

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Análise do Tratamento Térmico do Argilomineral Vermiculita Utilizando Energia de Micro-ondas

João Rubens Alves Zacarias

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Glauco Fontgalland, Dr., UFCG

Orientador

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr., IFPB

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©João Rubens Alves Zacarias, Dezembro de 2018

Z13a

Zacarias, João Rubens Alves.

Análise do tratamento térmico do argilomineral vermiculita utilizando energia de micro-ondas / João Rubens Alves Zacarias. - Campina Grande, 2019.

74 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Glauco Fontgalland, Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho.

Referências.

1. Argilomineral. 2. Energia de Micro-Ondas. 3. Expansão. 4. Micro-Ondas. 5. Tratamento Térmico. 6. Vermiculita. I. Fontgalland, Glauco. II. Carvalho, Joabson Nogueira de. III. Título.

CDU 621.3:669-15(043)

**"ANÁLISE DO TRATAMENTO TÉRMICO DO ARGILO MINERAL VERMICULITA
UTILIZANDO MICRO-ONDAS"**

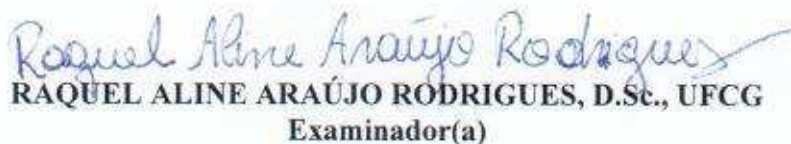
JOÃO RUBENS ALVES ZACARIAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11/12/2018


GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador(a)


JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO, Dr, IFPB
Orientador(a)


WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


RAQUEL ALINE ARAÚJO RODRIGUES, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que durante todo o trabalho me deu força e coragem.

Aos meus pais, Antônio e Lusineide , ao meu irmão Lázaro e minha irmã Yara que sempre me apoiaram e perseveraram ao meu lado, mesmo estando distantes boa parte do tempo.

Um agradecimento especial ao professor Glauco Fontgalland pela orientação, motivação, paciência e críticas durante esta dissertação.

A agradeço também ao professor Joabson Nogueira pela coorientação, e ao professor Rômulo Valle por sempre está disposto ajudar e trocar ideias.

Agradeço a todos o colegas e amigos do grupo de pesquisa do Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados (LEMA) da UFCG pelo convívio, apoio nas horas necessárias e motivação.

Por último, agradeço a CAPES e CNPq pelo suporte financeiro.

Resumo

Este trabalho de dissertação apresenta os resultados do estudo do aquecimento e expansão do argilomineral vermiculita utilizando energia de micro-ondas. A vermiculita é um argilomineral utilizado em diversas áreas e apresenta valor comercial após um processo de expansão térmica. Os processos térmicos para expansão da vermiculita utilizam fontes não renováveis e que geram gases de efeito estufa. A utilização de energia de micro-ondas é uma alternativa viável para melhorar a eficiência do processo de expansão da vermiculita e mitigar a geração de gases de efeito estufa. Neste trabalho, o processo de aquecimento da vermiculita ocorreu em uma linha de transmissão curto-circuitada (guia de onda metálico), onde a amostra de vermiculita foi exposta a uma alta energia de micro-ondas. A partir de medições termográficas foi analisado e comparado o processo de aquecimento com uso de diferentes potências, em uma faixa de 50 W a 500 W. Os teste foram realizados com potências contínuas e alternadas, com finalidade melhorar a eficiência do processo de aquecimento. Para analisar a eficiência de cada teste foi observado o volume final da vermiculita expandida, tempo de processamento e energia gasta no aquecimento. Os teste com potências chaveadas apresentou redução no tempo de processamento e redução 32 % de energia utilizada em relação aos teste com potência contínua. A permissividade da vermiculita bruta e expandida foi medida nos testes, com o intuito de analisar a variação das características dielétricas. Um anel ressonante planar em microfita foi construído para caracterizar a vermiculita antes e depois do processamento.

Palavras-chaves: Argilomineral; Energia de Micro-ondas; Expansão; Micro-ondas; Tratamento Térmico; Vermiculita.

Abstract

This work presents the results of the study of heating and expansion of vermiculite using microwave energy. The vermiculite is a clay mineral used in several areas and presents commercial value after a process of thermal expansion. Thermal processes for vermiculite expansion use non-renewable sources and generate greenhouse gases. The use of microwave energy is a viable alternative to improve the efficiency of the process of vermiculite expansion and to mitigate the generation of greenhouse gases. In this work, the heating process of the vermiculite occurred in a short-circuited transmission line (metallic waveguide), where the vermiculite sample was exposed to a high microwave energy. From thermographic measurements the heating process using different powers in a range of 50 W to 500 W was analyzed and compared. The tests were carried out with continuous and alternating power, in order to improve the efficiency of the heating process. In order to analyze the efficiency of each test, the final volume of the expanded vermiculite, the processing time and the energy spent in the heating were observed. The tests with switched power showed a reduction in the processing time and a 32 % reduction of the energy used in relation to the tests with continuous power. The permittivity of the crude and expanded vermiculite was measured in the tests, in order to analyze the variation of the dielectric characteristics. A microstrip ring resonator was constructed to characterize vermiculite before and after processing.

Keywords: Clay Mineral; Expansion; Heat Treatment; Microwaves; Microwaves Energy; Vermiculite.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do Texto	4
2	Introdução à Vermiculita	5
2.1	Propriedades Físico-químicas da Vermiculita	6
2.2	Aplicações da Vermiculita	7
2.3	Produção Mundial de Vermiculita	8
2.4	Processamento da Vermiculita	10
2.5	Conclusão	14
3	Métodos de Caracterização Dielétrica em RF	15
3.1	Propriedades Dielétricas do Materiais	16
3.1.1	Permissividade Complexa e Perdas em Materiais Dielétricos	17
3.1.2	Linearidade, homogeneidade, isotropia, dispersão e tempo de relaxamento	18
3.2	Métodos de Caracterização de Propriedades de Dielétricas	21
3.2.1	Métodos de Transmissão/Reflexão	21
3.2.2	Método da Reflexão	24
3.2.3	Método Ressonante	28
3.2.4	Método ressonante em estrutura planar	30
3.3	Conclusão	31

4	Método do Anel Ressonante	32
4.1	Modelo Simplificado	33
4.2	Teoria para Técnica de Medição	36
4.3	Simulação do Anel Ressonante	40
4.4	Medições	44
4.5	Conclusão	47
5	Metodologia e Resultados	48
5.1	Sistema de processamento de vermiculita	48
5.2	Resultados	51
5.3	Conclusão	56
6	Considerações Finais e Contribuições	58
A	Código em Matlab	60
A	Informações adicionais	67
	Referências bibliográficas	70

Lista de Símbolos e Abreviaturas

μ_r Permeabilidade Relativa

ε_r Permissividade Relativa

γ Constante de Propagação

σ Condutividade Elétrica

AST Amostra Sob Teste

ASTM Sociedade Americana de Testes e Materiais

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

E Vetor Campo Elétrico

IPC Instituto Nacional de Padrões de Circuitos

LB Largura de Banda

LEMA Laboratório de Eletromagnetismo de Micro-ondas Aplicados

LMAP Laboratório de Micro-ondas de Alta Potência

LT Linha de Transmissão

NIST Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia

NRW Nicolson-Ross-Weir

pH Unidade adimensional para especificar acidez ou basicidade

Q Fator de Qualidade

RF Rádio Frequência

$\tan \delta$ Tangente de Perdas

TE Transverso Elétrico

ton Unidade de Massa (10^3kg)

VB Vermicultia Bruta

VE Vermiculita Expandida

VNA Analisador Vetorial de Rede

Lista de Tabelas

2.1	Resumo das aplicações da vermiculita nas áreas da construção civil, indústria e agricultura.	8
2.2	Produção mundial de vermiculita [DPNM, 2012].	9
2.3	Classificação do tamanho da lamela de vermiculita [REIS, 2002].	10
2.4	Consumo Mundial da Vermiculita por Tamanho de Lamela em 1999 [REIS, 2002]	10
4.1	Resultado para as permissividades e tangente perdas calculadas para três superestratos distintos.	46
5.1	Volume, temperatura e expansão relativa finais da amostra de vermiculita em relação a potência transmitida e refletida.	52

Lista de Figuras

2.1	Diagrama da estrutura molecular da vermiculita. Adaptado de REEVES; CRIPPS (2006).	7
2.2	Ilustração da expansão (esfoliação) da vermiculita.	11
2.3	Ilustração de um forno vertical para processamento de vermiculita. Adaptado de MACKINNON et al. 1989.	12
3.1	Diagrama dos métodos de caracteriação em RF.	16
3.2	Representação vetorial da permissividade complexa.	17
3.3	Variação da permissividade em relação à frequência pelo modelo de relaxamento Debye.	20
3.4	Ondas eletromagnéticas refletidas e transmitidas em uma linha de transmissão com uma amostra.	22
3.5	Ilustração do método de reflexão com ponta de prova coaxial aberta.	25
3.6	Ilustração de uma amostra inserida em uma linha de transmissão curto-circuitada.	27
3.7	Ilustração de uma estrutura de uma cavidade retangular ressonante.	29
3.8	Ilustração de circuito de um anel ressoante em microfita.	31
4.1	Ilustração do arranjo do anel ressoante, vista superior(a) e lateral(b).	33
4.2	Ilustração de um ressonador de meio comprimento de onda em microfita.	34
4.3	Ilustração do arranjo de anel ressoante com acoplamento em meio comprimento de onda, vista superior (a) e vista lateral (b).	35
4.4	Ilustração dos picos de ressonância de um anel ressonante em microfita antes e após a inserção de uma AST.	36

4.5	Imagem do modelo de simulação no programa CST [®] para uma estrutura de anel ressonante com acoplamento de meio comprimento de onda.	41
4.6	Simulação do parâmetro S_{21} em relação a frequência para valores de raio médio (R_m) distintos.	42
4.7	Simulação do anel ressonante variando o <i>gap</i> , com raio médio em 16 mm. . . .	43
4.8	Foto do anel ressonante (a) e foto da configuração da bancada de medição (b).	44
4.9	Medição do parâmetro S_{21} em relação a frequência do anel ressonante construído.	45
5.1	Esquema do sistema de aquecimento e aquisição (a) e foto da bancada de experimentação para o processamento da vermiculita e aquisição dos dados (b).	49
5.2	Ilustração do circuito do condicionador de sinal (a) e configuração para medição das características dielétricas da vermiculita usando o método anel ressonante(b).	50
5.3	Temperatura da vermiculita versus tempo, para diferentes potências transmitidas.	51
5.4	Vista do acesso do termovisor (a) e foto termográfica da temperatura máxima obtida pelo termovisor (b).	52
5.5	Permissividade relativa e tangente de perdas das amostra de vermiculita processada em relação expansão relativa, volume expandido(V_{exp}) e volume inicial (V_0).	53
5.6	Potência transmitida pelo gerador de micro-ondas em relação ao tempo para um potência transmitida de 400 W aplicada por 10 minutos. Volume final: 65 ml.	54
5.7	Potência transmitida pelo gerador de micro-ondas em relação ao tempo para o segundo experimento com potência transmitida de 400 W aplicada por 3.5 minutos. Volume final: 58 ml.	55
5.8	Potência transmitida pelo gerador de micro-ondas em relação ao tempo para o terceiro experimento com potência transmitida variável aplicada por 3 minutos. Volume final: 60 ml.	55

Capítulo 1

Introdução

A humanidade desde de muito tempo faz uso de minérios para seu desenvolvimento, e atualmente, a demanda por minérios vêm crescendo a procura por extração a cada ano. Um exemplo da elevação da demanda é o aumento sistemático por minério de ferro. Em 2008, somente a exportação de minério de ferro cresceu 63,6% em relação ao ano anterior no Brasil [PAIS; CORONEL, 2012]. Corroborando com o aumento do crescimento da exploração de minérios, a população mundial, que em 2012 atingiu 7 bilhões de pessoas, poderá atingir 9.6 bilhões em 2050 [NATION, 2013]. Portanto, o crescimento da população continuará exigindo uma demanda crescente por minérios. A maior parte dos processos industriais para processar minérios utiliza energia de combustíveis não renováveis e de origem fóssil. Essas técnicas influenciam no clima global, pois as emissões de gases de efeito estufa contribuem para o aumento do aquecimento global [MCLELLAN et al., 2009]. Existe hoje um esforço global para diminuição de emissões de carbono na atmosfera. As indústrias de mineração, afim de aplicar uma abordagem sustentável para o processamento de minerais, estão sob vigilância para reduzir consumo de energia, melhorar a saúde e segurança operacional, e reduzir as emissões de gases de efeito estufa [NORGATE; HAQUE, 2010].

Dentre os minerais que são extraídos e processados utilizando combustíveis fosseis, o argilomineral chamando vermiculita apresenta uma boa variedade de aplicações, como por exemplo a remediação de solos e águas contaminadas por hidrocarbonetos, construção civil e agricultura [UGARTE; FRANÇA, 2005]. A vermiculita faz parte de um grupo de argilas chamadas filossilicatos, que apresentam um estrutura lamelar, e entre estas camadas

existem moléculas de água quimicamente ligadas [UGARTE; FRANÇA, 2005; FERRAZ, 1971]. A vermiculita, quando processada termicamente, passa por um processo de expansão em seu volume denominado exfoliação. A exfoliação é proveniente das moléculas de água quimicamente ligadas, que ao serem aquecidas a alta temperatura, passam do estado líquido para vapor rapidamente, assim, separando mecanicamente as camadas de silicato [CARVALHO, 2015]. A temperatura para obter máxima expansão das moléculas da vermiculita está compreendida entre 650 °C e 100 °C [RASHAD, 2016]. Além da exfoliação convencional, que transfere calor para expandir a vermiculita, existe a exfoliação química, que utiliza água oxigenada (H_2O_2) para realizar o processo de expansão das lamelas [OBUT; GIRGIN, 2002]. A esfoliação química é empregada apenas em pequenos trabalhos em laboratório, e não tem aplicação para escala industrial devido ao seu alto custo de aplicação em grande escala, pois é necessário utilizar peróxido de hidrogênio (H_2O_2), conhecida por água oxigenada, assim encarecendo o processo.

O processo térmico para exfoliação da vermiculita ocorre principalmente em fornos que utilizam combustíveis fósseis, gás ou óleo combustível, para processar a vermiculita. Para processar uma tonelada de vermiculita, em fornos a gás ou óleo, são necessários mais de 1 GJ [ANDRONOVA, 2007]. Um forma de mitigar as emissões de gases é utilizar um processo de aquecimento que não produza ou que produza uma quantidade reduzida de gases de efeito estufa. O processo de aquecimento por meio de energia de micro-ondas atende ao critério de redução de emissões de gases de efeito estufa, desde que a geração de energia elétrica, para a alimentação do processo, seja de fonte limpa.

A matriz elétrica brasileira é diversificada, 81.7 % da energia elétrica produzida no Brasil provém de fonte renovável (hidráulica, biomassa, eólica e solar), enquanto que a matriz energética mundial é composta apenas de 22% de energia renovável [EPE, 2018]. Portanto, métodos de processamento via energia elétrica são extremamente viáveis no Brasil do ponto de vista ambiental. Dentre todos os métodos de aquecimento que utilizam energia elétrica, o aquecimento por micro-ondas é uma boa alternativa, pois aquece os materiais devido a perdas dielétricas. A energia de micro-ondas aquece os materiais pela perda dielétrica nestes matérias, produzindo assim calor interno apenas no material de interesse, sem aquecer diretamente o forno, diferentemente de métodos por condução de calor [METAXAS; MEREDITH, 1988]. Visto que a vermiculita possui um camada de água entre suas lamelas, é

possível realizar sua expansão por meio de energia de micro-ondas.

Este trabalho de dissertação é focado em analisar o processamento de Vermiculita Bruta (VB) por meio energia de micro-ondas e também como se comporta as suas propriedades dielétricas antes e após o processamento via energia de micro-ondas.

1.1 Motivação

Alguns trabalhos sobre os efeitos e eficiência da energia de micro-ondas já foram produzidos. Segundo ANJOS (2014) houve expansão da vermiculita ao utilizar um forno de micro-ondas doméstico, contudo, não foi possível alcançar um nível de expansão próximo aos níveis de Vermiculita Expandida (VE). FOLORUNSO et al. (2012) realizou testes com VB em um forno a micro-ondas industrial contínuo na faixa de 2.45 GHz e constatou que é possível realizar processamento de vermiculita em processo contínuo, utilizando aproximadamente 150 kWh/ton. Contudo, ainda é possível melhorar o processamento da VB modificando o perfil de aquecimento por meio de energia de micro-ondas. Portanto, analisar diversas formas de processamento da VB, em relação ao tempo de processamento e a utilização e potência contínuas e variável (chaveada), é o objeto de estudo desta dissertação.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho de dissertação é processar uma pequena amostra de VB por meio de energia de micro-ondas em uma Linha de Transmissão (LT) retangular, com a finalidade de analisar perfis de aquecimento

O objetivo deste trabalho de dissertação é construir uma Linha de Transmissão (LT) retangular para processar, por meio de energia de micro-ondas, uma pequena quantidade de VB, com a finalidade de analisar os perfis de aquecimento, que serão produzidos variando a potência de micro-ondas. Para efeito de comparação, será analisado a potência transmitida e refletida na linha de transmissão, para analisar a energia gasta em cada processamento. Por fim, é feito o estudo das propriedades dielétricas das amostras da vermiculita processada é realizada, utilizando um método em linha de transmissão ressonante em microfita do tipo anel circular.

1.3 Organização do Texto

O texto deste trabalho de dissertação é dividido da forma a seguir.

O Capítulo 2 apresenta um resumo e uma introdução ao argilomineral vermiculita, como ocorre a exfoliação da vermiculita, aspectos econômicos e formas de processamento.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica dos métodos para caracterização dielétrica de materiais dielétricos, tanto para caracterizar a permissividade relativa (ϵ_r) quanto tangente de perdas ($\tan \delta$).

O Capítulo 4 é feito o leiaute, simulação e construção de um método para caracterização dielétrica da vermiculita em seus estado bruto e expandido.

O Capítulo 5 é apresentado os teste com a vermiculita bruta. É realizado a comparação dos perfis de aquecimento em relação ao tempo e gasto de energia, além da medição das propriedades dielétricas de cada amostra processada.

O Capítulo 6 é dedicado as considerações finais sobre os resultados obtidos e é apresentado as principais contribuições do trabalho.

Capítulo 2

Introdução à Vermiculita

A nível de entendimento, o termo vermiculita provém da língua latina *vermiculos*, que significa pequenos vermes. Tal referência provém da expansão de seus grãos ao serem aquecidos, portanto, semelhante à vermes que se contorcem [UNESP, 2018]. Segundo REIS (2002), a vermiculita é um material de vasta aplicação, com inúmeras aplicações na construção civil, indústria de manufaturados, agricultura, horticultura e meio ambiente. Especificamente nas áreas de construção civil e industrial, as aplicações são diversas, por exemplo: isolante térmico, concreto leve, isolante sonoro, painéis e divisórias, portas a prova de fogo, adsorventes de hidrocarbonetos, graxas e metais pesados [FRANÇA, 2005; MARCOS; RODRÍGUEZ, 2010; UGARTE; FRANÇA, 2005]. Sua uniformidade na composição química e granulometria, capacidade de retenção de água e baixa densidade, favorecem a utilização da vermiculita em produção de mudas e também na utilização laboratorial de análise de sementes, como substrato para teste padrão de germinação [AGUIAR, 1988].

Em relação a sua composição química, a vermiculita é composta de silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro, com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal. Sua fórmula química geral é a apresentada da seguinte forma: $(\text{Mg,Ca})_{0.4} (\text{Mg, Fe})_3 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Uma das atividades realizadas com o emprego da vermiculita é a produção de mudas de espécies florestais e na análise laboratorial de sementes que podem servir ao do processo de germinação. A vermiculita é utilizada no Brasil, nos Estados Unidos, no Continente Europeu e em alguns países da Ásia como um mineral industrial [UNESP, 2018].

A vermiculita pode ser compreendida em dois sentidos sendo, 1) geológico, em que enquadra os minerais laminares hidratados, a exemplo dos silicatos de alumínio, ferro, magnésio, os quais são similares a mica; e, 2) mineral, abarcando os elementos dos flossilicatos, oriundos de inúmeros processos, a exemplo dos metamórficos, magmáticos, hidrotermais, diagenéticos e intempéricos [AGUIAR, 1988].

