E-10	3,16E-03	3,16E+02	4,67E+01
36000	4,79E+02	-1,34E+00	4,79E+02	-1,12E+01	2,09E-03	2,16E-10	3,17E-03	3,16E+02	3,71E+01
40000	4,78E+02	-1,31E+00	4,78E+02	-1,10E+01	2,09E-03	1,91E-10	3,17E-03	3,16E+02	3,27E+01
45000	4,78E+02	-1,29E+00	4,78E+02	-1,07E+01	2,09E-03	1,66E-10	3,17E-03	3,15E+02	2,85E+01
50000	4,77E+02	-1,27E+00	4,77E+02	-1,06E+01	2,09E-03	1,48E-10	3,18E-03	3,15E+02	2,54E+01
60000	4,77E+02	-1,26E+00	4,76E+02	-1,05E+01	2,10E-03	1,22E-10	3,18E-03	3,14E+02	2,10E+01
72000	4,76E+02	-1,27E+00	4,76E+02	-1,05E+01	2,10E-03	1,03E-10	3,19E-03	3,14E+02	1,76E+01
75000	4,75E+02	-1,27E+00	4,75E+02	-1,05E+01	2,10E-03	9,88E-11	3,19E-03	3,14E+02	1,69E+01
80000	4,75E+02	-1,28E+00	4,75E+02	-1,06E+01	2,10E-03	9,33E-11	3,19E-03	3,13E+02	1,60E+01
90000	4,75E+02	-1,30E+00	4,75E+02	-1,07E+01	2,11E-03	8,43E-11	3,19E-03	3,13E+02	1,45E+01

Fonte: elaborado pelo autor.

**Tabela 15 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de argila**

f (Hz)	ARGILA								
	MAG. Z( $\Omega$ )	FASE Z( $^\circ$ )	RE. Z( $\Omega$ )	IM. Z( $\Omega$ )	G <sub>a</sub> (S)	C <sub>sa</sub> (F)	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	$\epsilon'_r$
20	1,28E+03	-8,29E+00	1,27E+03	-1,85E+02	7,72E-04	8,95E-07	1,17E-03	8,55E+02	1,53E+05
24	1,41E+03	-1,21E+01	1,38E+03	-2,96E+02	6,93E-04	9,88E-07	1,05E-03	9,51E+02	1,69E+05
25	1,40E+03	-1,20E+01	1,37E+03	-2,92E+02	6,97E-04	9,44E-07	1,06E-03	9,46E+02	1,62E+05
30	1,37E+03	-1,15E+01	1,34E+03	-2,72E+02	7,14E-04	7,68E-07	1,08E-03	9,23E+02	1,32E+05
36	1,34E+03	-1,09E+01	1,32E+03	-2,53E+02	7,31E-04	6,20E-07	1,11E-03	9,03E+02	1,06E+05
40	1,33E+03	-1,05E+01	1,31E+03	-2,42E+02	7,40E-04	5,46E-07	1,12E-03	8,91E+02	9,36E+04
45	1,31E+03	-1,01E+01	1,29E+03	-2,30E+02	7,50E-04	4,72E-07	1,14E-03	8,80E+02	8,09E+04
50	1,30E+03	-9,71E+00	1,28E+03	-2,19E+02	7,58E-04	4,13E-07	1,15E-03	8,70E+02	7,08E+04
60	1,28E+03	-9,04E+00	1,26E+03	-2,01E+02	7,73E-04	3,26E-07	1,17E-03	8,54E+02	5,59E+04
72	1,26E+03	-8,38E+00	1,25E+03	-1,83E+02	7,86E-04	2,56E-07	1,19E-03	8,39E+02	4,39E+04
75	1,26E+03	-8,24E+00	1,24E+03	-1,80E+02	7,88E-04	2,42E-07	1,20E-03	8,36E+02	4,16E+04
80	1,25E+03	-8,02E+00	1,24E+03	-1,74E+02	7,93E-04	2,22E-07	1,20E-03	8,32E+02	3,81E+04
90	1,24E+03	-7,60E+00	1,23E+03	-1,64E+02	8,00E-04	1,89E-07	1,21E-03	8,24E+02	3,24E+04
100	1,23E+03	-7,25E+00	1,22E+03	-1,55E+02	8,06E-04	1,63E-07	1,22E-03	8,18E+02	2,80E+04