Ainda, pode-se elencar e reforçar que a vermiculita é um mineral, para que possa ser utilizada nas inúmeras atividades humanas que necessitam do seu uso a exemplo da construção e da siderurgia, é necessário submetê-la a altas temperaturas. Tendo o seu uso aplicado ao solo pode-se elencar, de modo sintético, que a vermiculita é um elemento cujo fim corresponde à redução do pH do solo, porque tal mineral contribui na redução da acidez do solo aplicado, visto conter em si o pH neutro. Além de possuir a capacidade de adsorção de hidrocarbonetos, que contribui para descontaminação de solos contaminados por óleos.

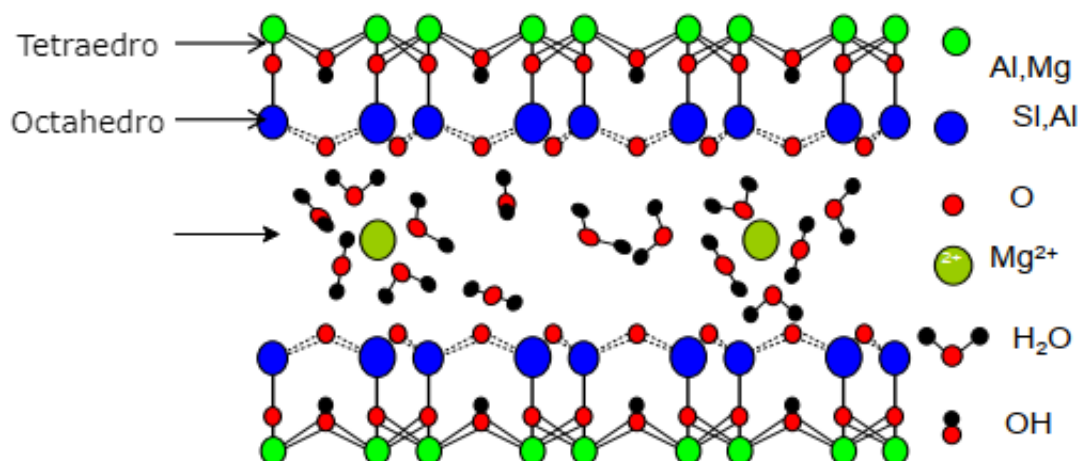
2.1 Propriedades Físico-químicas da Vermiculita

As vermiculitas são silicatos hidratados de alumínio (Al), ferro (Fe) e magnésio (Mg). Em sua estrutura, as vermiculitas possuem propriedades físico químicas diversas, além das já citadas, podendo ter também matéria orgânica e sais solúveis. O substrato mineral aqui em estudo apresenta em sua composição estruturas em camadas, as quais se estruturam em folhas contínuas de tetraedros silicato (Si_xO_y) ordenados de forma hexagonal.

Pode-se dizer que a vermiculita compõe-se estruturalmente de silício e alumínio em forma de tetraedros e octaedros, respectivamente, arrançados em lâminas. Ainda, a vermiculita possui uma estrutura cristalina micácea, lamelar com clivagem basal e contém cátions trocáveis em posições interlamelares. Logo, deve-se compreender que esta estrutura cristalina envolve uma camada de moléculas de água.

A estrutura molecular da vermiculita é disposta da seguinte forma, os átomos de Magnésio (Mg) e Cálcio (Ca) são cátions intercambiáveis rodeados por moléculas de água, os átomos de Silício (Si) formam uma camada tetraédrica, e os átomos de Magnésio (Mg) e Ferro (Fe) formam uma camada octaédrica [MANNING, 2007]. É importante salientar que a estrutura da vermiculita é composta de 5% a 15% de água entre suas lamelas, ou seja, parte considerável de sua massa é composta por água. A figura 2.2 representa o diagrama da

Figura 2.1: Diagrama da estrutura molecular da vermiculita. Adaptado de REEVES; CRIPPS (2006).



estrutura molecular da vermiculita com os cátions octaédricos, tetraédricos e hidratados. É importante frisar que o grau de hidratação da vermiculita é extremamente relevante em seu comportamento físico-químico, ou seja, quanto maior o nível de hidratação da vermiculita maior será a capacidade de esfoliação da mesma.

Ainda, se faz necessário saber que a vermiculita, em estado natural apresenta características físicas similares as diversas micas, exceto o que é relacionado a sua propriedade de extensão. Logo, a vermiculita é um produto que contém baixa condutividade térmica, acústica e elétrica, não prejudica a saúde, além de apresentar uma certa resistência no que diz respeito a sua durabilidade.

2.2 Aplicações da Vermiculita

A vermiculita é considerada um substrato, um produto que possui larga aplicação no dia a dia humano. Logo, é importante saber que o mercado de vermiculita é concentrado no primeiro mundo com cerca de 80% destinado a consumo interno dos países produtores [REIS, 2002]. A produção de vermiculita (VE) se direciona quase inteiramente à construção civil, à indústria de manufaturas, à agricultura, à horticultura e ao meio ambiente. Como elenca REIS (2002) a vermiculita é aplicada diariamente nas atividades humanas, por servir como isolante térmico, concreto leve e isolante de som, painéis e divisórias, portais a prova de fogo, agricultura hidropônica, condicionador de solos, fertilizantes, absorvedores de óleo, graxas

Tabela 2.1: Resumo das aplicações da vermiculita nas áreas da construção civil, indústria e agricultura.

Aplicações da Vermiculita.	
Construção Civil	Isolante térmico como argamassa para lajes (cobertura térmica) e paredes (reboco térmico);
	Agregado leve para argamassas e concretos;
	Argamassa de contrapiso com a função de isolamento acústico entre pavimentos;
	Proteção de impermeabilização em lajes de cobertura;
	Miolo de divisórias e portas "corta-fogo";
	Câmaras a prova de fogo;
	Forro decorativo e acústico, a prova de fogo.
	Proteção interna dos recuperadores de calor a lenha;
Industria	Isolamento, quando necessário em <i>hottes</i> de lareiras e recuperadores.
	Tijolos e argamassas isolantes;
	Isolante térmico e anticorrosivo;
	Isolante térmico para construção naval;
	Embalagens à prova de choques e fogo;
Agricultura	Elemento filtrante.
	Condicionador de solos;
	Veículo e contentor para nutrientes, inseticidas, herbicidas, fungicidas e fumigantes, evitando seu arrasto pela chuva ou irrigação;
	Retentor de água em solos permeáveis (arenosos);
	Isolamento da superfície do solo preparado com sementeiras.

e metais pesados. As várias aplicações da vermiculita no cotidiano, devido a vermiculita ser um substrato não abrasivo, inodoro, não se decompõe, não promove irritações na pele, possui propriedades isolantes, tanto térmicas como acústicas

Dentre tais aplicações pode-se elencar, mais detalhadamente, a serventia que a vermiculita apresenta na construção civil, na indústria e na agricultura estão apresentados na Tabela 2.1.

2.3 Produção Mundial de Vermiculita

Os maiores produtores de vermiculita são o Brasil, África do Sul e Estados Unidos, e concentram mais da metade das reservas comprovadas, com uma extensão de aproximadamente 65 Mton. Nas Américas, há 28% das reservas de vermiculitas e 25 Mton estão presentes

Tabela 2.2: Produção mundial de vermiculita [DPNM, 2012].

Discriminação Países	(Reservas 10 ³ tonelada) 2013	Produção (tonelada)		
		2012	2013	(%)
Brasil	6.300	51.986	68.014	15,6
África do Sul	14.000	140.000	130.000	29,9
China	-	15.000	50.000	11,5
EUA	25.000	100.000	100.000	23,0
Rússia	-	25.000	25.000	5,7
Bulgária	-	19.000	20.000	4,6
Índia	1.700	13.000	13,0	4,6
Uganda	-	8.000	12.000	2,8
Austrália	-	13.00	-	-
Outros Países	15.000	26.000	10.000	2,3
Total	62.000	514,0	514,0	100,0

nos Estados Unidos, visto que nos Estados Unidos tais reservas são oriundas de depósitos metamórficos. Já Rússia e China são territórios em que a possibilidade de existência de tais reservas com recursos é expressiva [REIS, 2002]. A nível mundial, o Brasil ocupa o terceiro lugar no *ranking* de reservas e produção, possuindo em seu território cerca de 6.3 Mton de reservas comprovadas. No Brasil, 40% das reservas de vermiculitas estão concentradas no carbonatito de Catalão I em Goiás [REIS, 2002].

A partir do exposto, pode-se compreender que embora a vermiculita seja usada cotidianamente e que por mais que se destaque como uma solução dentro do mercado, assim como qualquer produto, a vermiculita está sujeita aos estágios de alta e baixa na produção.

O mundo já chegou a conseguir 550 kton/ano de vermiculita prospectada. Em específico, no ano de 2001, o Estados Unidos foi o país que atingiu o patamar de maior consumidor de vermiculita, atingindo uma margem de 220 kton/ano. Em segundo lugar, no mesmo ano, a Escandinávia, localizada na região europeia, consumiu cerca de 150 kton/ano de vermiculita. Segundo alguns pesquisadores, o continente asiático vem elevando os seus índices de consumo da vermiculita a cada ano [REIS, 2002].

Segundo REIS (2002) é o tamanho da lamela de vermiculita que determina o preço a ser cobrado pelo produto. Assim como qualquer outro produto, quanto maior a lamela, maior o preço. Logo, o padrão americano para tamanho de lamelas vermiculita varia de grau 1, maior que 2.8 mm, até 5, menor 0.71 mm. REIS (2002) demonstra em seus estudos a diferença

Tabela 2.3: Classificação do tamanho da lamela de vermiculita [REIS, 2002].

Padrão Internacional	Tamanho (mm)	Padrão Americano	Padrão Brasileiro	Tamanho (mm)
<i>Large</i>	2,8 a 8,0	1		
<i>Medium</i>	1.4 a 2,0	2	Médio	25,0
<i>Fine</i>	0,71 a 2.0	3	Fino	92,0
<i>Superfine</i>	0.355 a 1.0	4	Superfino	116,0
<i>Micron</i>	0.25 a 0.71	5	Mícron	193,0

Tabela 2.4: Consumo Mundial da Vermiculita por Tamanho de Lamela em 1999 [REIS, 2002]

Tamanho	PRODUÇÃO DE VERMICULITA (kton)			
	Estados Unidos	Europa/Escandinava	Resto do Mundo	Total
1	10,0	5,5	10,0	25,0
2	35,0	25,0	32,0	92,0
3	45,0	31,0	40,0	116,0
4	90,0	63,0	40,0	193,0
5	6,0	15,5	8,0	83,5
Total	240,0	140,0	130,0	510,0

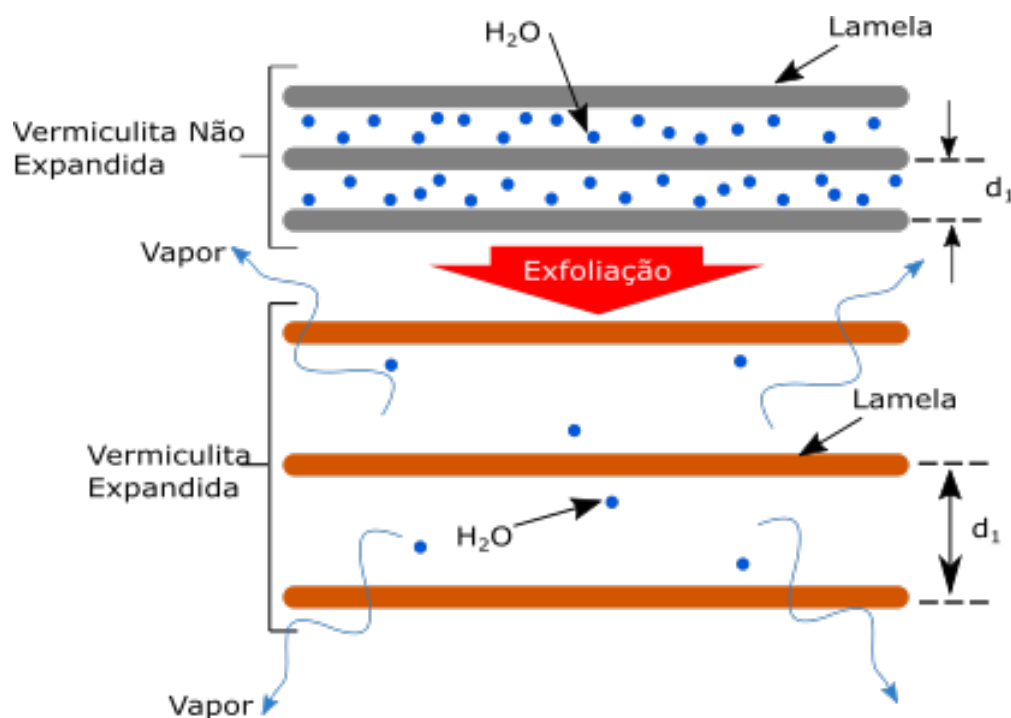
de tamanho entre a lamela de vermiculita brasileira, a produzida em solo americano e a vermiculita produzida internacionalmente, como segue na Tabela 2.3.

Como é observado, pode-se ressaltar que existe uma diferença gradativa entre a Europa e a América do Norte. Visto que a América se apresenta como uma consumidora ativa da vermiculita, a qual é utilizada no dia a dia dos povos americanos. REIS (2002) constata em suas pesquisas que no Brasil o preço da vermiculita não expandida começa com US\$50\ton enquanto a expandida sobe para até US\$400/ton. Entretanto, importa-se produtos mais nobre em concentrado a US\$330/ton e expandida até US\$2.500\ton.

2.4 Processamento da Vermiculita

Como já mencionado, a vermiculita é um mineral que se assemelha as micas. Quando aquecida rapidamente entre 870 °C a 1100 °C, a água entre as lamelas é transformada em vapor e a pressão gerada dentro da estrutura rompe a camada de silicato de vermiculita por um processo conhecido como esfoliação [OBUT; GIRGIN, 2002; MARCOS; RODRÍGUEZ,

Figura 2.2: Ilustração da expansão (esfoliação) da vermiculita.

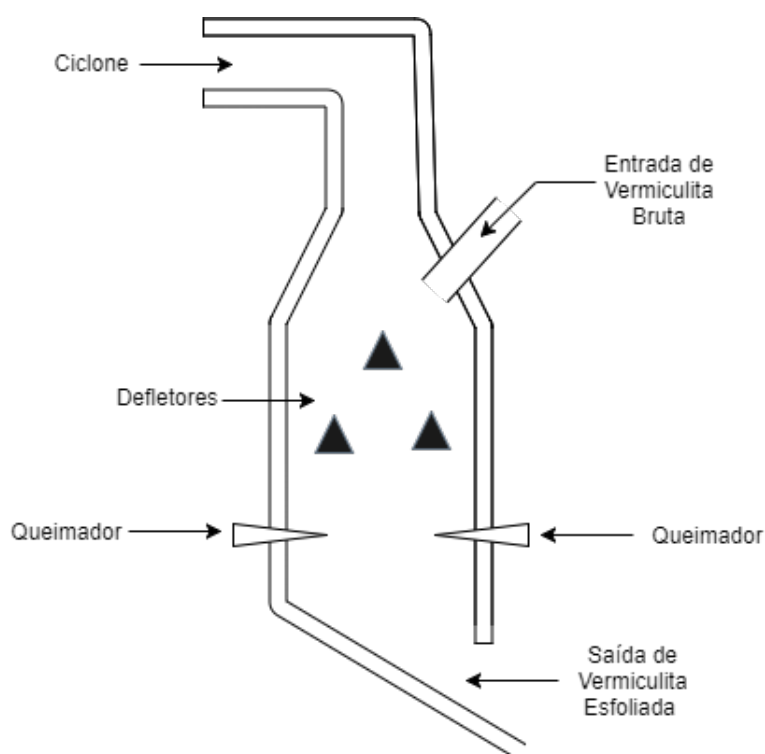


2010]. Devido a esse processo, seu volume se expande para mais de oito vezes o do bruto não processado [BASSETT, 1961]. Na Figura 2.2 é ilustrado o processo de expansão, pode se observar que a distância inicial entre as lamelas (d_1) aumenta depois que a vermiculita é expandida (d_2). A vermiculita esfoliada é leve e com boas propriedades termo-isolantes. É também altamente porosa, insolúvel em água e solvente orgânico, não tóxica e possui boas propriedades de absorção [MYSORE; VIRARAGHAVAN; JIN, 2005]. Essas propriedades físicas permitem seu uso em uma ampla gama de aplicações [LAGALY., 2013].

Na produção e comercialização da vermiculita e industrialização da VE é afirmado que o processo de esfoliação também pode ocorrer por meio do uso de ultrassom, micro-ondas ou por intercalação química com sais quaternários de amônia e peróxido de hidrogênio [FRANÇA, 2005; MARCOS; RODRÍGUEZ, 2014].

Devido à sua fraca transferência de energia térmica, a vermiculita tem uma capacidade de calor específica baixa e, portanto, requer uma quantidade significativa de energia (maior que 1GJ por tonelada) para sua esfoliação [ANDRONOVA, 2007]. O alto requerimento de energia para sua esfoliação, utilizando fornos rotativos ou verticais movidos a óleo ou gás natural, é um dos problemas que limitam o processamento industrial de vermiculita usando

Figura 2.3: Ilustração de um forno vertical para processamento de vermiculita. Adaptado de MACKINNON et al. 1989.



metodologia térmica convencional. Além do alto consumo, há outras limitações do método convencional de esfoliação, como a exigência de espaço para planta de processamento, emissão de gases perigosos como o monóxido de carbono (CO); dióxido de carbono (CO₂); óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x), emissões maciças de poeira e material particulado menores que 10 μm , apresentam um controle deficiente do processo e excesso de dependência de combustíveis fósseis. Os produtos também saem em temperatura muito alta (700 °C) e levam várias horas para esfriar [MARINSHAW, 1995; STRAND; STEWART, 1983].

A Figura 2.3 ilustra um esquemático de um forno vertical usado para esfoliação de vermiculita. A VB é transportada por esteira para entrada do forno e o minério é espalhado internamente por meio de defletores é aquecido à temperatura de expansão. Posteriormente, a VE é expulsa do forno devido a ação de um ciclone localizado no topo do forno [MARINSHAW, 1995].

A utilização de energia de micro-ondas para processar minerais não é nova. WADA (1973) realizou testes em vermiculita utilizando micro-ondas e H₂O₂ para esfoliação de

vermiculita. Eles relataram a utilização de menos energia para realizar a esfoliação por micro-ondas, quando comparada ao aquecimento térmico convencional, relatando ainda uma melhora na qualidade do produto final, como alta retenção de água e diminuição de rejeito (ganga).

Recentemente, vários estudos para exfoliação de vermiculita por energia de micro-ondas foram realizados utilizando fornos domésticos [MARCOS; RODRÍGUEZ, 2010; OBUT; GIRGIN; YÖRÜKOĞLU, 2003]. Os fornos domésticos são cavidades retangulares multimodos, que têm como fonte geradora um magnetron, que gera micro-ondas em 2.45 GHz, em aplicação doméstica. Tais trabalhos focaram na comparação dos níveis de esfoliação em relação a potência injetada nas cavidades dos fornos domésticos. Marcos e Rodrigues (2010) realizaram experimentos com a vermiculita em forno doméstico multimodo em 2.45 GHz e com potência máxima de 800 W, e concluiu-se que a vermiculita pode expandir a temperaturas um pouco maiores 100 °C utilizando energia de micro-ondas.

Contudo, os fornos multimodos apresentam uma distribuição do campo elétrico não uniforme e baixa densidade de potência [MEREDITH, 1998]. Portanto, o material aquece não uniformemente e não podendo ser feita uma repetibilidade dos experimentos, pois é impossível prever a distribuição do campo elétrica dentro de uma cavidade multimodo, quando a carga é totalmente não uniforme, ou seja, a vermiculita.

Todos os trabalhos citados até agora não tiveram êxito em propor o processamento da vermiculita em escala industrial por micro-ondas. FOLORUNSO et al. (2012) utilizou um forno a micro-ondas contínuo monomodo e potências muito acima daquelas utilizadas em fornos domésticos. Neste trabalho concluiu-se que é possível o processamento da vermiculita em escala industrial, e os resultados indicam uma redução de aproximadamente 45% na energia utilizada em relação aos sistemas de processamento utilizando combustíveis fósseis. FOLORUNSO ([FOLORUNSO et al., 2012]) também realizou medições das características dielétricas da vermiculita pré e pós processamento, e por fim, realizou medições da variação da permissividade da vermiculita em relação a temperatura e densidade.

2.5 Conclusão

A vermiculita possui alto valor de aplicação e econômico devido as suas características após processamento. Vários estudos foram desenvolvidos para melhorar eficiência do processamento da vermiculita e diminuição de gases de efeito estufa. Em relação ao processamento com energia de micro-ondas, pode-se concluir que a melhor forma de analisar o processamento é utilizando um sistema monomodo, pois será mais fácil realizar experimentos com repetibilidade. Outro ponto importante é a medição das características dielétricas da vermiculita pré e pós processamento, pois assim pode-se comparar os testes de expansão em relação às características dielétricas. O Capítulo 3 aborda uma revisão bibliográfica dos métodos de caracterização dielétrica e propõe um método para caracterização dielétrica da vermiculita.

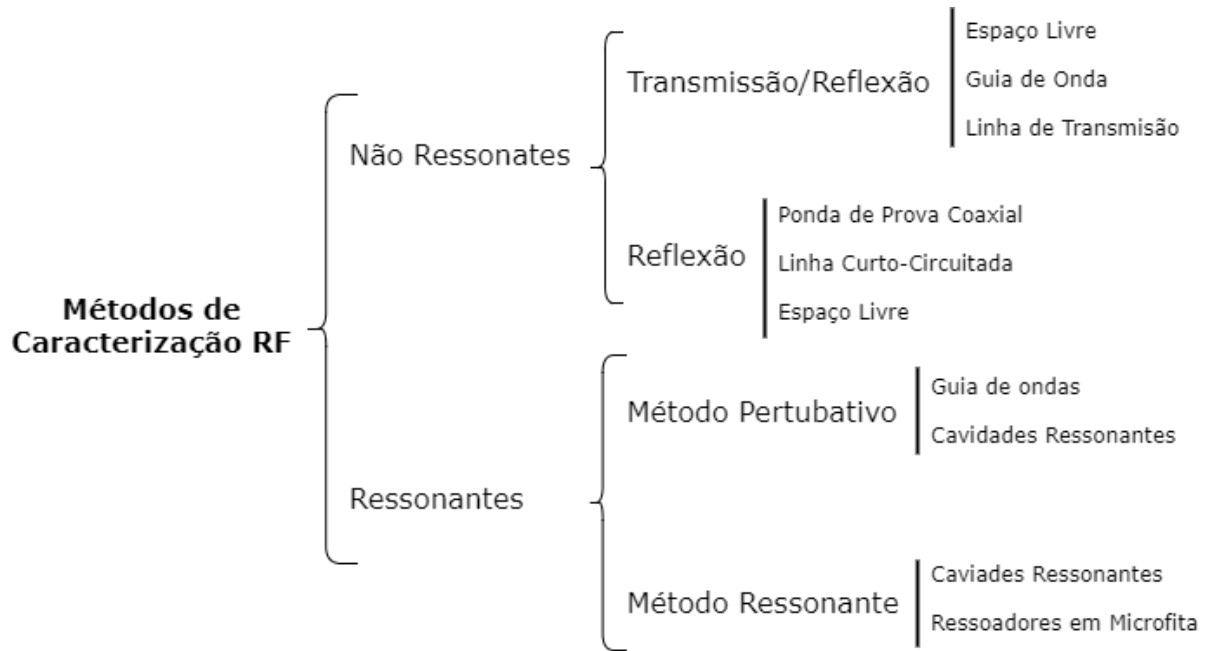
Capítulo 3

Métodos de Caracterização Dielétrica em RF

A caracterização dielétrica é muito importante para a área de engenharia de micro-ondas, pois o conhecimento das propriedades de dielétricas são necessárias para construção de dispositivos, e no estudo de eletromagnetismo aplicado. Um bom exemplo para ilustrar tal afirmativa é a construção de uma simples linha de transmissão em microfitas, que dependerá da permissividade dielétrica do substrato utilizado, portanto, os métodos de caracterização dielétrica são extremamente importantes. Na literatura científica é possível encontrar uma grande variedade de métodos de caracterização, pois o material a ser caracterizado pode ser um sólido, líquido ou um gás, e pode ter diversos formatos, tamanhos e também pode ser granuloso, no caso materiais sólidos. Atualmente, existe uma demanda crescente por métodos de caracterização de sólidos e líquidos com perdas dielétricas [CHEN et al., 2004].

Projetos em micro-ondas são extremamente dependentes do valor de permissividade, porque o comprimento elétrico de uma onda depende da velocidade de propagação eletromagnética, que por sua vez, depende da permissividade e da permeabilidade do meio de propagação. Portanto, para realizar qualquer aplicação em micro-ondas é necessário conhecer ou estimar as características dielétricas, que podem ser aplicadas na construção de antenas impressas e circuitos em micro-ondas, pois estes dispositivos têm dimensões diretamente relacionadas ao comprimento de onda do sinal guiado [BALANIS, 2012]. Um meio de alta permissividade é considerado como um material lento, uma vez que irá desacelerar

Figura 3.1: Diagrama dos métodos de caracteriação em RF.



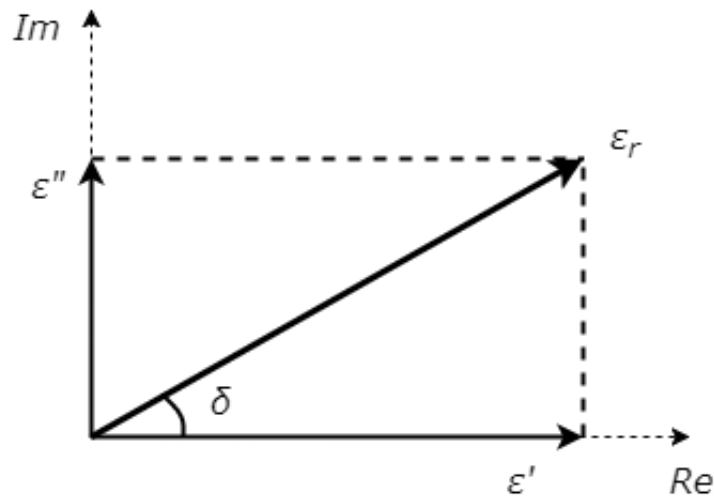
as ondas eletromagnéticas que viajam através do mesmo.

Portanto, a fim de projetar eficientemente antenas ou circuitos de radiofrequência (RF), as propriedades dielétricas dos materiais usados como substratos ou colocados em suas proximidades devem ser conhecidas. Uma vez que a permissividade relativa ϵ_r , a permeabilidade relativa μ_r e o coeficiente de dissipação $\tan \delta$ (também conhecido como tangente de perdas) do material, que influenciam as características de propagação, estas propriedades devem ser considerados durante o projeto de circuitos para aplicação em micro-ondas.

3.1 Propriedades Dielétricas do Materiais

Os materiais podem ser classificados com base em sua condutividade. Materiais com alta condutividade ($\sigma \gg 1$) são classificados como condutores, também referidos como metais, e materiais com baixa condutividade ($\sigma \ll 1$) como isolantes, também conhecidos como dielétricos. O que está no meio são os semicondutores.

Figura 3.2: Representação vetorial da permissividade complexa.



3.1.1 Permissividade Complexa e Perdas em Materiais Dielétricos

Como já mencionado, a permissividade de um material descreve a interação desse material com um campo elétrico (\mathbf{E}) e é, na verdade, um valor complexo

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.1)$$

A parte real da permissividade (ε') é uma medida de quanta energia de um campo elétrico externo é armazenada em um material. A parte imaginária da permissividade (ε'') é chamada de fator de perda, e é uma medida de quão dissipativa ou com perdas é um material. A parte imaginária da permissividade (ε'') é sempre maior que zero e geralmente é muito menor que a parte real (ε').

A parte imaginária é resultado da resposta dos constituintes dielétricos a um campo elétrico aplicado. Maior movimento dos mecanismos dielétricos leva a uma maior geração de calor e, portanto, a maiores perdas. A água possui muitos momentos dipolares, os quais possuem resposta em frequência no espectro de micro-ondas, gerando uma alta quantidade de calor em resposta a um campo elétrico alternado para frequências em micro-ondas. Este é o princípio por trás do processo de aquecimento de alimentos em um forno de micro-ondas.

A permissividade complexa pode ser esboçada em forma de vetor, como mostrado na Fig. 3.2, onde a componente real e imaginária são ortogonais. A soma vetorial desses dois componentes forma um ângulo δ com o eixo real. O $\tan \delta$ é, portanto, a razão entre os eixos

imaginário e real da permissividade relativa. Dada essa representação de perda, a perda de um material é uma relação entre a energia perdida e a energia armazenada. A $\tan \delta$ é comumente chamado de tangente de perdas ou fator de dissipação de um material

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.2)$$

Também é comum encontrar a permissividade relativa complexa representada como

$$\varepsilon_r = \varepsilon' (1 - j \tan \delta) \quad (3.3)$$

3.1.2 Linearidade, homogeneidade, isotropia, dispersão e tempo de relaxamento

O comportamento elétrico de um determinado material é caracterizado por seus parâmetros constitutivos elétricos, ou seja, a permissividade relativa (ε_r), permeabilidade relativa (μ_r) e condutividade (σ).

Um material é considerado linear se seus parâmetros constitutivos não forem funções a um campo elétrico aplicado. Quase todo material é não-linear, no entanto, a grande maioria apresenta um comportamento linear dentro de uma determinada faixa de intensidade de campo elétrico, e um comportamento não-linear elevado além deste ponto [BALANIS, 2012]. Portanto, a maioria dos materiais é considerada linear, uma vez que eles são operados dentro de intervalos lineares.

Um material é considerado homogêneo se os parâmetros constitutivos não dependem da posição do campo aplicado. A grande maioria dos materiais não são homogêneos. No entanto, o grau de não homogeneidade da maioria dos materiais é tão pequeno que eles são tratados como homogêneos.

Um material é considerado isotrópico se seus parâmetros constitutivos não dependem da direção dos campos aplicados. Caso contrário, o material é considerado anisotrópico. Independentemente da anisotropia de um material, muitas vezes estes são caracterizados em uma única direção, e considerados isotrópicos, e considerando que serão operados em uma única direção, simplificando o processo de caracterização.

Um material é considerado dispersivo se seus parâmetros dependem da frequência dos campos aplicados. Todos os materiais são na prática dispersivos, e embora existam certos materiais com graus de dispersão muito baixos, a maioria dos materiais dielétricos tem uma permissividade e condutividade muito dispersivas. A dispersividade está intimamente ligada à mobilidade das moléculas (momentos de dipolo) que existem no material.

Um material pode ter vários mecanismos dielétricos. A orientação do dipolo interage fortemente nas frequências de micro-ondas, onde os momentos de dipolo vão girar para seguir os campos elétricos. A água apresenta um grande número de dipolos permanentes, razão pela qual, como dito anteriormente, quando está sujeita a um campo elétrico nas frequências de micro-ondas, sua temperatura aumenta. A polarização eletrônica e a atômica, por outro lado, são chamadas de "mecanismos lentos", pois são quase insensíveis a campos alternados na região de micro-ondas. A polarização atômica responderá a campos alternados na região do infravermelho, enquanto os mecanismos de polarização eletrônica respondem apenas a campos alternados na região ultravioleta e além. Polímeros como o PTFE (Politetrafluoroetileno), mais conhecido como Teflon, que é hidrofóbico, quase não possui dipolos permanentes. É por isso que sua permissividade é tão estável, e a razão pela qual tem perdas tão baixas em toda a região de micro-ondas.

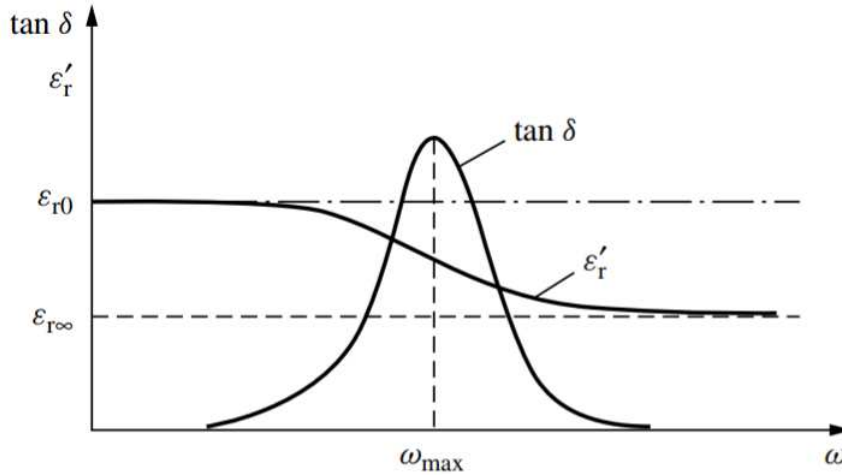
Cada mecanismo dielétrico tem sua própria frequência de corte, que é única para cada material. A frequência de corte do mecanismo dipolar é caracterizada por um efeito de relaxamento, enquanto os mecanismos eletrônicos e atômicos são caracterizados por um efeito de ressonância. Como a frequência aumenta, os mecanismos de rotação dipolar tendem a cair e os mecanismos atômico e iônico tornam-se os principais contribuintes para a permissividade do material.

O tempo de relaxamento (τ) é uma medida da mobilidade dos dipolos no material. É o tempo necessário para os dipolos se alinharem a um campo elétrico aplicado (ou o tempo que leva para um sistema deslocado retornar ao seu estado de equilíbrio aleatório). A frequência de relaxamento (f_l) é inversamente relacionada ao tempo de relaxamento

$$\tau = \frac{1}{\omega_l} = \frac{1}{2\pi f_l} \quad (3.4)$$

nas frequências abaixo da frequência de relaxamento, os dipolos são capazes de acompanhar

Figura 3.3: Variação da permissividade em relação à frequência pelo modelo de relaxamento Debye.



o ritmo do campo elétrico alternado. À medida que a frequência aumenta, as perdas (ε'') aumentam e a capacidade de armazenamento (ε') começa a diminuir devido à defasagem de fase entre o alinhamento do dipolo e o campo elétrico. Acima da frequência de relaxamento, o campo elétrico é muito rápido para influenciar a rotação do dipolo. Portanto, esse mecanismo desaparece e os valores ε' e ε'' caem para valores mais baixos.

A variação de permitividade de um material com frequência pode ser representada pela relação de Debye [KREMER; SCHÖNHALS, 2003]

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)} + \frac{\sigma_s}{j\omega\varepsilon_0}, \quad (3.5)$$

em que ε_s é a permitividade estática, ε_∞ é permissividade óptica, σ_s é condutividade estática, e τ é tempo de relaxamento do material.

A relação de Debye é ilustrada na Fig 3.3, onde podemos ver um pico para as perdas na frequência de relaxamento em ω_{max} .

A relação de Debye é usualmente válida para líquidos, mas tem um pequeno erro na aproximação da resposta dos polímeros. Portanto, é comum usar a relação Cole-Cole, que é mais ampla.

3.2 Métodos de Caracterização de Propriedades de Dielétricas

Como mencionado anteriormente, existem vários métodos de caracterização dielétrica, pois dependendo do formato, quantidade, estado material e faixa de frequência desejada, haverá métodos mais adequados para realização da caracterização. Na literatura é possível encontrar vários métodos para caracterização, instituições acadêmicas e instituições de normas como o IPC (Instituto Nacional de Padrões de Circuitos Impressos), o NIST (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia) e a ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais), que também definem métodos, normas e práticas para caracterização dielétrica de materiais.

Nesta seção é feita uma pequena abordagem sobre os dois grupos de métodos já mencionados, os métodos não ressonantes e os não ressonantes. Posteriormente, é proposto um método de rápida construção para caracterizar a vermiculita. E no Capítulo 4, é realizado a construção e análise do método proposto.

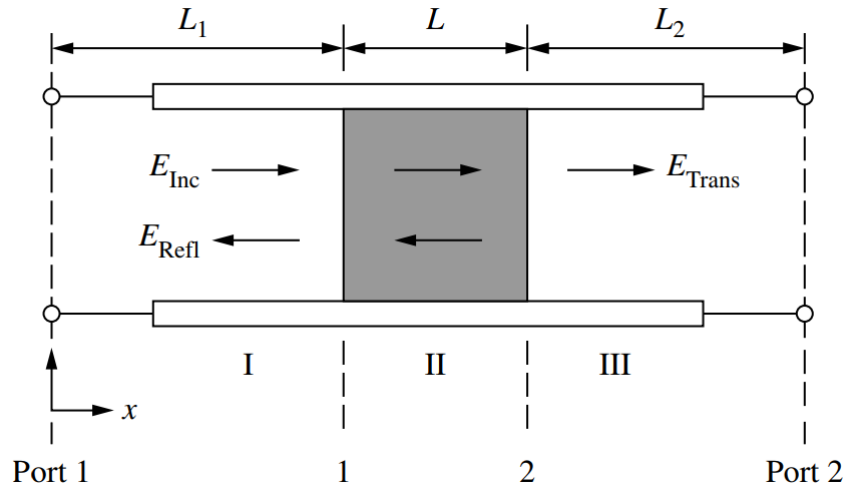
3.2.1 Métodos de Transmissão/Reflexão

Nos métodos de transmissão/reflexão, o material sob teste é alocado em um segmento de linha transmissão, e a partir dos valores de reflexão e transmissão dos parâmetros de espalhamento pode-se mensurar a permissividade e permeabilidade da Amostra Sob Teste (AST). Nos métodos de transmissão/reflexão, todos os quatro parâmetros de espalhamentos podem ser medidos, portanto, têm-se mais dados a disposição para medição das características dielétricas do material.

3.2.1.1 Princípios dos Métodos de Transmissão/Reflexão

Os métodos de reflexão/transmissão já são bem conhecidos e foram sistematicamente analisados em diversas literaturas [BAKER-JARVIS MICHAEL D. JANEZIC; GEYER, 1993]. A Fig. 3.4 ilustra uma configuração típica do método de transmissão/reflexão. A AST é inserida em um segmento de uma linha de transmissão, que tem o eixo de transmissão em x . Após a inserção da AST na LT haverá três regiões distintas, e também existirá três campos elétricos distintos, um campo elétrico incidente (E_{Inc}), um campo elétrico refletido

Figura 3.4: Ondas eletromagnéticas refletidas e transmitidas em uma linha de transmissão com uma amostra.



(E_{Refl}) e um campo elétrico transmitido (E_{Trans}). Dentro das três regiões há três campos elétricos resultantes

$$E_I = e^{-\gamma x} + C_1 e^{\gamma_0 x}, \quad (3.6)$$

$$E_{II} = C_2 e^{-\gamma x} + C_3 e^{\gamma x} \quad (3.7)$$

e

$$E_{III} = C_4 e^{-\gamma_0 x} \quad (3.8)$$

com

$$\gamma = j \sqrt{\frac{\omega^2 \mu_r \epsilon_r}{c^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2}, \quad (3.9)$$

$$\gamma_0 = j \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \quad (3.10)$$

em que ω é a frequência angular, c é a velocidade da luz no vácuo, γ_0 e γ são as constantes de propagação na AST e na LT respectivamente, e λ_c é o comprimento de onda de corte na linha de transmissão. Se a linha de transmissão suportar modos TEM, por exemplo uma linha coaxial, o comprimento de onda de corte tenderá ao infinito.