120	1,22E+03	-6,66E+00	1,21E+03	-1,41E+02	8,16E-04	1,26E-07	1,24E-03	8,08E+02	2,17E+04
150	1,20E+03	-5,99E+00	1,20E+03	-1,25E+02	8,28E-04	9,22E-08	1,25E-03	7,97E+02	1,58E+04
180	1,19E+03	-5,50E+00	1,19E+03	-1,14E+02	8,36E-04	7,11E-08	1,27E-03	7,89E+02	1,22E+04
200	1,19E+03	-5,23E+00	1,18E+03	-1,08E+02	8,40E-04	6,12E-08	1,27E-03	7,85E+02	1,05E+04
240	1,18E+03	-4,81E+00	1,17E+03	-9,87E+01	8,47E-04	4,72E-08	1,28E-03	7,79E+02	8,10E+03
250	1,17E+03	-4,72E+00	1,17E+03	-9,67E+01	8,48E-04	4,46E-08	1,29E-03	7,77E+02	7,65E+03
300	1,17E+03	-4,35E+00	1,16E+03	-8,85E+01	8,54E-04	3,45E-08	1,30E-03	7,72E+02	5,91E+03
360	1,16E+03	-4,02E+00	1,16E+03	-8,13E+01	8,60E-04	2,67E-08	1,30E-03	7,67E+02	4,58E+03
400	1,16E+03	-3,84E+00	1,15E+03	-7,75E+01	8,63E-04	2,31E-08	1,31E-03	7,64E+02	3,96E+03
450	1,15E+03	-3,66E+00	1,15E+03	-7,36E+01	8,67E-04	1,96E-08	1,31E-03	7,61E+02	3,37E+03
500	1,15E+03	-3,52E+00	1,15E+03	-7,04E+01	8,69E-04	1,70E-08	1,32E-03	7,59E+02	2,92E+03
600	1,14E+03	-3,28E+00	1,14E+03	-6,54E+01	8,74E-04	1,33E-08	1,33E-03	7,55E+02	2,28E+03
720	1,14E+03	-3,08E+00	1,14E+03	-6,11E+01	8,78E-04	1,05E-08	1,33E-03	7,51E+02	1,79E+03
750	1,14E+03	-3,04E+00	1,13E+03	-6,03E+01	8,79E-04	9,92E-09	1,33E-03	7,50E+02	1,70E+03
800	1,13E+03	-2,98E+00	1,13E+03	-5,90E+01	8,81E-04	9,13E-09	1,34E-03	7,49E+02	1,57E+03
900	1,13E+03	-2,88E+00	1,13E+03	-5,68E+01	8,83E-04	7,86E-09	1,34E-03	7,47E+02	1,35E+03
1000	1,13E+03	-2,80E+00	1,13E+03	-5,50E+01	8,86E-04	6,88E-09	1,34E-03	7,45E+02	1,18E+03
1200	1,12E+03	-2,67E+00	1,12E+03	-5,24E+01	8,89E-04	5,51E-09	1,35E-03	7,42E+02	9,44E+02
1500	1,12E+03	-2,55E+00	1,12E+03	-4,98E+01	8,94E-04	4,23E-09	1,36E-03	7,38E+02	7,26E+02
1800	1,11E+03	-2,48E+00	1,11E+03	-4,82E+01	8,98E-04	3,44E-09	1,36E-03	7,35E+02	5,90E+02
2000	1,11E+03	-2,45E+00	1,11E+03	-4,75E+01	9,00E-04	3,06E-09	1,36E-03	7,33E+02	5,26E+02
2400	1,11E+03	-2,41E+00	1,11E+03	-4,65E+01	9,03E-04	2,52E-09	1,37E-03	7,30E+02	4,32E+02
2500	1,11E+03	-2,41E+00	1,10E+03	-4,64E+01	9,04E-04	2,42E-09	1,37E-03	7,30E+02	4,15E+02
3000	1,10E+03	-2,39E+00	1,10E+03	-4,59E+01	9,07E-04	2,01E-09	1,38E-03	7,27E+02	3,44E+02
3600	1,10E+03	-2,39E+00	1,10E+03	-4,57E+01	9,11E-04	1,68E-09	1,38E-03	7,24E+02	2,88E+02
4000	1,09E+03	-2,40E+00	1,09E+03	-4,58E+01	9,13E-04	1,52E-09	1,38E-03	7,22E+02	2,61E+02
4500	1,09E+03	-2,41E+00	1,09E+03	-4,59E+01	9,16E-04	1,36E-09	1,39E-03	7,20E+02	2,34E+02
5000	1,09E+03	-2,43E+00	1,09E+03	-4,62E+01	9,18E-04	1,24E-09	1,39E-03	7,19E+02	2,13E+02
6000	1,08E+03	-2,47E+00	1,08E+03	-4,68E+01	9,22E-04	1,06E-09	1,40E-03	7,16E+02	1,81E+02
7200	1,08E+03	-2,53E+00	1,08E+03	-4,76E+01	9,26E-04	9,03E-10	1,40E-03	7,12E+02	1,55E+02
7500	1,08E+03	-2,54E+00	1,08E+03	-4,78E+01	9,27E-04	8,73E-10	1,41E-03	7,12E+02	1,50E+02
8000	1,08E+03	-2,56E+00	1,08E+03	-4,81E+01	9,28E-04	8,27E-10	1,41E-03	7,11E+02	1,42E+02
9000	1,07E+03	-2,61E+00	1,07E+03	-4,88E+01	9,31E-04	7,50E-10	1,41E-03	7,08E+02	1,29E+02
10000	1,07E+03	-2,65E+00	1,07E+03	-4,95E+01	9,33E-04	6,88E-10	1,42E-03	7,07E+02	1,18E+02
12000	1,06E+03	-2,74E+00	1,06E+03	-5,08E+01	9,38E-04	5,95E-10	1,42E-03	7,03E+02	1,02E+02
15000	1,06E+03	-2,85E+00	1,06E+03	-5,27E+01	9,44E-04	4,99E-10	1,43E-03	6,99E+02	8,56E+01
18000	1,05E+03	-2,96E+00	1,05E+03	-5,43E+01	9,49E-04	4,33E-10	1,44E-03	6,95E+02	7,43E+01
20000	1,05E+03	-3,02E+00	1,05E+03	-5,53E+01	9,52E-04	4,00E-10	1,44E-03	6,93E+02	6,85E+01
24000	1,04E+03	-3,14E+00	1,04E+03	-5,71E+01	9,57E-04	3,48E-10	1,45E-03	6,89E+02	5,96E+01
25000	1,04E+03	-3,16E+00	1,04E+03	-5,75E+01	9,59E-04	3,37E-10	1,45E-03	6,88E+02	5,78E+01
30000	1,04E+03	-3,29E+00	1,03E+03	-5,94E+01	9,64E-04	2,94E-10	1,46E-03	6,84E+02	5,04E+01
36000	1,03E+03	-3,42E+00	1,03E+03	-6,14E+01	9,70E-04	2,57E-10	1,47E-03	6,80E+02	4,40E+01
40000	1,03E+03	-3,51E+00	1,02E+03	-6,27E+01	9,74E-04	2,37E-10	1,48E-03	6,77E+02	4,07E+01

45000	1,02E+03	-3,60E+00	1,02E+03	-6,42E+01	9,78E-04	2,18E-10	1,48E-03	6,75E+02	3,73E+01
50000	1,02E+03	-3,69E+00	1,01E+03	-6,55E+01	9,81E-04	2,02E-10	1,49E-03	6,72E+02	3,46E+01
60000	1,01E+03	-3,86E+00	1,01E+03	-6,79E+01	9,88E-04	1,77E-10	1,50E-03	6,67E+02	3,03E+01
72000	1,00E+03	-4,04E+00	1,00E+03	-7,06E+01	9,95E-04	1,55E-10	1,51E-03	6,63E+02	2,66E+01
75000	1,00E+03	-4,08E+00	9,98E+02	-7,12E+01	9,97E-04	1,51E-10	1,51E-03	6,62E+02	2,59E+01
80000	9,98E+02	-4,15E+00	9,96E+02	-7,22E+01	9,99E-04	1,44E-10	1,52E-03	6,60E+02	2,47E+01
90000	9,93E+02	-4,28E+00	9,91E+02	-7,42E+01	1,00E-03	1,33E-10	1,52E-03	6,57E+02	2,28E+01

Fonte: elaborado pelo autor.

**Tabela 16 – Valores medidos com a sonda coaxial para a amostra de cimento**

f (Hz)	CIMENTO								
	MAG. Z( $\Omega$ )	FASE Z( $^\circ$ )	RE. Z( $\Omega$ )	IM. Z( $\Omega$ )	G <sub>a</sub> (S)	C <sub>sa</sub> (F)	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	$\epsilon'_r$
20	1,09E+07	-1,08E+01	1,07E+07	-2,05E+06	9,01E-08	1,37E-10	1,37E-07	7,32E+06	2,35E+01
24	1,07E+07	-1,13E+01	1,05E+07	-2,11E+06	9,13E-08	1,21E-10	1,38E-07	7,23E+06	2,08E+01
25	1,08E+07	-1,16E+01	1,05E+07	-2,16E+06	9,10E-08	1,19E-10	1,38E-07	7,25E+06	2,03E+01
30	1,06E+07	-1,23E+01	1,04E+07	-2,26E+06	9,20E-08	1,06E-10	1,39E-07	7,17E+06	1,82E+01
36	1,04E+07	-1,32E+01	1,02E+07	-2,39E+06	9,32E-08	9,70E-11	1,41E-07	7,08E+06	1,66E+01
40	1,04E+07	-1,35E+01	1,01E+07	-2,43E+06	9,38E-08	8,99E-11	1,42E-07	7,03E+06	1,54E+01
45	1,03E+07	-1,44E+01	9,96E+06	-2,55E+06	9,42E-08	8,52E-11	1,43E-07	7,00E+06	1,46E+01
50	1,02E+07	-1,52E+01	9,80E+06	-2,65E+06	9,51E-08	8,20E-11	1,44E-07	6,94E+06	1,41E+01
60	9,99E+06	-1,68E+01	9,56E+06	-2,88E+06	9,59E-08	7,66E-11	1,45E-07	6,88E+06	1,31E+01
72	9,68E+06	-1,64E+01	9,29E+06	-2,73E+06	9,91E-08	6,44E-11	1,50E-07	6,66E+06	1,10E+01
75	9,61E+06	-1,63E+01	9,23E+06	-2,69E+06	9,99E-08	6,19E-11	1,51E-07	6,60E+06	1,06E+01
80	9,56E+06	-1,69E+01	9,14E+06	-2,79E+06	1,00E-07	6,07E-11	1,52E-07	6,59E+06	1,04E+01
90	9,37E+06	-1,76E+01	8,94E+06	-2,83E+06	1,02E-07	5,70E-11	1,54E-07	6,49E+06	9,78E+00
100	9,17E+06	-1,84E+01	8,70E+06	-2,90E+06	1,03E-07	5,48E-11	1,57E-07	6,38E+06	9,40E+00
120	8,86E+06	-1,94E+01	8,36E+06	-2,94E+06	1,06E-07	4,97E-11	1,61E-07	6,19E+06	8,52E+00
150	8,46E+06	-2,02E+01	7,94E+06	-2,92E+06	1,11E-07	4,34E-11	1,68E-07	5,94E+06	7,44E+00
180	8,12E+06	-2,10E+01	7,58E+06	-2,91E+06	1,15E-07	3,90E-11	1,74E-07	5,74E+06	6,68E+00
200	7,93E+06	-2,13E+01	7,39E+06	-2,88E+06	1,17E-07	3,65E-11	1,78E-07	5,61E+06	6,26E+00
240	7,61E+06	-2,21E+01	7,05E+06	-2,86E+06	1,22E-07	3,27E-11	1,85E-07	5,41E+06	5,61E+00
250	7,55E+06	-2,22E+01	6,99E+06	-2,85E+06	1,23E-07	3,18E-11	1,86E-07	5,38E+06	5,46E+00
300	7,24E+06	-2,29E+01	6,67E+06	-2,81E+06	1,27E-07	2,85E-11	1,93E-07	5,18E+06	4,88E+00
360	6,95E+06	-2,35E+01	6,37E+06	-2,77E+06	1,32E-07	2,54E-11	2,00E-07	5,00E+06	4,35E+00
400	6,79E+06	-2,39E+01	6,21E+06	-2,76E+06	1,35E-07	2,38E-11	2,04E-07	4,90E+06	4,07E+00
450	6,62E+06	-2,44E+01	6,03E+06	-2,74E+06	1,38E-07	2,21E-11	2,08E-07	4,80E+06	3,79E+00
500	6,47E+06	-2,49E+01	5,87E+06	-2,72E+06	1,40E-07	2,07E-11	2,12E-07	4,71E+06	3,55E+00
600	6,21E+06	-2,59E+01	5,59E+06	-2,71E+06	1,45E-07	1,86E-11	2,20E-07	4,55E+06	3,20E+00
720	5,95E+06	-2,70E+01	5,30E+06	-2,70E+06	1,50E-07	1,69E-11	2,27E-07	4,41E+06	2,89E+00
750	5,90E+06	-2,73E+01	5,24E+06	-2,71E+06	1,51E-07	1,65E-11	2,28E-07	4,38E+06	2,83E+00
800	5,82E+06	-2,78E+01	5,14E+06	-2,71E+06	1,52E-07	1,60E-11	2,31E-07	4,34E+06	2,74E+00
900	5,65E+06	-2,88E+01	4,96E+06	-2,72E+06	1,55E-07	1,51E-11	2,35E-07	4,25E+06	2,58E+00
1000	5,51E+06	-2,97E+01	4,78E+06	-2,73E+06	1,58E-07	1,43E-11	2,39E-07	4,18E+06	2,46E+00