As constantes C_1 , C_2 , C_3 e C_4 podem ser determinadas a partir das condições de contorno do campo elétrico e no campo magnético na LT. As condições de contorno do campo elétrico

do campo elétrico tangencial na interface dielétrica são

$$E_I|_{x=L_1} = E_{II}|_{x=L_1} \quad (3.11)$$

e

$$E_{II}|_{x=L_1+L} = E_{III}|_{x=L_1+L}, \quad (3.12)$$

em que L_1 e L_2 são as distâncias a partir das respectivas portas para as faces da AST, e L é a largura da da AST. As condições de contorno do campo magnético requerem assumir que nenhuma corrente de superfície é gerada, então a componente tangente do campo magnético é contínua através da interface:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial E_I}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\partial E_{II}}{\partial x} \Big|_{x=L_1} \quad (3.13)$$

e

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\partial E_{II}}{\partial x} \Big|_{x=L_1+L} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial E_{III}}{\partial x} \Big|_{x=L_1+L}. \quad (3.14)$$

Os parâmetros de espalhamento para duas portas, como ilustrado na Figura 3.4, são obtidos por meio das Equações (3.6)-(3.8) sujeitas às condições de contorno das Equações (3.11)-(3.14). Assim

$$S_{11} = R_1^2 \cdot \frac{\gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2}, \quad (3.15)$$

$$S_{22} = R_2^2 \cdot \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (3.16)$$

e

$$S_{12} = S_{21} = R_1 R_2 \cdot \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2}. \quad (3.17)$$

A matriz de espalhamento é simétrica, portanto, os termo S_{12} e S_{21} são iguais. Os termos R_1 e R_2 são transformações do plano de referência das portas para a borda da AST:

$$R_i = e^{(-\gamma_0 L_i)}, \quad (i = 1, 2). \quad (3.18)$$

Os coeficientes de Transmissão (T) e Reflexão (Γ) são dados por:

$$T = e^{-\gamma L} \quad (3.19)$$

$$\Gamma = \frac{(\gamma_0/\mu_0) - (\gamma/\mu_0)}{(\gamma_0/\mu_0) + (\gamma/\mu_0)}. \quad (3.20)$$

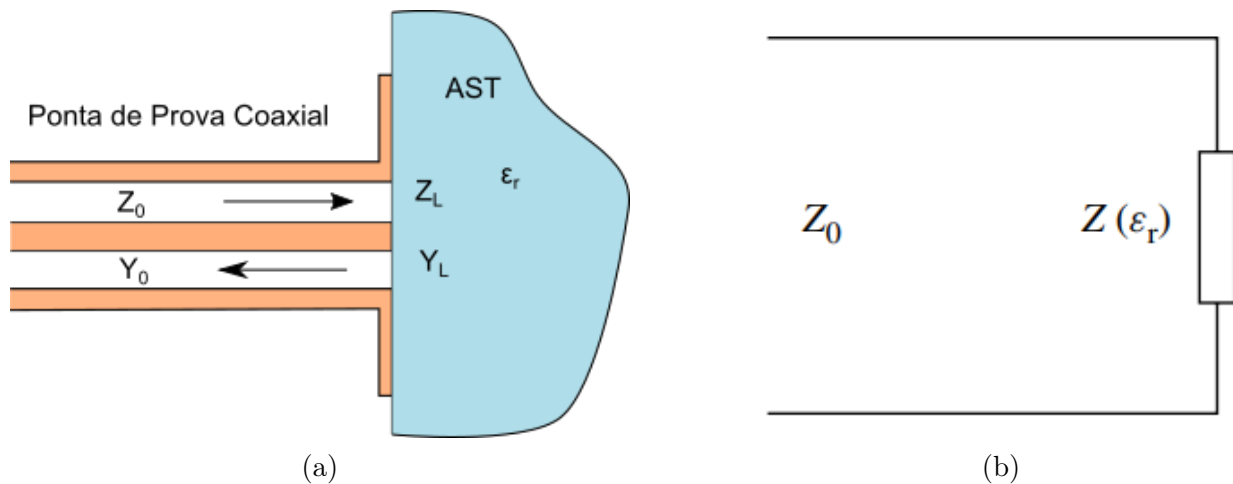
Para materiais não magnéticos os parâmetros de espalhamento, Eq. 3.15-3.16, contêm as informações sobre permissividade real (ϵ'), imaginária (ϵ''), L . os fatores R_1 e R_2 são desconhecidos. Existem vários algoritmos para obter as propriedades dielétricas por meio desse método, um algoritmo que se destaca é NRW (Nicolson-Ross-Weir) [NICOLSON; ROSS, 1970; WEIR, 1974]. O método NRW deriva de formulas explicitas para o cálculo da permissividade a partir dos parâmetros de espalhamento.

Em linhas gerais, o método de Transmissão/Reflexão é bastante utilizado para determinação da permissividade e permeabilidade de sólidos e líquidos. Em relação a medição em materiais sólidos, os materiais devem ser usinados para que se acomodem a linha de transmissão. Esse método também é bastante utilizado em materiais granulosos e não homogêneos, como solos e concreto. Outra grande vantagem desse método é obter uma medição das características dielétricas em uma faixa larga de frequência. Contudo, uma desvantagem deste método é sua construção, é necessário a construção de uma linha de transmissão, que pode ser um guia metálico retangular, circular ou coaxial. O método de Transmissão/Reflexão também pode ser realizado no espaço livre, contudo, é necessário uma grande quantidade da amostra para realização das medições.

3.2.2 Método da Reflexão

O Método da Reflexão baseia-se na reflexão de uma onda eletromagnética devido a descontinuidade da impedância causada pela presença de amostra em uma LT. O método pode ser realizado em uma linha coaxial, retangular ou até mesmo no espaço livre. Em modo geral, em um método de reflexão, a AST é introduzida em uma determinada posição da linha de transmissão e assim, a impedância da linha de transmissão é alterada. As propriedades da AST são derivadas da reflexão devido a mudança de impedância causada pela amostra. Há duas teorias no método da reflexão em uma LT podem ser utilizadas no

Figura 3.5: Ilustração do método de reflexão com ponta de prova coaxial aberta.



método reflexão, e são a reflexão em uma LT curto-circuitada e a reflexão em uma LT com circuito aberto. Na literatura existem várias formas de posicionamento da AST na LT, e diferentes algoritmos de cálculo para derivação das propriedades.

A seguir, é feita uma discussão geral da duas técnicas, reflexão em circuito aberto e em curto-circuito. Nas duas técnicas assume-se que a LT é coaxial, pois são mais utilizadas. As análises podem ser estendidas para outros tipos de LT, como para outros tipos de guia de onda e ao espaço livre.

3.2.2.1 Reflexão em circuito aberto

O método de circuito aberto é frequentemente utilizado em uma linha coaxial, comumente chamada de sonda ou ponta de prova coaxial. A ponta de prova coaxial aberta fica em contato direto com a AST. A impedância da LT e da AST são diferentes, então há uma reflexão quando a onda eletromagnética se propaga através da interface, e a refletividade é determinada pelas impedâncias dos dois meios. Como a impedância da AST está relacionada as propriedades eletromagnéticas da amostra, a partir da refletividade na interface, as propriedades da AST podem ser determinadas.

Como a impedância da AST está relacionada com as suas permissividade e permeabilidade, em princípio, tanto a permeabilidade quanto a permissividade podem ser obtidas, desde que sejam feitas medições suficientemente independentes. Contudo, na maioria dos

casos, apenas uma medição independente é feita, portanto apenas um parâmetro, permissividade ou permeabilidade, pode ser obtido. A Fig. 3.5a ilustra uma medição com uma ponta de prova coaxial aberta. A ponta de prova tem sua impedância (Z_0) e admitância bem definidas (Y_0), a AST apresenta a impedância ($Z_L(\varepsilon_r)$) e admitância ($Y_L(\varepsilon_r)$) dependentes da permissividade relativa da amostra.

A Fig. 3.5b ilustra o circuito equivalente para o método de reflexão. No circuito equivalente a impedância $Z(\varepsilon_r)$ é função da permissividade relativa (ε_r) da AST. A impedância $Z_L(\varepsilon_r)$ pode ser obtida a partir da medição de reflexão, e a permissividade relativa (ε_r) da amostra pode ser deduzida a partir da impedância Z_L .

Para o cálculo permissividade é realizado um método iterativo utilizando buscando o zero da função definida na Equação 3.24

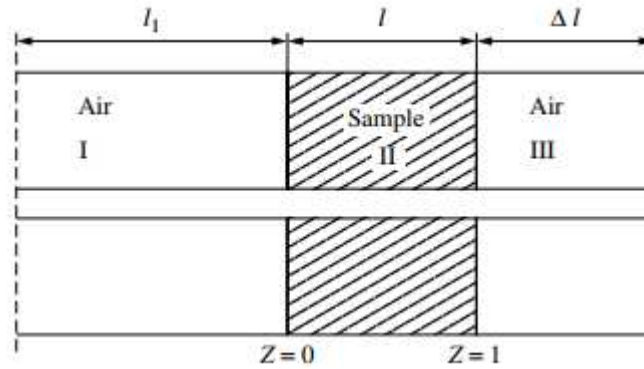
$$F(\varepsilon_r) = Y_L(\varepsilon_r) - Y_m. \quad (3.21)$$

O parâmetro Y_m é a admitância medida da amostra e Y_L é a modelo teórico de correção [BAKER-JARVIS et al., 2015; BURDETTE; CAIN; SEALS, 1980]. Esse método de correção é extremamente importante para estimar propriedades dielétricas da amostra. Um fato importante a se observar é granularidade do material a ser testado. No caso da vermiculita comercial apresenta grãos entre 0.03 3mm, portanto, o tamanho dos grãos podem influenciar as medições, pois existe a possibilidade de espaços vazios entre a amostra e a ponta de prova coaxial, assim, ocasionando erro na medição da permissividade. Uma solução é diminuir a granulometria, contudo, a estrutura física da amostra pode ser alterada por perda de umidade, já que a vermiculita apresenta umidade entre as lamelas. Uma facilidade encontrada para aplicação deste método é utilização apenas de um Analisador Vetorial de Rede (VNA) e uma ponta de prova coaxial. Por fim, a sonda coaxial aberta é utilizada principalmente em materiais líquidos, pós e sólidos com superfícies planas, não sendo muito recomendando para materiais granulosos e irregulares [LANGHE et al., 1993].

3.2.2.2 Reflexão em curto-circuito

A técnica de curto-circuito é realizada da seguinte forma, um pedaço de amostra é inserido em um segmento de uma LT em curto, com a amostra a uma distância l da face

Figura 3.6: Ilustração de uma amostra inserida em uma linha de transmissão curto-circuitada.



em curto da LT. Assume-se que exista apenas o modo fundamental na linha, que a amostra é homogênea e isotrópica, e que exista apenas o campo elétrico transversal (TE) na LT. A Fig. 3.6 ilustra um caso geral da técnica de reflexão em curto-circuito. Haverá na LT três regiões distintas para o campo elétrico. As três regiões são

$$E_I = e^{(-\gamma_0 x)} + C_1 e^{(\gamma_0 x)}, \quad (3.22)$$

$$E_{II} = C_2 e^{(-\gamma x)} + C_3 e^{(\gamma x)} \quad (3.23)$$

e

$$E_{III} = C_4 e + C_5 e^{(\gamma_0(z-l))}, \quad (3.24)$$

em que γ_0 e γ são as constantes de propagação no ar e na amostra amostra respectivamente. As cinco constantes (C_1 a C_5) podem ser obtidas a partir das condições de contorno.

Deve-se assumir que o plano da amostra coincida com o plano de calibração, as condições de contorno correspondentes das equações de campo nas interfaces geram uma equação para o coeficiente de reflexão [BARKER-JARVIS et al, 1993]

$$S_{11} = \frac{-2\beta\delta + [(\delta + 1) + (\delta - 1)\beta^2] \tanh \gamma l}{2\beta + [(\delta + 1) - (\delta - 1)\beta^2] \tanh \gamma l}, \quad (3.25)$$

com

$$\beta = \frac{\gamma\mu_0}{\gamma_0\mu} \quad (3.26)$$

e

$$\delta = e^{(-2\gamma\Delta l)} \quad (3.27)$$

Pode-se obter as expressões gerais para o coeficiente de reflexão se o plano de calibração não estiver no plano da amostragem,

$$S_{11(trans)} = e^{(-2\gamma_0 l_1)} S_{11} \quad (3.28)$$

em que $S_{11(trans)}$ é coeficiente de transmissão deslocado para o plano de calibração, l_1 é a distancia do plano do plano de calibração de referência para interface da amostra. O efeito da distância L_1 pode ser eliminado apenas medindo a coeficiente de reflexão com a LT vazia (sem amostra).

$$S_{11(vazio)} = e^{(-2\gamma_0(l_1+\Delta l+l))} S_{11} \quad (3.29)$$

Dividindo $S_{11(trans)}$ por $S_{11(vazio)}$, tem-se

$$\frac{S_{11(trans)}}{S_{11(vazio)}} = e^{(-2\gamma_0(\Delta l+l))} S_{11} \quad (3.30)$$

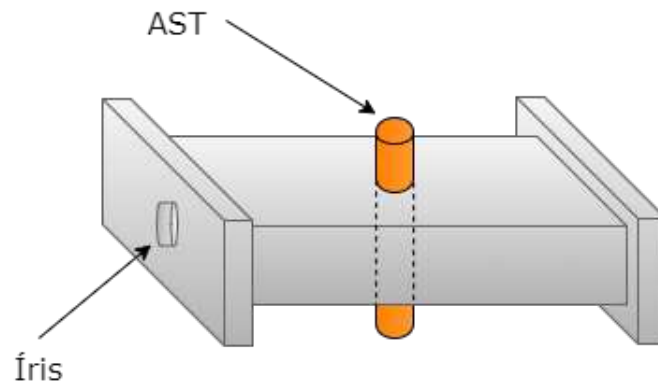
Então, o coeficiente de reflexão na face frontal (S_{11}) da amostra pode ser medido experimentalmente. Pode-se obter a constante de propagação a a partir da Eq. 3.25. Normalmente, os métodos de reflexão só podem medir um parâmetro complexo, seja permissividade ou permeabilidade. A técnica de curto-circuito é utilizada para medição de sólidos e líquidos. Uma dificuldade para implementação dessa técnica é construção da LT em curto-circuito.

3.2.3 Método Ressonante

Os métodos ressonantes são considerados os métodos com maior precisão e sensibilidade que os métodos não ressonantes. Geralmente são utilizados para comparar medições com outros métodos não ressonantes. Esses métodos conseguem obter medições da permissividade e tangente perdas com boa precisão, contudo, esses métodos não são bons quando a AST apresenta tangente de perdas elevada [BAKER-JARVIS et al., 1998].

Há duas variações no método ressonante para o cálculo da permissividade, o método

Figura 3.7: Ilustração de uma estrutura de uma cavidade retangular ressonante.



ressonante perturbativo e o puramente método ressonante. O método ressonante perturbativo o dielétrico sob teste é usado para perturbar a distribuição do campo elétrico ou magnético dentro de uma cavidade ressonante. O método ressonante o dielétrico é usado como ressonador.

3.2.3.1 Método Ressonante Perturbativo

O método ressonante perturbativo usa como grandeza, para cálculo das características dielétricas de uma AST, o fator de qualidade de uma cavidade ressonante antes e depois da inserção de uma AST dentro da cavidade. O método pode utilizar uma cavidade metálica cilíndrica ou retangular. Em uma cavidade retangular, é necessário utilizar uma parede metálica com pelo menos um orifício, chamada de íris, para excitação da cavidade, e a AST será posta onde o campo elétrico é máximo. A Fig. 3.7 ilustra uma cavidade ressonante retangular.

A implementação de uma íris neste método é extremamente importante. A íris é uma parede metálica com um ou mais orifícios, e é inserida em um guia de onda com a finalidade de filtragem dos modos em um guia de onda. Uma íris com pequenos orifícios cria um filtro de banda estreita, quanto maior o orifício na íris maior será sua banda de passagem. O filtro de guia de onda criado pela íris apresenta um fator de qualidade alto (Q), portanto, o modo fundamental terá um pico acentuado em sua frequência de ressonância, assim será mais fácil identificar o modo fundamental e determinar com mais precisão o deslocamento da frequência de ressonância após a inserção da amostra dentro da cavidade.

Utilizando a cavidade ilustrada na Fig. 3.7, para realizar as medições da permissividade, parte real e imaginária, deve-se calcular da seguinte forma

$$\varepsilon' = \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} + 1 \quad (3.31)$$

$$\varepsilon'' = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right) \quad (3.32)$$

Os valores V_c e V_s são os volumes da cavidade e da amostra, respectivamente. Q_c é fator de qualidade da cavidade sem amostra, Q_s é fator de qualidade da cavidade com a amostra. Por fim, f_c é frequência de ressonância da cavidade sem amostra e f_s é a frequência de ressonância com amostra. O volume da amostra precisa ser bem menor que volume da cavidade ($V_s \ll V_c$), ou seja, para que a medição seja precisa a mostra precisa ter limites para seu formato. Portanto, a AST precisa ser usinada com precisão para encaixar dentro da cavidade. A cavidade ressonante tem que ser projetada para ser monomodo, que apenas o modo fundamental interaja com a amostra.

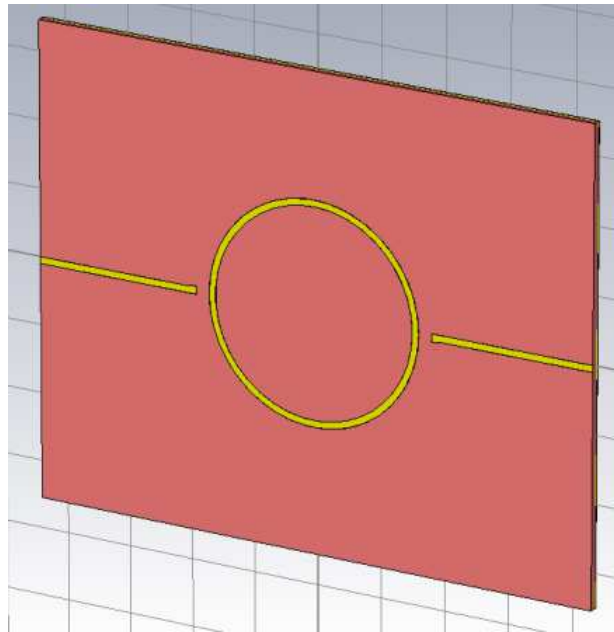
3.2.4 Método ressonante em estrutura planar

Em um método ressonante o dielétrico sob teste é ou faz parte do ressoador do sistema de medição. As propriedades da amostra são derivadas da resposta do ressoador. É fundamental que AST forme um ressonador ou seja parte do ressoador, e o algoritmo de cálculo da propriedades dielétricas esteja relacionado com a distribuição de campo no ressonador. Em princípio, qualquer tipo de ressonador pode ser usado em caracterização de materiais. Nos método puramente ressonantes quanto maior a concentração de energia eletromagnético na AST maior será a precisão do método.

Existem vários métodos ressonadores, os mais utilizados são o SCR, do inglês *Split-Cylinder Resonator*, e o ressonador de Courtney. Os dois ressoadores têm boa precisão, contudo, a construção e análise do algoritmo para obtenção das características dielétricos não são triviais.

Ressonadores em microfita são mais fáceis para construir e análise. A Fig. 3.8 ilustra a estrutura de anel ressonante em microfita. Nesses método, o material é geralmente usado como substrato para caracterização da AST. A maior desvantagem deste método é que a

Figura 3.8: Ilustração de circuito de um anel ressonante em microfita.



amostra utilizada para teste é perdida, ou seja o método é destrutivo.

Há vários circuitos ressonadores em microfita que são utilizados para caracterização dielétrica, mas o mais utilizado é o método ressonante em anel. A maior vantagem do método anel ressonante em microfita é que as perdas por irradiação são bem menores, quando comparado com outras estruturas ressoantes em microfita.

O material em estudo é a vermiculita, portanto, não é possível construir um substrato a partir da vermiculita, pois assim as propriedades dielétricas seriam mudadas. Entretanto, RASHIDIAN; ALIGODARZ; KLYMYSHYN (2012) elaborou um método para caracterização de superestrato acima do anel ressonante. Este método tem relativa precisão e pode ser construído facilmente para caracterizar da vermiculita.

3.3 Conclusão

Vários métodos para caracterização das propriedades dielétricas são descritos na literatura, contudo, dependerá do material a ser caracterizado a escolha do método. Em relação a vermiculita, os melhores métodos são o Transmissão/Reflexão e Ressonantes. O método do anel ressonante foi escolhido para caracterizar a vermiculita, porque é de fácil construção e análise, diferentemente dos outros métodos citados neste capítulo.

Capítulo 4

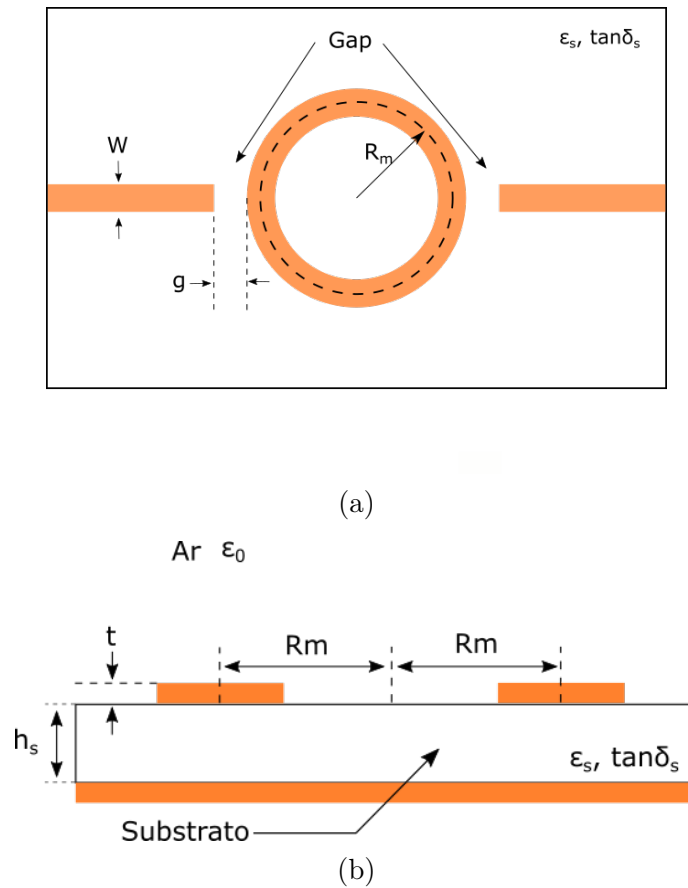
Método do Anel Ressonante

Este capítulo há uma breve revisão do método de caracterização utilizando um anel ressonante em microfita e análise da obtenção das características dielétricas do substrato e superestrato da estrutura ressoante. Um dos principais objetivos dessas análises é projetar um anel ressonante próximo da frequência de 2.45 GHz, pois o gerador de micro-ondas de alta potência opera em 2.45 GHz. Para realizar tal requisito é necessário determinar as frequência de ressonância do ressonador.