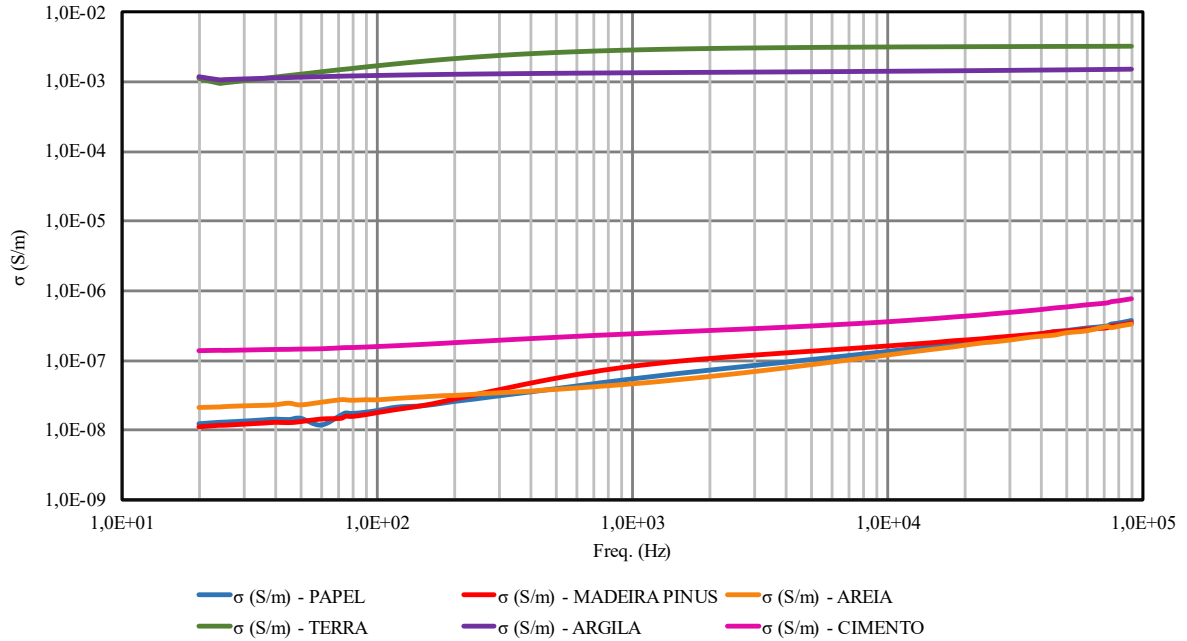
1200	5,25E+06	-3,16E+01	4,47E+06	-2,75E+06	1,62E-07	1,32E-11	2,46E-07	4,06E+06	2,27E+00
1500	4,91E+06	-3,43E+01	4,06E+06	-2,77E+06	1,68E-07	1,22E-11	2,55E-07	3,92E+06	2,08E+00
1800	4,63E+06	-3,67E+01	3,71E+06	-2,77E+06	1,73E-07	1,14E-11	2,62E-07	3,81E+06	1,96E+00
2000	4,46E+06	-3,83E+01	3,50E+06	-2,77E+06	1,76E-07	1,11E-11	2,66E-07	3,75E+06	1,90E+00
2400	4,16E+06	-4,12E+01	3,13E+06	-2,74E+06	1,81E-07	1,05E-11	2,74E-07	3,65E+06	1,80E+00
2500	4,09E+06	-4,19E+01	3,05E+06	-2,74E+06	1,82E-07	1,04E-11	2,76E-07	3,63E+06	1,78E+00
3000	3,78E+06	-4,51E+01	2,67E+06	-2,67E+06	1,87E-07	9,94E-12	2,84E-07	3,52E+06	1,71E+00
3600	3,45E+06	-4,83E+01	2,29E+06	-2,58E+06	1,93E-07	9,57E-12	2,92E-07	3,42E+06	1,64E+00
4000	3,26E+06	-5,02E+01	2,09E+06	-2,51E+06	1,96E-07	9,38E-12	2,97E-07	3,36E+06	1,61E+00
4500	3,05E+06	-5,24E+01	1,86E+06	-2,42E+06	2,00E-07	9,18E-12	3,04E-07	3,29E+06	1,57E+00
5000	2,86E+06	-5,43E+01	1,67E+06	-2,32E+06	2,04E-07	9,02E-12	3,09E-07	3,23E+06	1,55E+00
6000	2,55E+06	-5,74E+01	1,37E+06	-2,15E+06	2,11E-07	8,77E-12	3,20E-07	3,12E+06	1,50E+00
7200	2,25E+06	-6,05E+01	1,11E+06	-1,96E+06	2,19E-07	8,55E-12	3,32E-07	3,01E+06	1,47E+00
7500	2,19E+06	-6,12E+01	1,05E+06	-1,91E+06	2,21E-07	8,51E-12	3,35E-07	2,99E+06	1,46E+00
8000	2,09E+06	-6,22E+01	9,73E+05	-1,84E+06	2,24E-07	8,44E-12	3,39E-07	2,95E+06	1,45E+00
9000	1,91E+06	-6,40E+01	8,38E+05	-1,72E+06	2,29E-07	8,32E-12	3,48E-07	2,87E+06	1,43E+00
10000	1,76E+06	-6,55E+01	7,31E+05	-1,60E+06	2,35E-07	8,21E-12	3,56E-07	2,81E+06	1,41E+00
12000	1,53E+06	-6,80E+01	5,72E+05	-1,41E+06	2,46E-07	8,06E-12	3,72E-07	2,68E+06	1,38E+00
15000	1,27E+06	-7,07E+01	4,20E+05	-1,20E+06	2,60E-07	7,89E-12	3,95E-07	2,53E+06	1,35E+00
18000	1,09E+06	-7,26E+01	3,27E+05	-1,04E+06	2,75E-07	7,73E-12	4,16E-07	2,40E+06	1,33E+00
20000	9,93E+05	-7,37E+01	2,78E+05	-9,53E+05	2,82E-07	7,69E-12	4,28E-07	2,34E+06	1,32E+00
24000	8,45E+05	-7,54E+01	2,12E+05	-8,18E+05	2,98E-07	7,60E-12	4,51E-07	2,22E+06	1,30E+00
25000	8,14E+05	-7,58E+01	2,00E+05	-7,89E+05	3,02E-07	7,58E-12	4,58E-07	2,18E+06	1,30E+00
30000	6,90E+05	-7,72E+01	1,52E+05	-6,73E+05	3,20E-07	7,49E-12	4,85E-07	2,06E+06	1,29E+00
36000	5,83E+05	-7,86E+01	1,16E+05	-5,72E+05	3,40E-07	7,43E-12	5,15E-07	1,94E+06	1,27E+00
40000	5,28E+05	-7,93E+01	9,84E+04	-5,19E+05	3,53E-07	7,40E-12	5,35E-07	1,87E+06	1,27E+00
45000	4,73E+05	-7,99E+01	8,29E+04	-4,65E+05	3,71E-07	7,37E-12	5,63E-07	1,78E+06	1,26E+00
50000	4,27E+05	-8,06E+01	6,97E+04	-4,21E+05	3,83E-07	7,36E-12	5,80E-07	1,72E+06	1,26E+00
60000	3,57E+05	-8,16E+01	5,23E+04	-3,53E+05	4,11E-07	7,36E-12	6,24E-07	1,60E+06	1,26E+00
72000	2,94E+05	-8,26E+01	3,78E+04	-2,92E+05	4,37E-07	7,45E-12	6,62E-07	1,51E+06	1,28E+00
75000	2,84E+05	-8,26E+01	3,67E+04	-2,81E+05	4,57E-07	7,42E-12	6,92E-07	1,44E+06	1,27E+00
80000	2,65E+05	-8,29E+01	3,28E+04	-2,62E+05	4,69E-07	7,46E-12	7,12E-07	1,41E+06	1,28E+00
90000	2,32E+05	-8,33E+01	2,72E+04	-2,31E+05	5,03E-07	7,56E-12	7,63E-07	1,31E+06	1,30E+00