O anel ressonador em microfita foi proposto pela primeira vez por P. Troughton em 1969 para as medições de velocidade de fase e característica dispersivas de uma linha de microfita [CHANG; HSIEH, 2004]. Nos anos 80, surgiram aplicações utilizando circuitos em anel como antenas e superfícies seletivas em frequência, como circuitos em micro-ondas em anel para filtros, osciladores, misturadores, *baluns* e acopladores. Algumas outras propriedades foram relatadas na utilização de circuitos em anel construídos em guias de onda e linhas fendidas. Existe também várias aplicações em dispositivos de estado sólido para funções de sintonia, comutação, amplificação, oscilação e optoeletrônica.

O ressonador em anel é um circuito simples. A estrutura do anel ressonante apenas propaga modos múltiplos do modo fundamental. O comprimento de onda do modo fundamental está relacionado com a correferência do anel ressonante e permissividade efetiva do meio. Muitos outros circuitos podem ser criados a partir de anel ressonador, fendas podem ser inseridas, dois ou mais anéis em cascata, e implementação de alguns dispositivos em estado sólido. Em seguida é apresentado um modelo simplificado para anel ressonante.

Figura 4.1: Ilustração do arranjo do anel ressonante, vista superior(a) e lateral(b).

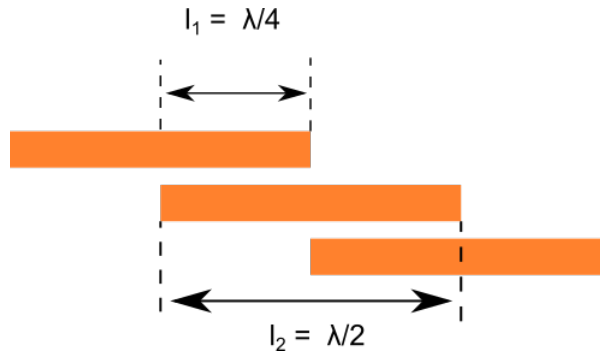


4.1 Modelo Simplificado

O ressonador em anel é meramente uma linha de transmissão fechada em *loop*. O circuito básico consiste nas linha de alimentação, lacunas de acoplamento (*gaps*) e o ressonador em anel. A Fig. 4.1 ilustra um arranjo de anel ressonante em microfita, vista superior e lateral. Os parâmetros do arranjo são a largura W das linhas de alimentação e do anel, os *gaps* g que acoplam as linhas transmissão com anel ressonante, o raio médio R_m do anel, a altura h_s do substrato, a altura t da linha de microfita, a permissividade ϵ_s e tangente de perdas $\tan\delta_s$ do substrato.

A energia é acoplada dentro e fora do ressonador por meio das linhas de alimentação e os *gaps*. Se a distância entre as linha de alimentação e o ressonador for muito grande, o acoplamento será fraco e assim, pode não haver frequências de ressonância no ressonador, devido ao fraco acoplamento e a fraca capacitância criada pelos *gaps*. Se as linha de

Figura 4.2: Ilustração de um ressonador de meio comprimento de onda em microfita.



alimentação forem aproximadas do ressonador a capacitância aumentará, assim, o acoplamento será melhor. Isso faz com que as frequências de ressonância do circuito se desviem das frequências de ressonância intrínsecas do anel. Portanto, para modelar com precisão o ressonador em anel, as capacitâncias dos intervalos de acoplamento devem ser consideradas.

Quando a circunferência média do ressonador é igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda guiado, a ressonância é estabelecida. Esta relação pode ser expressa como

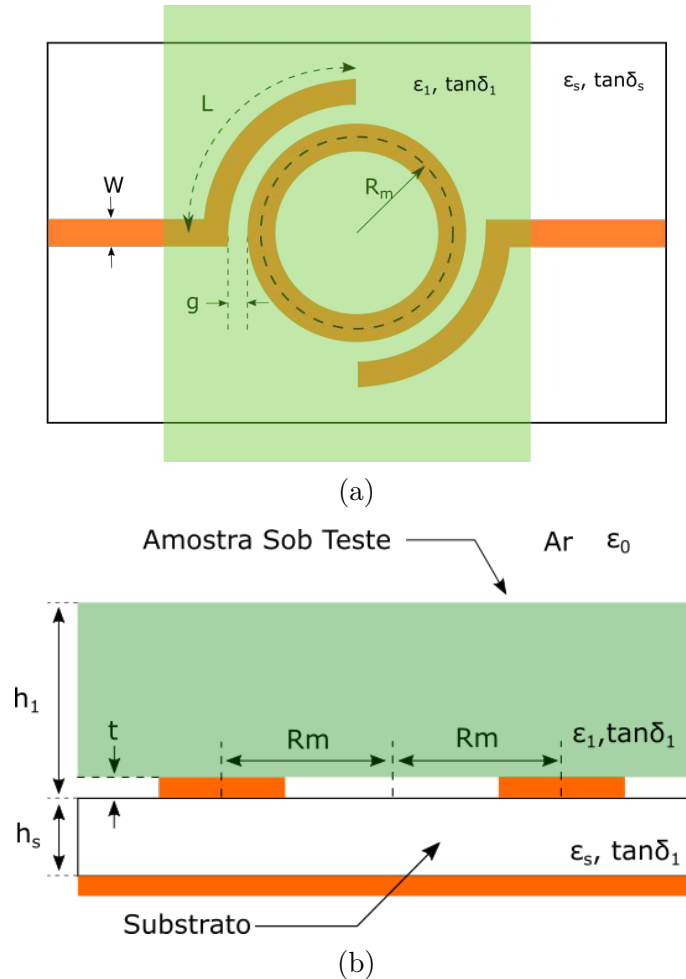
$$2\pi R_m = n\lambda_g, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

em que R_m é o raio médio do anel, que é a média dos raios externo e interno, λ_g é comprimento de onda guiado e n é número do modo correspondente.

Para dar início ao projeto do anel ressonante, deve-se levar em conta a construção do mesmo. A construção do anel ressonante será feita em uma fresa, portanto, existe limites para a precisão do circuito. Na literatura, as distâncias entre as linhas de alimentação e o anel geralmente não ultrapassam os 2 mm, portanto, para que não ocorra nenhum problema na construção é proposto um modelo alternativo ao modelo clássico do anel ressonante. MELO (2009) propôs um anel ressonante com acoplamento semelhante a um ressonador de meio comprimento de onda em microfita, que é ilustrado na Fig. 4.2. O ressonador de meio comprimento de onda ressonará quando o comprimento de onda guiado for a metade da linha de microfita entre os acoplamentos e os seus múltiplos inteiros n , ou seja, $\lambda_g = 2l_2/n$.

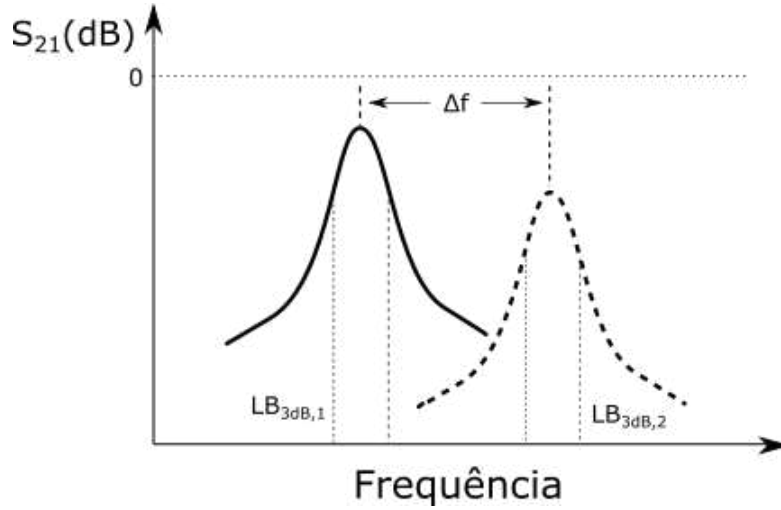
Para a construção do anel ressonante para medição da permissividade e perdas da vermiculita é proposto que as linhas de alimentação circundem o anel para aumentar o acoplamento,

Figura 4.3: Ilustração do arranjo de anel ressonante com acoplamento em meio comprimento de onda, vista superior (a) e vista lateral (b).



e assim, aumentar a distância entre a linha de alimentação e o anel em microfita. Na Fig. 4.8a pode ser visto que a metade da circunferência do anel corresponde a metade do primeiro comprimento de onda de ressonância (λ_1), e que L é igual a metade desse comprimento de onda. Na Fig. 4.8b pode-se constatar como será o superstrato composto pela amostra que será analisada. A Amostra Sob Teste (AST) apresenta uma permissividade relativa (ϵ_2) e uma tangente de perdas ($\tan\delta_2$) distintas do substrato. Se a amostra for sólida, haverá um espaço entre o substrato e amostra de tamanho (t), que é altura do cobre da placa de microfita. Esse espaço pode influenciar na determinação das propriedades dielétricas da amostra. As propriedades da AST serão determinadas a partir da teoria da seção seguinte.

Figura 4.4: Ilustração dos picos de ressonância de um anel ressonante em microfita antes e após a inserção de uma AST.



4.2 Teoria para Técnica de Medição

O circuito anel ressonante em microfita tem múltiplas ressonâncias que ocorrem quando o perímetro do anel ressonante é igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda guiado. Para a medição da permissividade do superestrato haverá duas frequências de ressonância distintas, $f_{r,1}$ e $f_{r,2}$, que são a frequência de antes da inserção da AST e após a inserção da AST, respectivamente. As frequências de ressonâncias $f_{r,1}$ e $f_{r,2}$ estão relacionados da seguinte forma

$$\varepsilon_{eff,2} = \left(\frac{f_{r,1}}{f_{r,2}} \right)^2 \varepsilon_{eff,1}, \quad (4.2)$$

em que $\varepsilon_{eff,2}$ e $\varepsilon_{eff,1}$ são a permissividade efetiva do anel ressonante com a mostra e sem amostra, respectivamente. As frequências de ressonância $f_{r,1}$ e $f_{r,2}$ podem ser extraídos por meio do parâmetro de espalhamento S_{21} como pode ser visto na Fig.4.4. Pelo parâmetro S_{21} pode ser calculado também a faixa de frequência limitada pela frequências de meia potência (LB_{3dB}), como pode ser visto na Fig. 4.4.

Baseado nas formulações analíticas dos circuitos em microfita com multicamadas [SVA-CINA, 1992], a permissividade relativa da AST ($\varepsilon_{r,2}$) pode ser encontrada a partir da permissividade efetiva da configuração de microfita de duas camadas e da permissividade relativa do substrato ($\varepsilon_{r,1}$)

$$\varepsilon_{r,2} = \frac{q_2}{q_1 + q_2 - 1 \frac{(1-q)^2}{\varepsilon_{eff,2} - q_1 \varepsilon_{r,1}}}, \quad (4.3)$$

em que q_1 e q_2 são os fatores de preenchimento Wheeler para uma configuração de duas camadas. No Anexo I encontra-se a teoria para o cálculo dos fatores de preenchimento. Caso o valor da permissividade do substrato ($\varepsilon_{r,1}$) não for conhecido, pode ser calculado da seguinte forma

$$\varepsilon_{r,2} = \frac{\varepsilon_{eff,1} + q_1 - 1}{q_1}. \quad (4.4)$$

A introdução de uma amostra para sobre o anel ressonante em microfita não afeta somente as frequências de ressonância do circuito de micro-ondas, mas também altera a largura de banda em 3dB (LB_{3dB}). Para determinar a tangente de perdas do substrato do anel ressonante em microfita com relação a frequência, o fator de qualidade (Q) de cada ressonância do ressonador deve ser medido. O fator de qualidade da estrutura em questão pode ser medido com Analisador Vetorial de Rede (VNA). O fator de qualidade é calculado dividindo a frequência de ressonância (f_n) pelo LB_{3dB} correspondente

$$Q_L = \frac{f_n}{LB_{3dB}}. \quad (4.5)$$

O fator de qualidade carregado (Q_L) inclui perdas que são devido ao carregamento externo e pelo anel ressonante em si. O fator de qualidade descarregado é necessário para o cálculo da tangente de perdas. O fator de qualidade descarregado pode ser calculado a partir do fator de qualidade carregado calculado utilizando a seguinte equação para um ressonador simétrico [RAGAN, 1965].

$$Q_U = \frac{Q_L}{1 - 10^{-IL/20}}. \quad (4.6)$$

O parâmetro IL é perda de inserção no pico de frequência de ressonância em dB. O fator de qualidade também pode ser medido usando técnicas diferentes da técnica de 3dB. Em alguns casos, há problemas com método, porque é baseado em dados discretos [HEINOLA; TOLSA, 2006]. O método de 3dB tende a ter resultados imprecisos, portanto, é necessário um nível de acoplamento adequado entre a linha de alimentação e o anel ressonante. Além do ruído, o método de 3dB é suscetível a qualquer assimetria na curva de ressonância, o que pode levar a erros no fator de qualidade calculado. Existe outras técnicas para calcular o fator de qualidade, que são mais robustas na presença de ruído, como o ajuste de Lorenz e

o ajuste em círculo [PETERSAN; ANLAGE, 1998].

O fator de qualidade não descarregado da estrutura do ressonador inclui fatores de qualidade das perdas do condutor, perdas dielétricas e as possíveis perdas por irradiação

$$\frac{1}{Q_U} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r}. \quad (4.7)$$

As perdas por irradiação (Q_r) e no condutor (Q_c) podem ser desprezadas. Para uma estrutura em anel ressonante em microfita não é necessária nenhuma aproximação para perdas dielétricas, porque a tangente de perdas é inversamente proporcional ao fator de qualidade

$$\tanh \delta = \frac{1}{Q_d} = \frac{1}{Q_U}. \quad (4.8)$$

A análise para determinação da tangente de perdas de uma amostra introduzida na parte superior do anel ressonante, como um superestrato, é um pouco mais complexa. A inserção de amostra não afeta somente a frequência de ressonância do circuito, mas também altera a largura de banda (LB_{3dB}). Assumindo que as perdas por irradiação e pelo condutor são desprezíveis, conclui-se que

$$\frac{1}{Q_{d,2}} - \frac{1}{Q_{d,1}} = \frac{1}{Q_{U,2}} - \frac{1}{Q_{U,1}}, \quad (4.9)$$

em que os fatores $Q_{d,1}$ e $Q_{d,2}$ são os fatores de qualidade dielétricos com e sem a amostra respectivamente. Os fatores $Q_{U,1}$ e $Q_{U,2}$ são os fatores de qualidade descarregados com e sem amostra respectivamente. De acordo com SCHNEIDER (1969) o fator de qualidade dielétrico em uma configuração em microfita com n camadas ($Q_{d,n}$) está relacionado com as tangentes de perdas das camadas

$$\sum_n^{i=1} p_{i,n} \tan \delta_i = \frac{1}{Q_{d,n}}, \quad (4.10)$$

em que os fatores $p_{i,n}$ são os fatores de preenchimento Schneider para i -ésima camada, e $\tanh \delta_i$ é tangente de perdas i -ésima. A tangente de perdas da amostra pode ser encontrada a

partir da Eq. 4.10 e isolando $\tan \delta_2$

$$\tan \delta_2 = \frac{1}{p_{2,2}} \left(\frac{1}{Q_{d,2}} - \frac{1}{Q_{d,1}} \right) + \frac{p_{1,1} - p_{1,2}}{p_{2,2}} \tan \delta_1. \quad (4.11)$$

O fator $p_{1,1}$ é dado por

$$p_{1,1} = \frac{1}{1 + \frac{k-1}{1 + \frac{k-1}{(k+1)*\varepsilon_{r,1}}}}, \quad (4.12)$$

$$k = \sqrt{(1 + 10h_1/w)}, \quad (4.13)$$

e os fatores $p_{1,2}$ e $p_{2,1}$ são calculados a partir dos fatores de preenchimento de Wheeler,

$$p_{1,2} = \frac{\varepsilon_{r,1}}{\varepsilon_{eff,2}} q_1 \quad (4.14)$$

e

$$p_{2,2} = \frac{\varepsilon_{r,2}}{\varepsilon_{eff,2}} \frac{q_2(1 - q_1)^2}{(\varepsilon_{r,2}(1 - q_1 - q - 2) + q_2)^2}. \quad (4.15)$$

Quando é inserido a amostra como superestrato do anel ressonante é necessário calcular a permissividade relativa do superestrato dependente da frequência. Um forma de avaliar a dependência da permissividade em relação da frequência é

$$\varepsilon_{eff}(f) = \varepsilon_r - \frac{\varepsilon_r - \varepsilon(f=0)}{1 + P(f)}. \quad (4.16)$$

A Eq. 4.16 é utilizada para a permissividade efetiva do circuito de microfita de uma camada. Uma formulação precisa para o termo de correção em frequência ($P(f)$) foi formulado por EDWARDS; OWENS (1976). Para calcular a tangente de perda dielétrica dependente da frequência, os fatores de preenchimento dependentes da frequência, $p_{i,n}(f)$, devem ser derivados

$$p_{1,1}(f) = \left(\frac{2P(f) + 1 + G}{2P(f) + 2} \right) \left(\frac{\varepsilon_{r,1}}{\varepsilon_{eff,1}(f)} \right), \quad (4.17)$$

com $G = \sqrt{a + 10h_1/w}$. Para uma estrutura de duas camadas, a permissividade efetiva dependente da frequência é necessária para definir os fatores de preenchimento Schneider. A formulação da permissividade efetiva da estrutura de duas camadas em microfita é primeiramente usada para calcular a expressão quasi TEM. Considerando a permissividade efetiva

de uma estrutura de uma camada, e a permissividade relativa de duas camadas como função de $\varepsilon_{r,1}$ e $\varepsilon_{r,2}$ tem-se

$$\varepsilon_r = \frac{2}{1+G} \left[\varepsilon_{r,1} q_1 + \varepsilon_{r,2} \frac{(1-q_1)^2}{\varepsilon_{r,2}(1-q_1-q_2) + q_2} + \frac{G-1}{2} \right]. \quad (4.18)$$

Substituindo a Eq. 4.18 e a permissividade efetiva quasi TEM na Eq. 4.16, a permissividade efetiva dependente da frequência com duas camadas é

$$\varepsilon_{eff,2}(f) = A \left[\varepsilon_{r,1} q_1 + \varepsilon_{r,2} \frac{(1-q_1)^2}{\varepsilon_{r,2}(1-q_1-q_2) + q_2} \right] - B, \quad (4.19)$$

com

$$A = \frac{2P(f) + 1 + G}{(1 + P(f))(1 + G)} \quad (4.20)$$

e

$$B = \frac{(1-G)P(f)}{(1 + P(f))(1 + G)}. \quad (4.21)$$

Os fatores de preenchimento também são calculados para dependência da frequência

$$p_{1,2}(f) = A q_1 \frac{\varepsilon_{r,1}}{\varepsilon_{eff,2}(f)} \quad (4.22)$$

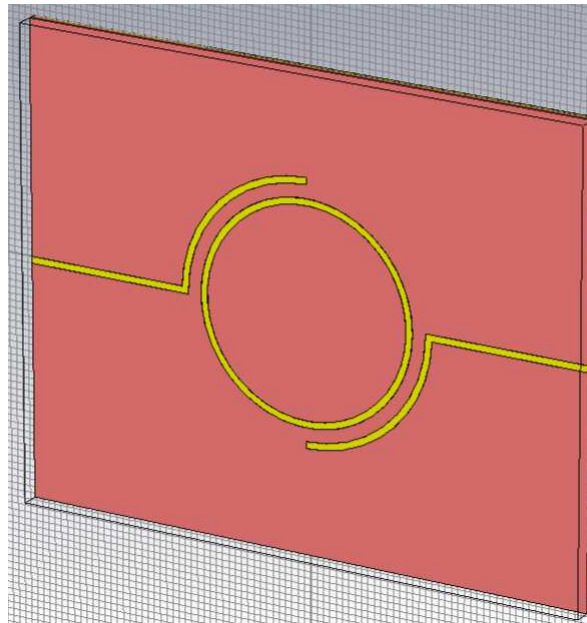
$$p_{2,2}(f) = A \left[\frac{q_2(1-q_1)^2}{(\varepsilon_{r,2}(1-q_1-q_2) + q_2)^2} \right] \frac{\varepsilon_{r,2}}{\varepsilon_{eff,2}(f)} \quad (4.23)$$

Para realizar os cálculos da medição da permissividade da AST, foi realizado um código em linguagem Matlab baseado nas equações desta seção. O código está contigo no Apêndice I.