Fonte: elaborado pelo autor.



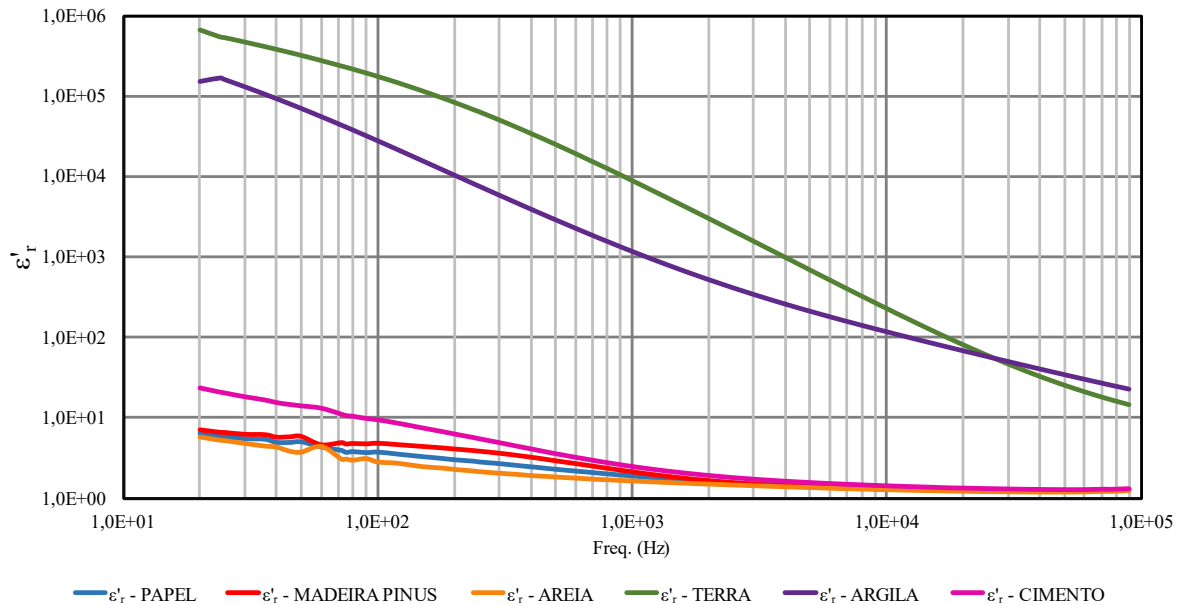
## ANEXO B – GRÁFICOS COM OS DADOS MEDIDOS

Figura 46 – Valores de condutividade elétrica obtidos a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 47 – Valores de permissividade elétrica relativa obtidos a partir das medições nas amostras para as frequências de 20 Hz até 90 kHz



Fonte: elaborado pelo autor.

## ANEXO C – CALIBRAÇÃO DO VNA R&S ZBN4

*Antes de realizar qualquer medição é necessário calibrar o VNA. A calibração fornece parâmetros para que VNA corrija a medida e deve ser executada para cada intervalo de frequência de interesse.*

*O VNA ZBN4 possui diversos tipos de calibração e o processo é realizado por meio de uma função do próprio equipamento denominada “Cal”. Entre os tipos de calibração foi escolhido o TOSM (Through – Open – Short – Match), pois ele permite calibrar as duas portas do VNA para os valores refletidos e transmitidos. Além disso, o TOSM é definido como processo de calibração de alta precisão.*

*Durante o processo de calibração TOSM, é necessário calibrar cada porta com uma carga que represente um circuito aberto (Open), um curto-circuito (Short) e um valor conhecido (Match). Além disso, uma porta do VNA deve ser conectada na outra por meio de um cabo (Through). As cargas são obtidas por meio de um kit de calibração de RF (Rádio Frequência), o qual é apresentado na Figura 48.*

*Figura 48 – Carga de RF padronizada do Maglab*



*Fonte: elaborado pelo autor*

*O kit de calibração de RF utilizado é fabricado pela Rohde & Schwarz e possui três terminais:*

- *Short: curto-circuito;*
- *Open: circuito aberto;*
- *Match: impedância padronizada de 50  $\Omega$ .*

*A conexão entre as portas (Through) é estabelecida usando um cabo coaxial de alta precisão que será descrito no ANEXO C.*

## ANEXO D – CABO COAXIAL ROSENBERGER LU7-259-1200

Para realizar o processo de calibração e para conectar a sonda coaxial de terminação aberta do Maglab ao VNA é utilizado um cabo coaxial de alta precisão da marca Rosenberger. Na Figura 49 podem ser vistas duas fotos do cabo utilizado.

Figura 49 – Cabo coaxial usado no processo de medição. (a) Foto do cabo coaxial. (b) Detalhe do conector tipo N



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor

Na Tabela 17 podem ser conferidas as características do cabo coaxial utilizado.

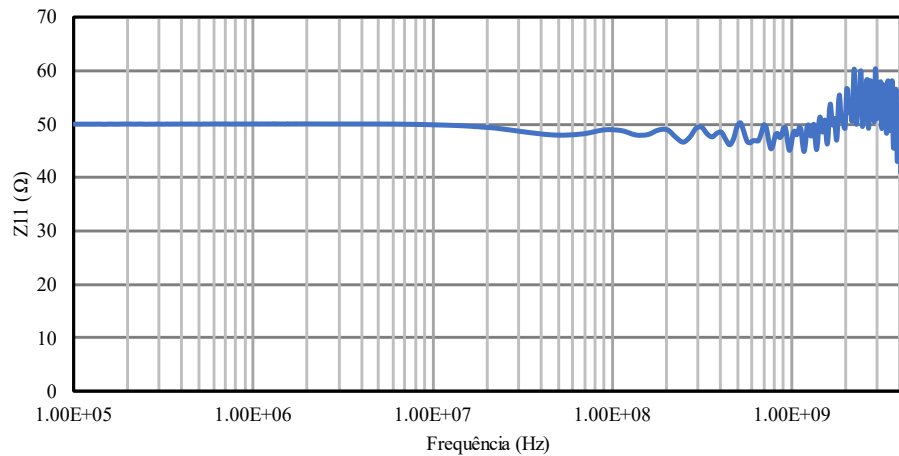
Tabela 17 – Características do cabo coaxial Rosenberger LU7-259-1200

Marca	Rosenberger
Modelo	LU7-259-1200
Comprimento	1m
Conector	Tipo N
Impedância característica	50Ω
Frequência de operação	Até 6GHz

Fonte: elaborado pelo autor

Com o auxílio do VNA, foi realizado a medição da impedância e dos parâmetros de reflexão e de transmissão desse cabo coaxial. Essas medidas foram obtidas para todo o intervalo de frequências do VNA (de 100kHz até 4,5GHz).

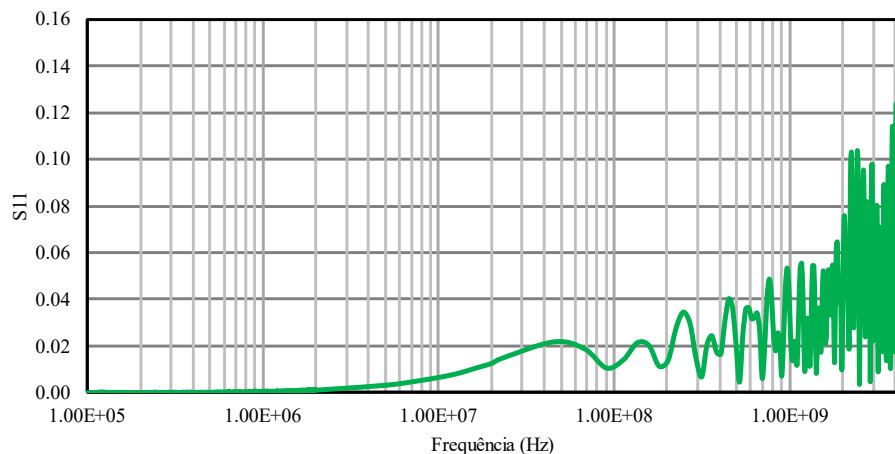
*Figura 50 – Magnitude da impedância de entrada medida do cabo coaxial LU7-259-1200*



*Fonte: elaborado pelo autor*

*No gráfico da Figura 50, observa-se a impedância de entrada do cabo coaxial pela frequência. Conforme pode ser visto, a impedância de entrada do cabo mantém-se próximo de  $50\Omega$ , a variação é inferior a 5% até 225MHz, inferior a 10% até 1,17GHz, e não superior a 20,8% ao longo de todo o intervalo de frequências medido.*

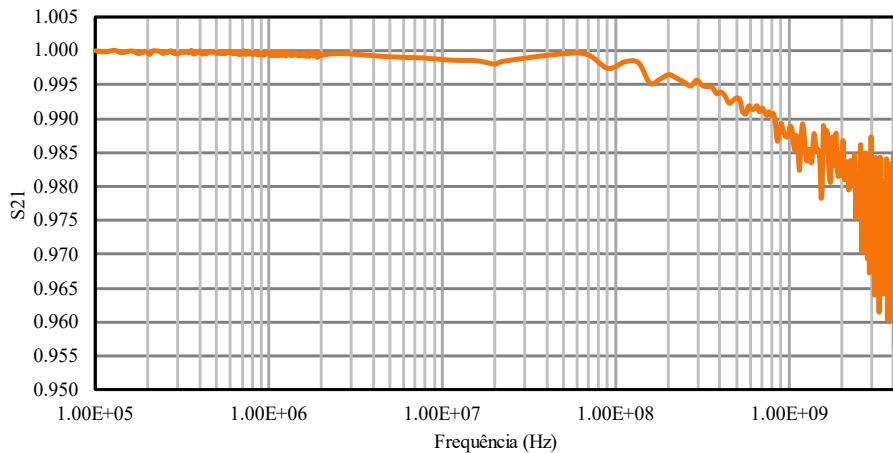
*Figura 51 – Magnitude do parâmetro de reflexão medido do cabo coaxial LU7-259-1200*



*Fonte: elaborado pelo autor*

*Na Figura 51, é apresentado um gráfico com as medidas da magnitude do parâmetro de reflexão do cabo coaxial. Observa-se que a magnitude do parâmetro de reflexão não supera 0,14 ao longo de todo o intervalo de medição.*

*Figura 52 – Magnitude do parâmetro de transmissão medido do cabo coaxial LU7-259-1200*



*Fonte: elaborado pelo autor*

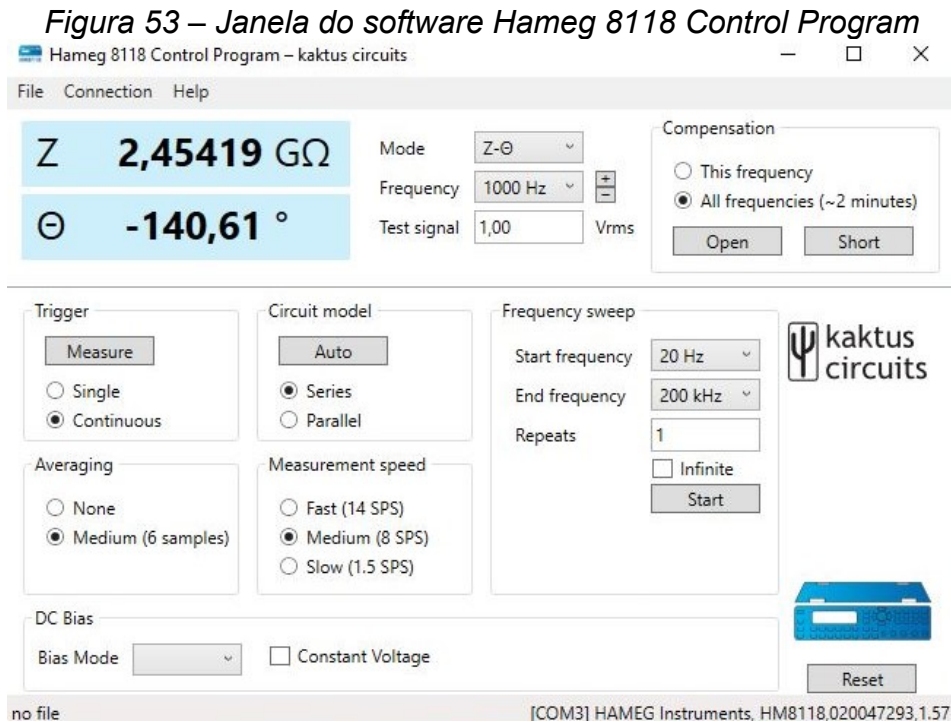
*Na Figura 52, é mostrada um gráfico com a magnitude do parâmetro de transmissão medido no cabo coaxial. Nota-se que o valor da magnitude do parâmetro de transmissão é superior 0,95 para toda a faixa de frequência.*