4.3 Simulação do Anel Ressonante

A simulação do circuito é realizada em um programa de simulação eletromagnética CST[®]. Este programa realiza simulações eletromagnéticas em circuitos de micro-ondas. O substrato escolhido para simulação do anel ressonante foi o Rogers TMM[®]13i. Esse substrato tem um valor de permissividade relativa de 12.2. Foi escolhido este valor para a permissividade do substrato do anel para que o circuito seja o menor possível, desta forma

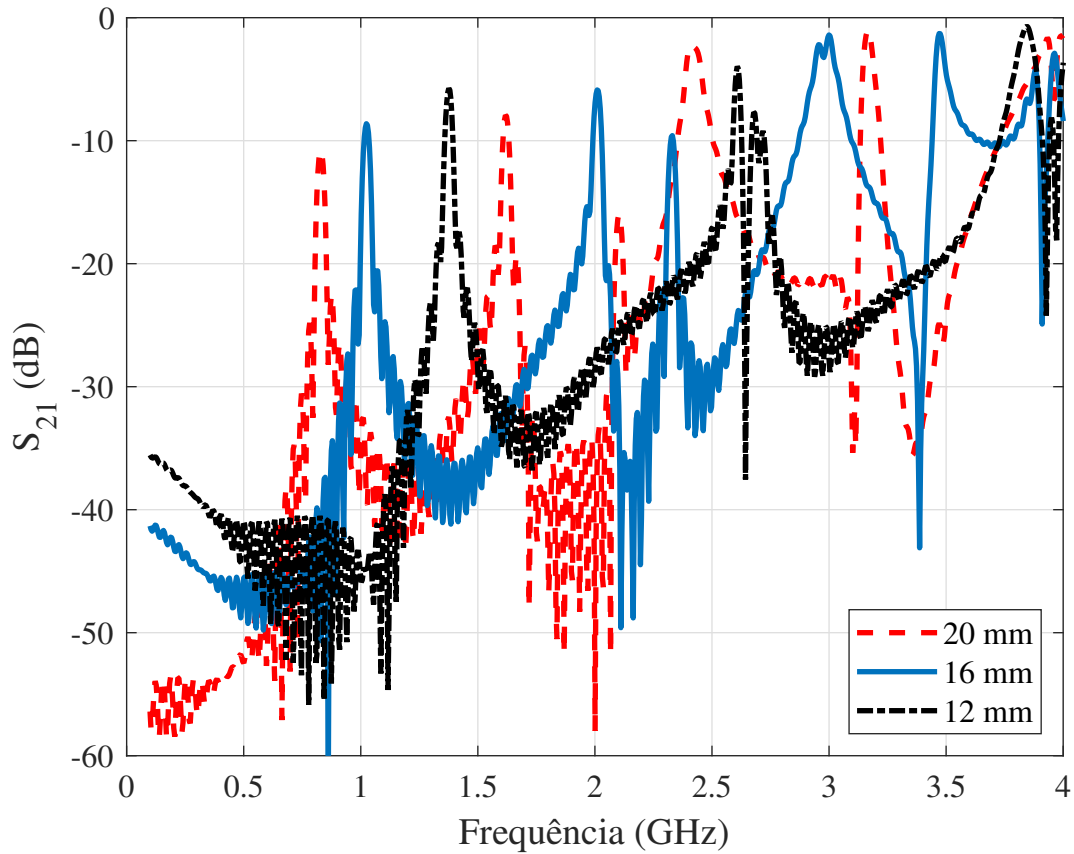
Figura 4.5: Imagem do modelo de simulação no programa CST[®] para uma estrutura de anel ressonante com acoplamento de meio comprimento de onda.



poderá ser caracterizado pequenas amostras de vermiculita. O valor da tangente de perdas do substrato Rogers TMM[®]13i é baixo, o valor é 0.0019. Uma das razões da escolha desse substrato de baixas perdas está no fato de que o sensor construído possa caracterizar amostras com baixas perdas, e a medição da tangente de perdas de AST não ser afetada pelas propriedades dielétricas do sensor. Pode ser visualizado na Fig. 4.5 o modelo de simulação desenvolvido no CST[®]. As dimensões do circuito são $h_1 = 12.7mm$, $w = 1.0mm$, raio médio (R_m) e o espaço entre as linhas de acoplamento e o anel (g) será objeto de estudo em seguida.

Para que o anel ressonante tenha a primeira frequência de ressonância em 1 GHz, é necessário analisar a resposta em frequência do parâmetro S_{21} em relação ao raio médio (R_m). Modificando o valor do raio médio (R_m) pode-se fazer com que as frequências de ressonância variem, se o raio for aumentado as frequências de ressonância diminuirão, e se for diminuído as frequências de ressonância aumentarão. Contudo, ao se diminuir o raio do anel ressonante deve-se respeitar a relação entre a largura da linha e raio médio do anel (w/R_m), que deve ser mantida menor que 0.2, pois é necessário evitar a excitação de possíveis modos de ordem superior [CHANG; HSIEH, 2004]. A simulação foi realizada para

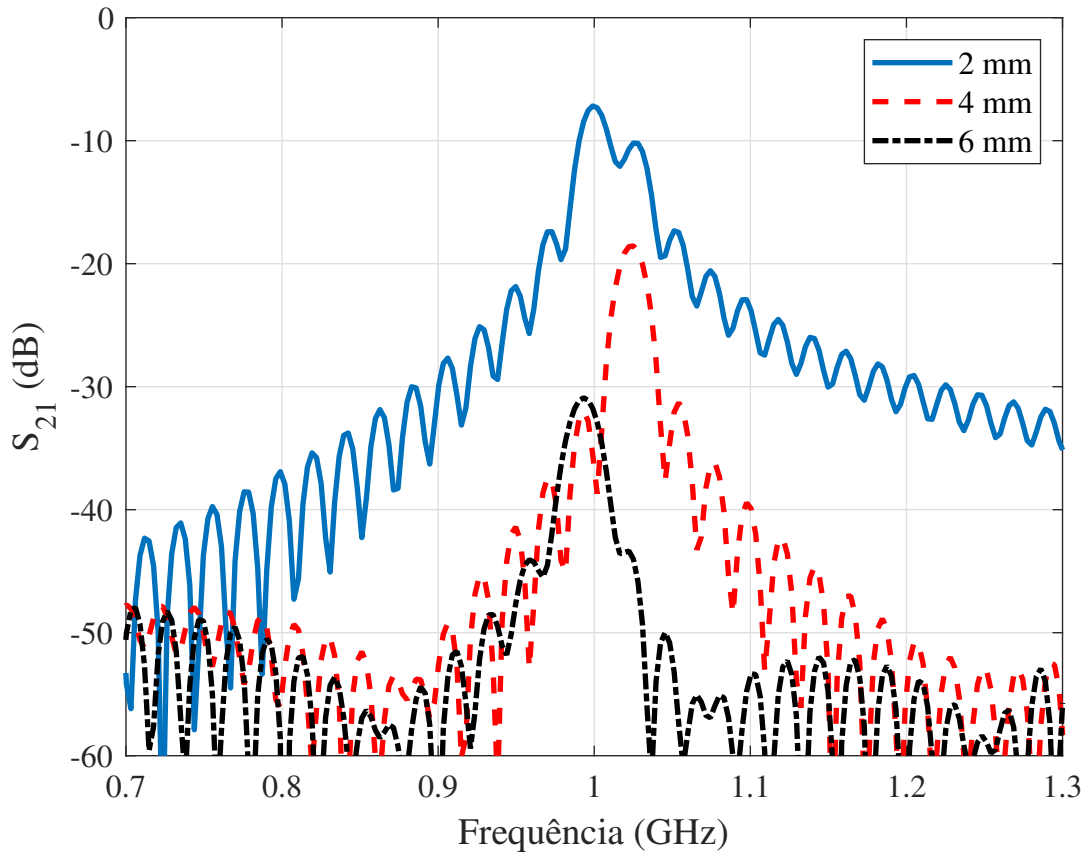
Figura 4.6: Simulação do parâmetro S_{21} em relação a frequência para valores de raio médio (R_m) distintos.



uma janela de frequência entre 0.1GHz até 4GHz , e os valores do raio foram 20 mm, 16 mm e 12 mm.

Analisando os resultados da Fig. 4.6 pode-se observar que quanto menor o raio maiores serão as frequências de ressonância. O resultado para o raio de 16 mm mostrou-se adequados para aplicação, pois os três picos de ressonância estão bem definidos. Os valores dos picos ressonância para $R_m = 16\text{ mm}$ são: $f_1 = 1.024\text{ GHz}$, $f_2 = 2.010\text{ GHz}$ e $f_3 = 3.004\text{ GHz}$. As frequências de ressonância após o terceiro pico de ressonância apresentam alterações (pouca definição) devido ao acoplamento entre os modos de ordem superior, e também apresentam uma largura de banda de meia potência grande, se comparado as primeiras frequências. Isso representa um baixo fator de qualidade ao circuito e características inapropriadas para o mesmo funcionar como sensor. O primeiro pico de ressonância e o segundo apresentam uma largura de banda de meia potência próxima de 20 MHz, portanto, uma largura de banda estreita e suficiente para medições. A terceiro frequência de ressonância tem uma largura de

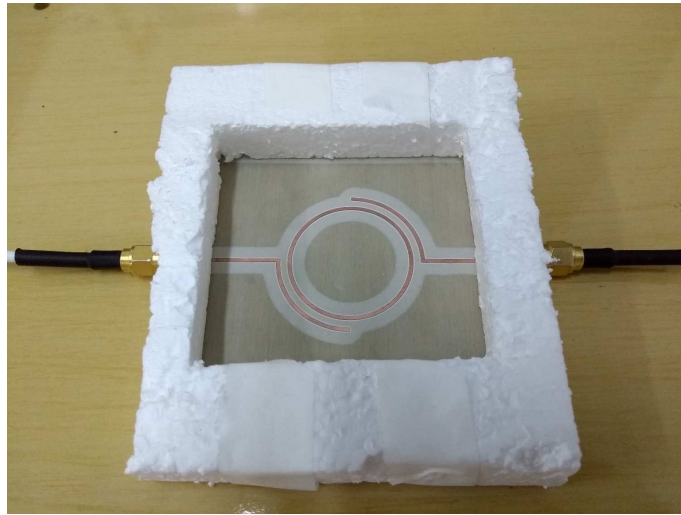
Figura 4.7: Simulação do anel ressonante variando o *gap*, com raio médio em 16 mm.



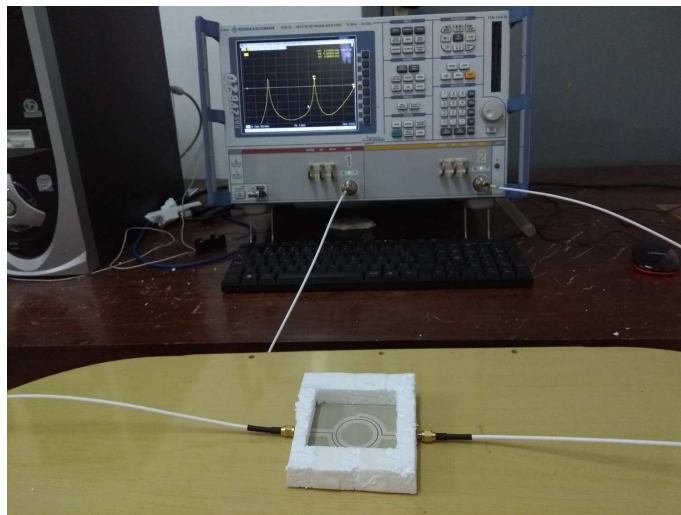
banda de meia potência de aproximadamente 100 MHz, uma largura de banda mais larga que poderá acrescentar imprecisão na medição das propriedades nessa frequência.

Uma segunda análise é necessária para a construção do anel ressonante. É necessário averiguar a distância entre o anel e as linhas de alimentação (g). Para analisar o acoplamento foi simulado o anel ressonante e verificado se parâmetro de espalhamento S_{21} estava acima de -20 dB. A simulação foi feita para três valores distintos de espaçamento entre as linhas de alimentação e o anel ressonante, que foram 2 mm, 4 mm e 6 mm. Na Fig. 4.7 pode ser visualizado a simulação do anel ressonante para os três valores de g . Para uma distância de 2 mm o valor simulado para o S_{21} está acima de -10 dB, e para os outros valores abaixo de -4 mm, os valores de S_{21} não são satisfatórios. Os valores de S_{21} para a segunda e terceira frequência ressonância também estão acima de -20 dB, para um g de 2 mm. Portanto, o valor escolhido para g é 2 mm.

Figura 4.8: Foto do anel ressonante (a) e foto da configuração da bancada de medição (b).



(a)

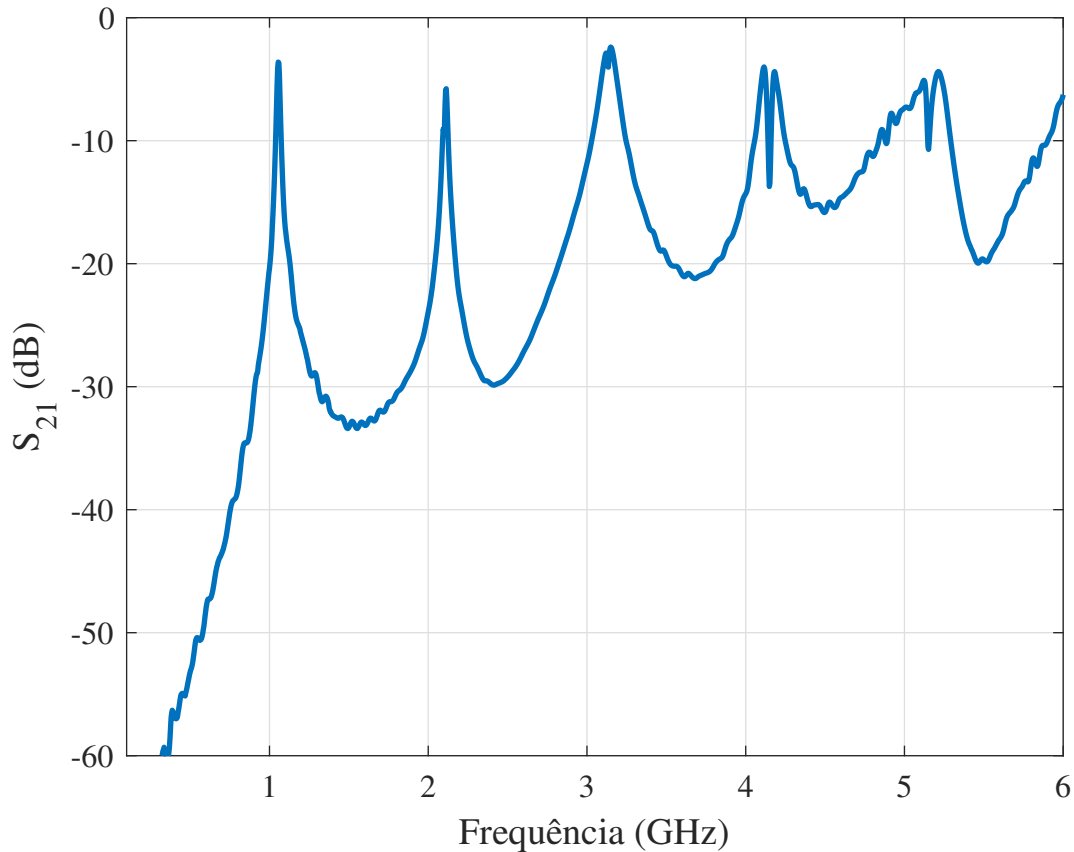


(b)

4.4 Medições

O anel ressonante foi construído utilizando um fresa LPKF[®]. Foram tomados os cuidados necessários para que a broca da fresa não perfurassem o substrato produzindo lacunas em volta das trilhas. Um VNA da Rohde & Schwarz ZVB 20 foi utilizado para medição do parâmetro de espalhamento S_{21} na faixa de 0.1 GHz a 6 GHz. Foi construído um recipiente de isopor para acomodar a vermiculita, com a finalidade que ela esteja acima do anel ressonador, e que a vermiculita tenha uma altura uniforme acima do anel e do substrato.

Figura 4.9: Medição do parâmetro S_{21} em relação a frequência do anel ressonante construído.



Foi considerado desprezível a influência que o recipiente de isopor possa causar no processo de medição dos parâmetros de espalhamento da AST.

Na Fig. 4.9 pode ser observado a medição do S_{21} do circuito anel ressonante. Pode-se constatar que as três frequências de ressonância estão bastante próximas do que foi simulado. Os valores das três primeiras frequências de ressonância são $f_1 = 1.028$ GHz, $f_2 = 2.010$ GHz e $f_3 = 3.004$ GHz. Os demais picos apresentam deformações e estão de acordo com a simulação.

Para a testar a acurácia e funcionamento do Método do Anel Ressonante, foi realizado testes em três amostras sólidas com permissividades e tangentes de perdas conhecidas. Além de testar amostras com propriedades conhecidas, será testado duas amostras de vermiculita, uma amostra comercial conhecida e uma amostra bruta da mina de Santa Luzia-PB.

Antes de inserir as mostras no anel ressonador, foi calculado o valor da permissividade para o substrato nos três primeiros picos de ressonância. Para as primeiras frequências, 1

Tabela 4.1: Resultado para as permissividades e tangente perdas calculadas para três superestratos distintos.

Amostras	Parâmetros			Resultados					
	h_1 (mm)	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r			$\tan \delta$		
				1 GHz	2 GHz	3 GHz	1 GHz	2 GHz	3 GHz
FR4 Hatachi MCLE67(H)	1.6	4.3 ~4.5	0.008	4.887	4.691	4.856	0.030	0.012	0.072
Rogers RT/Duroid 5870	0.5	2.33	0.0012	1.235	1.95	1.7272	0.004	0.023	0.1961
Teflon	10	2.0 ~2.1	0.00028	2.045	1.976	1.000	0.006	0.001	0.2361

GHz e 2 GHz, os valores foram: permissividade relativa 12.208 (1 GHz), 12.169 (2 GHz) e tangente de perdas 0.0019 (1 GHz), 0.0017 (2 GHz). Os valores de permissividade relativa e tangente calculadas para o substrato estão muito próximos dos valores estipulados pelo fabricante. Contudo, para terceira frequência de ressonância, os valores da permissividade relativa e tangente de perdas do substrato divergem bastante, os valores são: permissividade relativa 12.832 (3 GHz) e tangente de perdas 0.0073 (3 GHz).

As amostras utilizadas para o experimento foram uma placa de teflon, um substrato de FR4 e um substrato Rogers RT/Duroid. Os resultados para características dielétricas dos materiais testados encontram-se na Tab. 4.1. Pode-se observar que os valores calculados utilizando para 3 GHz divergem bastante dos valores estipulados pelos fabricantes. Portanto, o terceiro pico de ressonância não será utilizado para as medições da vermiculita para características dielétricas.

As outras duas frequências de ressonância apresentam valores bem mais próximos. Deve-se observar que para o material teflon a permissividade calculada está bem próxima do valor encontrado na literatura, e para o FR4, os valores apresentam uma maior erro. O teflon apresenta um altura maior que o FR4 e RT/Duroid, portanto, a energia que circula no ressonador deve interagir mais com o teflon do que os outros dois materiais.

Os valores para o teste da vermiculita bruta e expandida comercial estão de acordo com valores encontrados na literatura. Para as medições da vermiculita, foi utilizado uma altura

de 14 mm para o superestrato. Os valores de permissividade para vermiculita bruta obtidos foram: permissividade relativa 3.034 (1 GHz), 3.129 (2 GHz) e tangente de perdas 0.150 (1 GHz), 0.157 (2 GHz). Os valores de permissividade para vermiculita expandida foram: permissividade relativa 1.401 (1 GHz), 1.380 (2 GHz) e tangente de perdas 0.048 (1 GHz), 0.056 (2 GHz).

4.5 Conclusão

O Método do Anel Ressonante mostrou-se com moderada eficiência para caracterizar materiais sólidos com baixa espessura. Contudo, se amostra possuir um espessura maior, como é caso do Teflon, por exemplo, as medições apresentam valores próximos aos valores de permissividade e tangente de perdas fornecido pelos fabricantes. Ao analisar a vermiculita bruta e expandida comercial, pode-se verificar que a diferença entre os valores de permissividade relativa e tangente de perdas são significativas, portanto, o método do anel ressonante é viável para medir as variações das características da vermiculita quando expandida.

Capítulo 5

Metodologia e Resultados

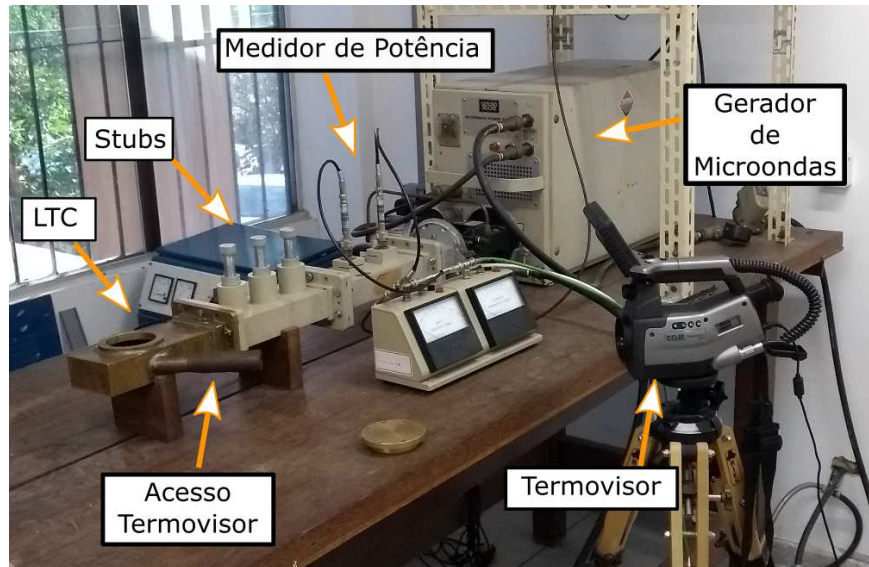
Neste capítulo é apresentada a metodologia dos experimentos para o processamento da vermiculita, como também os testes de caracterização das propriedades dielétricas da vermiculita. É mostrada também a descrição dos componentes do sistema de processamento da vermiculita, bem como uma avaliação dos resultados, comparando em cada processamento de vermiculita bruta (VB) o tempo gasto para o processamento, energia, volume expandido e características dielétricas. Ao final são apresentadas conclusões sobre os resultados obtidos.

5.1 Sistema de processamento de vermiculita

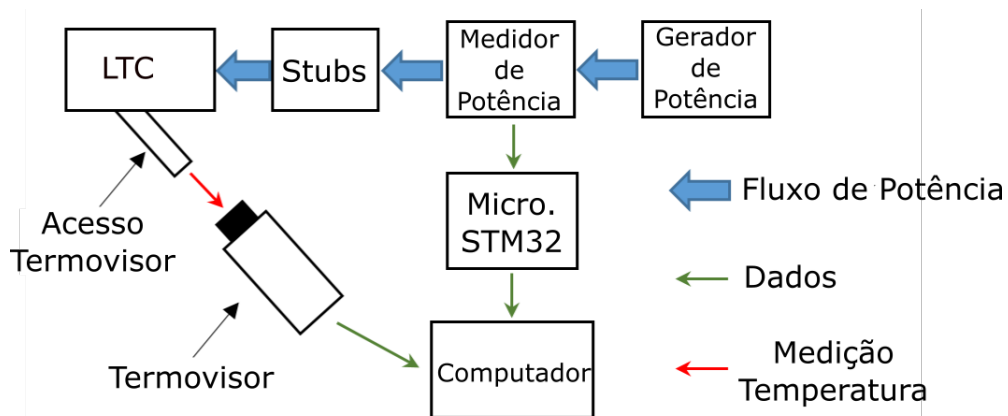
Uma bancada foi montada para realizar os experimentos e testes com a vermiculita. A bancada é composta por um gerador micro-ondas de alta potência com controle de potência que pode alcançar até 3 kW, um circulador, um guia de ondas com dois diodos de cristal para medição de potência transmitida e refletida na carga, tocos (*stubs*) para casamento de impedância e consequente controle da potência refletida pela amostra, e uma linha de transmissão em curto.

Para a realização da medição da temperatura da amostra dentro da linha de transmissão em curto, foi utilizado um termovisor FLIR P65. Os dados de temperatura da amostra puderam então ser analisados e processados posteriormente em computador. Para medição da potência transmitida e refletida, por meio dos diodos de cristal, foi produzido um circuito

Figura 5.1: Esquema do sistema de aquecimento e aquisição (a) e foto da bancada de experimentação para o processamento da vermiculita e aquisição dos dados (b).



(a)

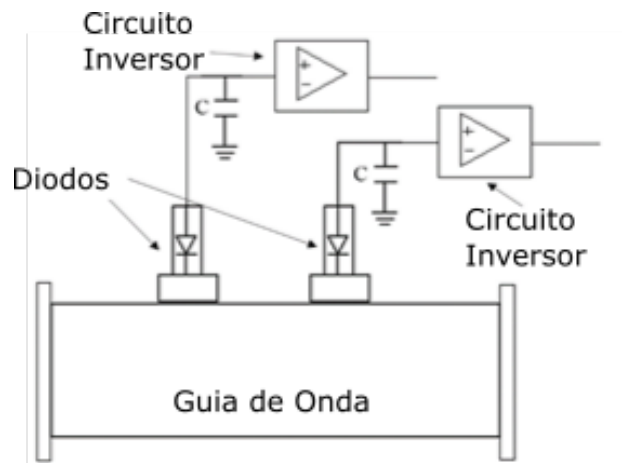


(b)

condicionador de sinal para tal medição. O sinal dos diodos é adquirido utilizando um microcontrolador (STM32) e é transmitido para gravação em computador. Na Fig. 5.1a pode ser visto bancada montada para realização dos teste e aquecimento da vermiculita e aquisição dos dados. Na Fig. 5.1b é ilustrado um diagrama de blocos do esquema de aquisição de aquecimento da vermiculita e aquisição de dados.

Para realizar a medição dos sinais do diodo de cristal localizados no guia de medição de potência, foi necessário construir um pequeno circuito de condicionamento de sinais, pois o sinais não estão na faixa de tensão para aquisição do microcontrolador. O circuito é

Figura 5.2: Ilustração do circuito do circuito condicionador de sinal (a) e configuração para medição das características dielétricas da vermiculita usando o método anel ressonante(b).



(a)

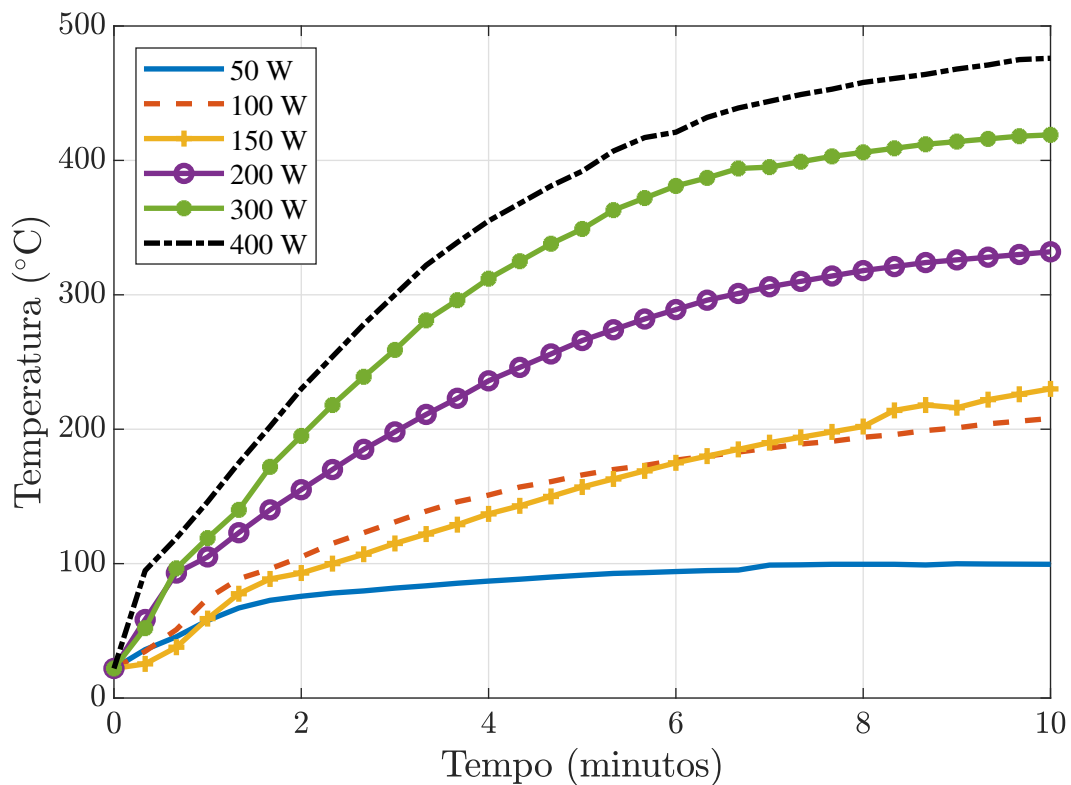


(b)

composto de um circuito inversor de sinal com amplificadores operacionais, e um capacitor para detectar o pico de tensão do sinal [SEDRÁ; SMITH,]. Na Fig. 5.2a ilustra o circuito condicionador.

Na Fig 5.2b pode ser visto a configuração da medição das propriedades dielétricas da vermiculita. Para a medição das características dielétricas da vermiculita um VNA da Rohde & Schwarz ZVB 20 foi usado. Uma vez obtidas as frequências de ressonância em 1 GHz e 2 GHz, o fator de qualidade de cada pico de ressonância, antes e após a inserção da AST sob o circuito, pode ser determinada. A vermiculita foi colocada dentro de um recipiente de isopor.

Figura 5.3: Temperatura da vermiculita versus tempo, para diferentes potências transmitidas.



5.2 Resultados

Para começar os testes de aquecimento da vermiculita por meio de energia de micro-ondas, foram estipulados parâmetros iniciais. O volume inicial da amostra vermiculita foi estabelecido de 15 ml para todos os testes, porque é o volume próximo ao volume máximo do cadinho de alumina utilizado nas medições. A janela de tempo para os primeiros testes foi definida em 10 minutos, pois acreditasse que após esse tempo a temperatura da amostra seja estável ou varie muito pouco. Além do que, para tempos mais longo foi verificado que a mostra fundia e que não mais atendia as característica para a aplicação comercial e os propósitos deste trabalho. Seis testes foram realizados com diferentes potências: 50 W, 100 W, 150 W, 200 W, 300 W, 400 W. Não há variação de temperatura para potências abaixo de 50 W, e os valores de tensão dos diodos estão próximos ou abaixo das tensões e polarização dos mesmos. A Fig. 5.3 é apresentado o gráfico da temperatura em função do tempo para cada potência injetada na linha de transmissão em curto [ZACARIAS et al., 2018].

Figura 5.4: Vista do acesso do termovisor (a) e foto termográfica da temperatura máxima obtida pelo termovisor (b).



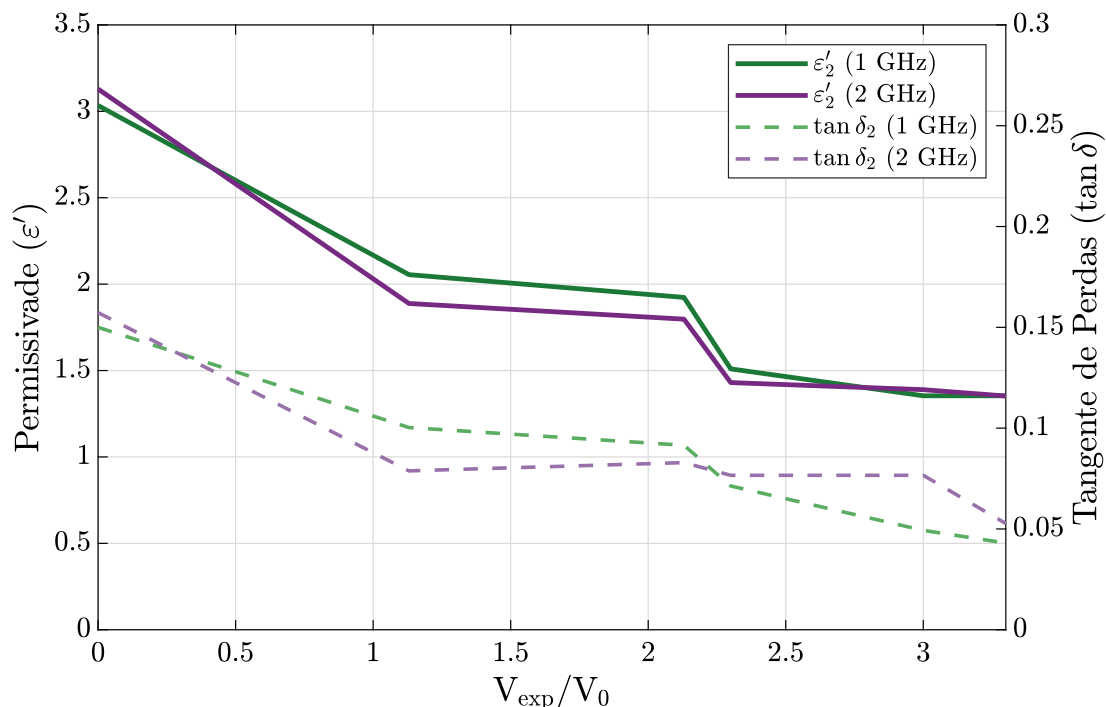
Tabela 5.1: Volume, temperatura e expansão relativa finais da amostra de vermiculita em relação a potência transmitida e refletida.

Parâmetros				
Potência Transmitida (W)	Potência Refletida (W)	Volume Final (ml)	Temperatura Máxima (°C)	Expansão (%)
50	15	15	100	0
100	20	32	208	113
200	30	47	230	213
200	30	50	332	230
300	40	60	419	300
400	50	65	476	330

Pode-se observar que a partir de 100 W de potência injetada apresentou-se um aquecimento de forma lenta e atingiu, em 10 minutos, 200 °C. Para cada valor de potência injetada, o volume da amostra após o aquecimento e a temperatura máxima alcançada são comparados. A potência refletida também é observada. Na Tab. 5.1, os dados de potência transmitida refletida, volume final, temperatura máxima e expansão são exibidos.

Como pode ser visto na Tab. 5.1, quando é fornecido uma de potência de 400 W, a amostra de vermiculita atinge a temperatura e expansão máxima. A temperatura alcançada foi de 476 °C e apresentando uma expansão de 330% em relação ao volume inicial. Pode ser visto nas Fig. 5.4a e Fig. 5.4b o acesso à linha de transmissão em curto e a imagem termográfica da temperatura máxima obtida. Para uma potência transmitida de 50 W,

Figura 5.5: Permissividade relativa e tangente de perdas das amostra de vermiculita processada em relação expansão relativa, volume expandido(V_{exp}) e volume inicial (V_0) .



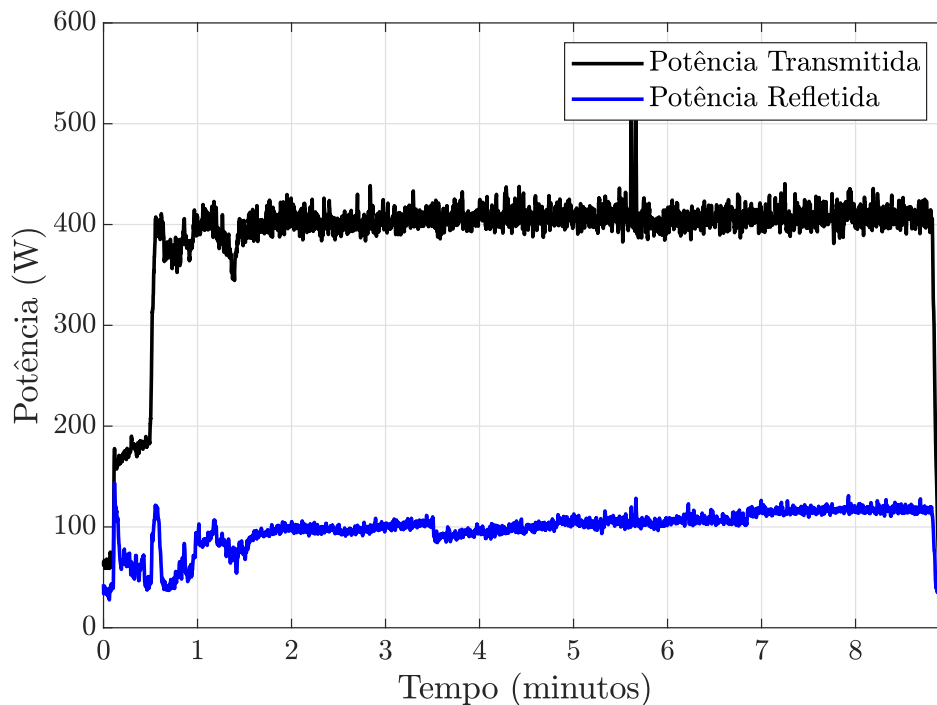
não houve aumento significativo no volume da amostra de vermiculita. Houve um aumento significativo no volume da amostra da vermiculite apenas após a aplicação de injetada pelo gerador de micro-ondas de 100 W. É importante notar que a temperatura medida difere da real temperatura da vermiculita, porque a câmera termográfica capta a temperatura externa, ou seja, captura a temperatura das paredes externas do cadinho. Contudo, neste trabalho considera-se que a vermiculita consegue transferir com uma eficiência boa parte da energia térmica produzida em seu interior para o cadinho de alumina.

Para cada experimento da Tab. 5.1, foram realizadas as medições da permissividade relativa e da tangente de perdas da vermiculita expandida para 1 GHz e 2 GHz.

Na Fig. 5.5 é apresentado a variação da permissividade relativa e da tangente de perdas da vermiculita para diferentes valores de expansão relativa. O comportamento de decréscimo na permissividade relativa ao expandir já era esperado, uma vez que expandida a vermiculita perde densidade, e assim ϵ_r tende a se aproximar da permissividade do ar ($\epsilon_{r(ar)} = 1$).

A tangente de perdas também diminui aproximadamente três vezes no teste para um potência de 400 W, significando que a vermiculita aquece menos à medida que se expande,

Figura 5.6: Potência transmitida pelo gerador de micro-ondas em relação ao tempo para um potência transmitida de 400 W aplicada por 10 minutos. Volume final: 65 ml.



e, portanto, tende a estabilizar sua temperatura. Para melhorar a análise da expansão da vermiculita por meio de energia de micro-ondas, é necessário analisar a potência refletida. O teste com 400 W contínuo foi feito em janela de tempo de 10 minutos, contudo, como a tangente de perdas cai com a expansão e a desidratação da vermiculita, a potência refletida na carga deve aumentar.

Na Fig. 5.6 é apresentado o gráfico da potência refletida e transmitida versus o tempo. No primeiro minuto de processamento é fácil observar que a potência refletida oscila em quanto a potência transmitida é elevada. Isso se deve ao fato de que os tocos (*stubs*) devem ser posicionados (sintonizados) para melhorar o casamento de impedância e, conseqüentemente, diminuir a potência refletida. Analisando a Fig. 5.6 pode-se concluir que após 2-3 minutos a potência refletida é estabilizada, o que significa que a vermiculita não está mais em processo de expansão após esse tempo e que a tangente de perdas diminuiu.

O segundo e terceiro experimentos foram conduzidos com uma janela de tempo limitada em aproximadamente 3,5 minutos. Esses dois experimentos foram conduzidos para analisar se as amostras de vermiculita processadas apresentam os mesmos níveis de expansão, em

Figura 5.7: Potência transmitida pelo gerador de micro-ondas em relação ao tempo para o segundo experimento com potência transmitida de 400 W aplicada por 3.5 minutos. Volume final: 58 ml.