*Portanto, conclui-se que o cabo coaxial utilizado possui a qualidade adequada para este trabalho.*

## **ANEXO E – CALIBRAÇÃO DA PONTE RLC R&S HAMEG HM8118**

*Para evitar erros nas medidas e compensar as características dos cabos utilizados, é necessário calibrar a ponte RLC para cada frequência de análise desejada.*

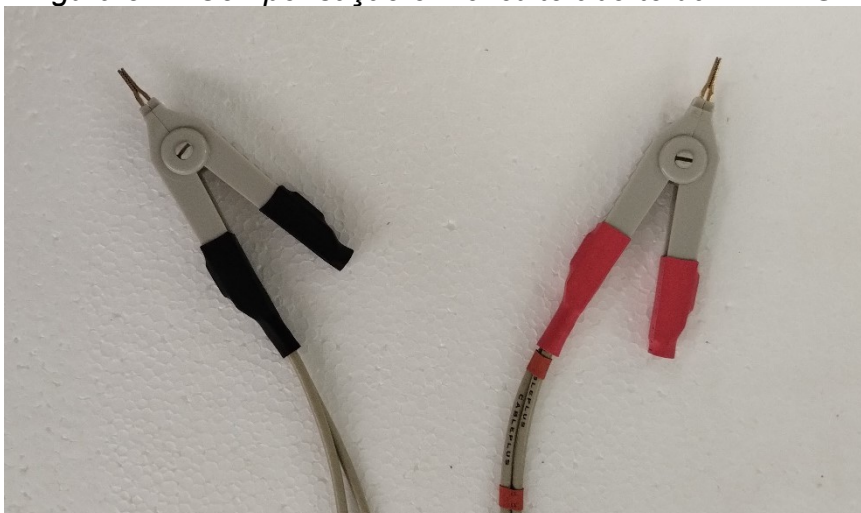
*A ponte HAMEG HM8118 possui uma função calibração automática que pode ser executada para todo o intervalo de frequência de interesse. Para facilitar o processo de calibração e de medição a ponte HAMEG HM8118 é utilizada em conjunto com um software que permite controlá-la a partir de um computador. O software usado é o “Hameg 8118 Control Program” desenvolvido pela Kaktus Circuits. A janela do software pode ser vista na Figura 53.*



Fonte: elaborado pelo autor.

Para executar a calibração, primeiro seleciona-se a frequência de interesse em “Frequency sweep”. Após seleciona-se em “Compensation” o “All frequencies”. Assim, executa-se o ensaio de circuito aberto clicando em “Open” e mantendo as ponteiros afastados conforme demonstrado na Figura 54.

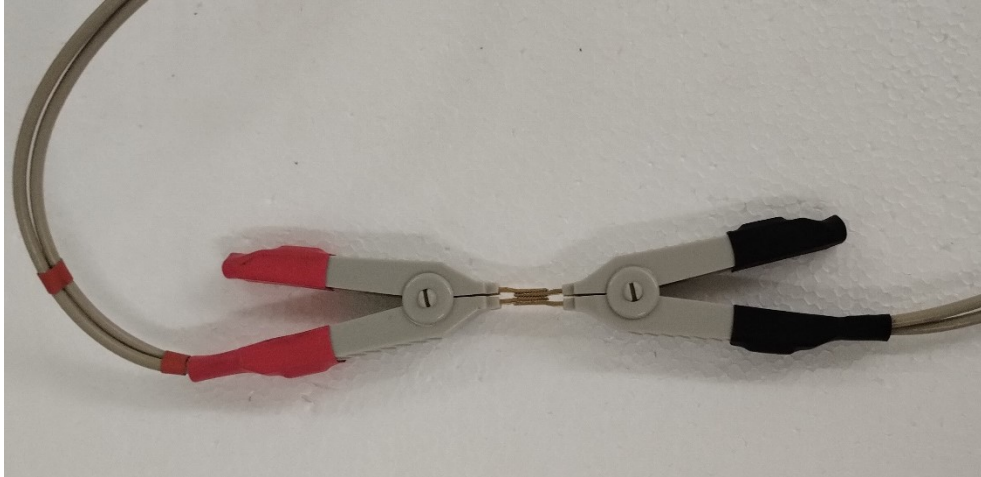
**Figura 54 – Compensação em circuito aberto da HAMEG HM8118**



Fonte: elaborado pelo autor.

Após, executa-se a compensação de curto-circuito conectando uma ponteira na outra, conforme Figura 55, e clicando em “Short”.

*Figura 55 – Compensação em curto-circuito da HAMEG HM8118*



*Fonte: elaborado pelo autor.*

*Ao executar esses dois procedimentos, a ponte RLC estará calibrada para o intervalo de frequências de interesse.*