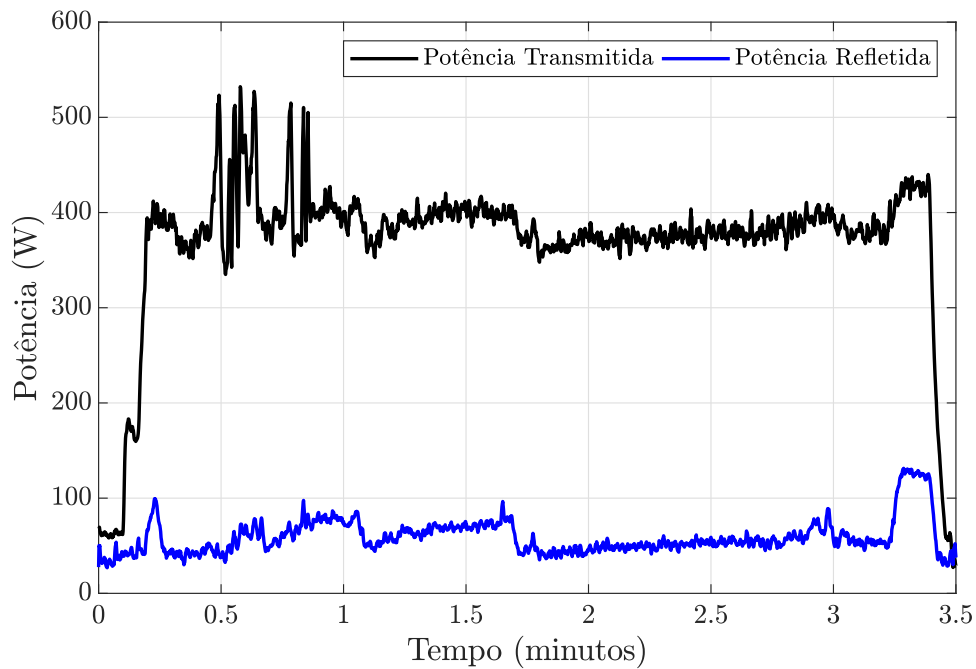
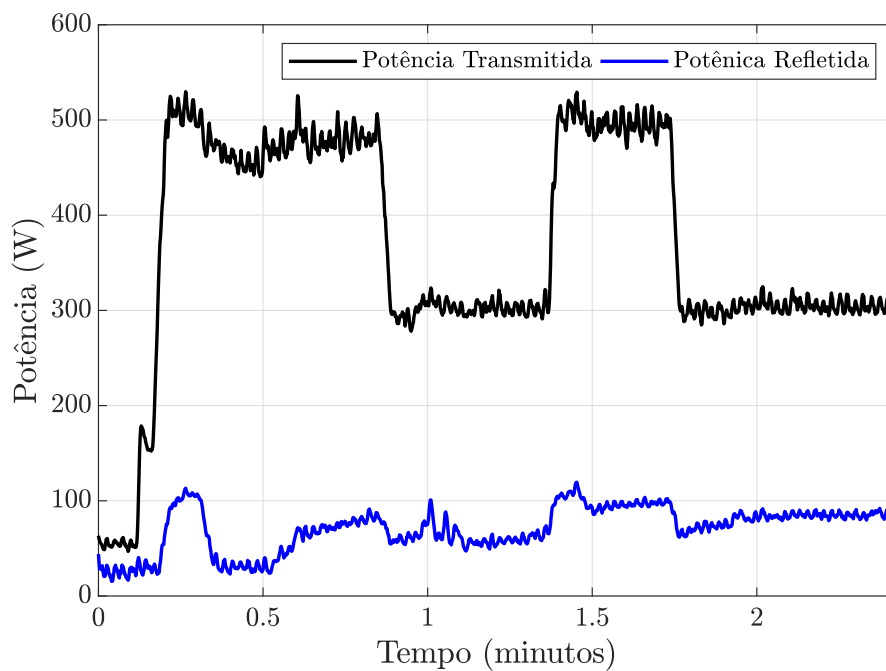


Figura 5.8: Potência transmitida pelo gerador de micro-ondas em relação ao tempo para o terceiro experimento com potência transmitida variável aplicada por 3 minutos. Volume final: 60 ml.



relação aos experimentos anteriores, com um menor tempo e gasto de energia. O segundo experimento é realizado com um potência transmitida de 400 W de forma contínua até a potência refletida se elevar. O terceiro experimento é realizado com um potência variável entre 300 W e 500 W. Este último experimento é realizado com finalidade de processar a vermiculita com potências maiores que 400 W, pois ao realizar testes com potências acima de 400 W, as amostras de vermiculita fundiram.

Para o segundo experimento o volume final foi de 58 ml, o que indica que a vermiculita expandiu de forma semelhante ao primeiro experimento em que foi utilizado menos energia (2.142 kWh). Na Fig. 5.7 são apresentadas as curvas de potência transmitida e refletida versus o tempo. Para o terceiro experimento, que foi utilizado uma potência variável (chaveada) entre 300 W e 500 W, o volume final de 60 ml foi obtido depois de aproximadamente 3 minutos. Na Fig. 5.8 é apresentada as curvas das potências transmitidas e refletidas versus o tempo.

Uma análise simples do consumo de energia, integrando as curvas das potências transmitidas no tempo, indica que diferentes consumos de energia foram utilizados para cada experimento, enquanto os volumes finais foram semelhantes. O primeiro experimento consumiu 5.381 kWh, o segundo consumiu 2.142 kWh e o terceiro consumiu 1.453 kWh. Portanto, percebe-se que a maior eficiência foi para o terceiro experimento, uma vez que uma boa expansão foi obtida com muito menos energia gasta. Deve-se observar que esse valor de potência consumida é aproximadamente o mesmo de fornos de micro-ondas comerciais. Os resultados aqui obtidos só foram possíveis pela utilização do gerador de micro-ondas disponível no LMAP do LEMA.

5.3 Conclusão

Diferentes valores de potência e períodos de tempo foram considerados para o aquecimento de uma amostra de 15 ml de vermiculita, e a energia consumida e a taxa de expansão são comparadas. Analisando os resultados conclui-se que ao se utilizar a energia de micro-ondas de forma variável, a eficiência do processo, em relação a energia gasta e tempo de processamento, é muito maior que os processos contínuos para fins de aquecimento da vermiculita via micro-ondas, uma vez que vermiculita teve uma taxa de expansão similar para

um consumo de energia menor.

A vermiculita processada, ao final dos experimentos, com energia de micro-ondas apresentada neste capítulo não atingiu valores de expansão comercial, de acordo com a literatura. No entanto, é sabido que alguns tipos de vermiculita, quanto expandidos, podem não atingir valores comerciais de expansão [RASHAD, 2016]. Outro ponto observado durante os experimentos foi que a vermiculita que estava próxima as paredes da linha de transmissão expandiram pouco ou não expandiram, isso se deve ao fato que a componente tangente do campo elétrico zera nas paredes do guia de onda metálico, ou seja, a densidade de campo elétrico próxima as paredes é bem menor que no centro do guia de ondas, assim, a vermiculita expandirá menos.

Capítulo 6

Considerações Finais e Contribuições

A vermiculita é um argilomineral bastante utilizado em diversas áreas, como por exemplo agricultura, construção civil e outras aplicações industriais. A expansão da vermiculita ocorre quando a água quimicamente ligada entre suas lamelas transforma-se rapidamente em vapor. Em processos convencionais, é necessário que a vermiculita atinja temperaturas entre 800-1100 °C. Neste trabalho, a vermiculita foi expandida a uma temperatura máxima de 476 °C utilizando energia de micro-ondas. A utilização de energia de micro-ondas para a expansão da vermiculita é viável, pois o processamento em larga escala consome de 150 kWh/tonelada, enquanto o processamento convencional utiliza cerca 277.7 kWh/tonelada (1 GJ), além de emitir gases de efeito estufa na atmosfera, devido à utilização de combustíveis fósseis no processamento.

Neste trabalho foi realizado o estudo de pequenas amostra de vermiculita utilizando energia de micro-ondas. Foi realizado testes em vermiculita em uma linha de transmissão curto-circuitada (guia de onda), utilizando um gerador de micro-ondas de alta potência, com potência máxima de 3 kW. O processamento dentro do guia foi realizado para potências contínuas e variável, com a finalidade de observar a eficiência do processo. Para analisar a expansão da vermiculita foi feito a análise das propriedades dielétricas da vermiculita, o volume inicial e final, e tempo de processamento.

Inicialmente o processamento da vermiculita foi realizado durante 10 minutos, mas observou-se por meio da potência refletida que a vermiculita diminuía sua tangente de perdas após 2-3 minutos. Foram realizados testes com potências contínuas com uma janela

de 3.5 minutos, foi observado de que a vermiculita apresentou expansão comparável aos testes anteriores, o volume inicial era 15 ml e passou para 58 ml. Por fim, foi realizado um teste com potência variável(chaveada) entre 300 W e 500 W. Constatou-se que o tempo de processamento foi um pouco menor, cerca de 3 minutos. O volume final foi comparável ao teste contínuo, o volume final foi de 60 ml. Em relação à energia para utilização do processamento, houve uma redução na energia de micro-ondas utilizada no processamento. O processamento com potência contínua utilizou 2.142 kWh, enquanto o processamento com potência variável foi de 1.452 kWh, uma redução de 32% na energia consumida. Para trabalhos futuros, podem ser realizados mais testes com potências variáveis, por exemplo, potencias iniciais transmitidas maiores, diferentes padrões de chaveamento para potência transmitida e tempos de processamento diferentes.

As características dielétricas das amostras, antes de depois do processamento, demonstraram que a vermiculita diminui sua tangente de perdas e a permissividade relativa após expandir e desidratar. O Método do Anel Ressoante mostrou-se eficiente para caracterizar as propriedades dielétricas da vermiculita. Contudo, para materiais com baixa espessura, os valores medidos para permissividade e tangente de perdas apresentaram um erro considerável. Outro ponto a ser destacado, é que o método construído pode ser utilizado para caraterização de materiais granulosos, como por exemplo solos.

Apêndice A

Código em Matlab

```
clear all;
close all;
clc;

%-----PARAMETROS DE ENTRADA-----
h1 = 1.27e-3;           % Altura do Substrato
h2 = 1.5e-3;           % Altura do Superestrato
w = 1e-3;              % Largura da linha de microfita
t = 35e-6;
Rm = 16e-3;            % Raio mdio
fr_1 = 2.112063e9;     % Frequencia de Ressonancia sem
    Amostra
fr_2 = 1.995688e9;     % Frequencia de Ressonancia com
    Amostra
    % Permissividade do Substrato
IL_1 = 3.88;
IL_2 = 10.19;

f1_1_3dB = 2.102875e9;
f2_1_3dB = 2.124312e9;
```

```

f1_2_3dB = 1.983438e9;
f2_2_3dB = 2.007875e9;

c = physconst('LightSpeed'); % Light Speed
n = 2; % Nmero da frecuencia ressonante
Z0 = 49.9;
%-----
%--- Clculo da Permissividade Efetiva sem e com Amostra---
perm_eff_1 = epl_eff_1 (n, c, Rm, fr_1);
perm_eff_2 = (fr_1/fr_2)^2*perm_eff_1;

%--- Clculo dos fatores e preenchimento---
q1 = fq1(w, h1);
q2 = fq2(w, h1, h2);

%--- Clculo das Permissividades do Substrator e Superstrato---
perm1 = (perm_eff_1 + q1 - 1)/q1
perm2 = q2/(q1 + q2 - 1 + (1 - q1)^2/(perm_eff_2 - q1*perm1))

%--- Clculo da Tangente de Perdas do Substrato---
BW_1 = f2_1_3dB - f1_1_3dB; % Banda de Frequncia em 3dB
    sem a amostra
Ql_1 = fr_1/BW_1; % Fator de Qualidade
    Carregado sem amostra
Qu_1 = (Ql_1)/(1-10^(-IL_1/20)); % Fator de Qualidade
    Descarregado sem amostra
tan_1_eff = 1/Qu_1; % Tangente de Perdas Efetiva
    sem amostra
p11 = fp11 (perm1, h1, w); % Fator de preenchiment p11 (

```

```

    Schneider)
tan1 = tan_1_eff*p11;           % Tangente de Perdas do
    Substrato

%--- C lculo da Tangente de Perdas do Superstrato ---
BW_2 = f2_2_3dB - f1_2_3dB;   % Banda de
    Frequncia em 3dB com amostra
Q1_2 = fr_2/BW_2;             % Fator de
    Qualidade Carregado com amostra
Qu_2 = (Q1_2)/(1-10^(-IL_2/20)); % Fator de
    Qualidade Descarregado com amostra
p12 = fp12(perm1, perm_eff_2, w, h1); % Fator de
    preencihment p12 (Schneider)
p22 = fp22(perm2, perm_eff_2, w, h1, h2); %
    Fator de preencihment p22 (Schneider)
tan2 = (1/Qu_2 - 1/Qu_1)/p22 + (p11 - p12)*tan1/p22 % Tangente
    de Perdas do Substrato

%--- C lculo da Tangente de Perdas do Superstrato ---
perm_eff_1_f0 = fperm_eff_0 (w,h1,t, perm1);
P = fP(h1, w, fr_1, Z0);
perm_eff_1_f = perm1 - (perm1 - 7.87)/(1 + P);
perm_eff_2_f = fperm_eff_2_f(perm1, perm2, q1, q2, h1, w, P);
perm_r = fperm_r(perm1, perm2, q1, q2, h1, w)

BW_2 = f2_2_3dB - f1_2_3dB;   % Banda de
    Frequncia em 3dB com amostra
Q1_2 = fr_2/BW_2;             % Fator de
    Qualidade Carregado com amostra
Qu_2 = (Q1_2)/(1-10^(-IL_2/20)); % Fator de

```

```

Qualidade Descarregado com amostra
p11_f = fp11_f (perm1, perm_eff_1_f, P, h1, w);
p12_f = fp12_f (perm1, perm_eff_2_f, q1, P, h1, w);
        % Fator de preenchimento p12 (Schneider)
p22_f = fp22_f (perm2, perm_eff_2_f, q1, q2, P, h1, w);
        % Fator de preenchimento p22 (Schneider)
tan2 = (1/Qu_2 - 1/Qu_1)/p22_f + (p11_f - p12_f)*tan1/p22_f %
Tangente de Perdas do Substrato

%%
%---Calculo Permissividade Efetva sem Amostra---
function y = epl_eff_1 (n, c, Rm, fr)
y = (n*c/(2*pi*Rm*fr))^2;
end

%--- Calculo Fator de Preenchimento 1---
function y = fq1 (w, h1)
y = 1/2 + 0.9/(pi*log(8*h1/w));
end

%--- Calculo do Fator Preenchimento 2---
function y = fq2 (w, h1, h2)
ht = h1 + h2 ;
A = pi/4*log((ht/h1 + 1)/(ht/h1 + w/(4*h1) - 1));
B = 1 - h1/ht*(1-w/(8*h1));
C = sqrt((ht/h1 + 1)/(ht/h1 + w/(4*h1)-1));
D = pi*log(8*h1/w);
y = 0.5 - (0.9 + A*acos(B*C))/D;
end

%--- Clculo Fator Schneider 11---
function y = fp11 (perm_1, h1, w)
F = (1 + 10*h1/w)^0.5;

```

```

A = (F-1)/(1+(F-1)/(F+1)/perm_1);
y = 1/(1+A);
end

%--- Clculo Fator Schneider 12---
function y = fp12(perm_1, perm_eff_2, w, h1)
q1 = fq1(w,h1);
y = q1*perm_1/perm_eff_2;
end

%--- Clculo Fator Schneider 22---
function y = fp22 (perm_2, perm_eff_2, w, h1, h2)
q1 = fq1(w,h1);
q2 = fq2 (w, h1, h2);
A = q2*(1-q1)^2;
B = (perm_2*(1-q1-q2)+q2)^2;
y = perm_2*A/(perm_eff_2*B);
end

function y = fperm_eff_0 (w,h,t, perm)
U = w/h;
T = t/h;
U1 = U + T*log(1 + 4*exp(1)*(tanh((6.517*U)^0.5))^0.5)/pi;
Ur = U + (U1 -U)*(1+1/cosh((perm-1)^0.5))/2;
Au = 1 + log((Ur^4+Ur^2/2704)/(Ur^4 + 0.432))/49 + log((Ur
    /18.1)^3 + 1)/18.7;
Ber = 0.564*((perm - 0.9)/(perm +3))^0.053;
Y = (perm + 1)/2 + (perm - 1)/2*(1 + 10/Ur)^(-Au*Ber);
Z011 = fZ(U1);
Z01r = fZ(Ur);
y = Y*(Z011/Z01r)^2;
end

```

```

function y = fZ(x)
A = (6 + (2*pi - 6)*exp(-(30.666/x)^0.7528))/x;
B = (4/x^2 + 1)^0.5;
y = 120*pi*log(A + B)/(2*pi);
end

function y = fP(h, w, f, Z0)
h = h*10^-3;
f = f*10^-9;
y = (h/Z0)^1.33*(0.43*f^2-0.009*f);
end

function y = fperm_eff_2_f(perm_1, perm_2, q1, q2, h1, w, P)
G = (1 + 10^(h1/w))^0.5;
A = (2*P + 1 + G)/(1 + P)/(1 + G);
B = (1 - G)*P/(1 + P)/(1 + G);
y = A*(perm_1*q1 + perm_2*(1-q1)^2/(perm_2*(1 - q1 - q2) + q2))
;
end

function y = fperm_r(perm1, perm2, q1, q2, h1, w)
G = (1 + 10^(h1/w))^0.5;
y = 2/(1 + G)*(perm1*q1 + perm2*(1 - q1)^2/(perm2*(1 - q1 - q2)
) + q2) + (G - 1)/2);
end

function y = fp11_f (perm_1, perm_eff_1_f, P, h, w)
G = (1 + 10^(h/w))^0.5;
y = (2*P + 1 +G)/(2*P + 2)*(perm_1/perm_eff_1_f);

```

```
end
```

```
function y = fp12_f (perm_1, perm_eff_2_f, q1, P, h, w)
```

```
G = (1 + 10^(h/w))^0.5;
```

```
A = (2*P + 1 + G)/((1 + P)*(1 + G));
```

```
y = A*q1*perm_1/perm_eff_2_f;
```

```
end
```

```
function y = fp22_f (perm_2, perm_eff_2_f, q1, q2, P, h, w)
```

```
G = (1 + 10^(h/w))^0.5;
```

```
A = (2*P + 1 + G)/((1 + P)*(1 + G));
```

```
B = (1 - G)*P/((1 + P)*(1 + G));
```

```
y = A*(q2*(1 - q1)^2/(perm_2*(1 - q1 - q2) + q2)^2)*perm_2/  
    perm_eff_2_f;
```

```
end
```

Anexo A

Informações adicionais

Para calcular os fatores de preenchimento de Wheeler deve-se utilizar as equações a seguir. Estas equações podem fornecer os fatores de preenchimento para n substratos e superestratos.

$$q = \frac{H_1}{2} \cdot \left[1 + \frac{\pi}{4} - \frac{h}{W_{ef}} \cdot \ln \left(2 \frac{W_{ef}}{h} \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \cdot H_1)}{H_1} + \cos(\frac{\pi}{2} \cdot H_1) \right) \right] \quad (\text{A.1})$$

$$q_i = (1), \text{ para } H_i - (1), \text{ para } H_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, M - 1 \quad (\text{A.2})$$

$$q_M = 1 - \frac{h}{2W_{ef}} \cdot \ln \left(\pi \frac{W_{ef}}{h} - 1 \right) - (1), \text{ para } H_{M-1} \quad (\text{A.3})$$

$$q_{M+1} = \frac{h}{2W_{ef}} \cdot \ln \left(\pi \frac{W_{ef}}{h} - 1 \right) - (1 + V_{M+1}) \cdot \ln \left[2 \frac{W_{ef}}{h} \cdot \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cdot V_{M+1})}{2H_{M+1} - 1 + V_{M+1}} + \sin \frac{\pi}{2} \cdot V_{M+1} + 1 \right] \quad (\text{A.4})$$

$$q_j = (4), \text{ para}(H_j, V_j) - (4), \text{ para}(H_{j-1}, V_{j-1}), j = M + 2, M + 3, \dots, N - 1 \quad (\text{A.5})$$

$$q_N = 1 - \sum_{j=M+1}^{N-1} q_j - \sum_{i=1}^M q_i \quad (\text{A.6})$$

Nessas relações, $H_{i,j} = h_{i,j}/h$ e $V_j = v_j/h$

$$v_j = \frac{2h}{\pi} \cdot \arctan \left[\frac{\pi}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{W_{ef}}{h} - 2} (H_j - 1) \right] \quad (\text{A.7})$$

E o efeito de largura de linha é

$$W_{ef} = W + \frac{2h}{\pi} \cdot \ln \left[17.08 \left(\frac{W}{2h} + 0.92 \right) \right] \quad (\text{A.8})$$

Para um estreita linha da micrófita, $W/h \leq 1$, tem-se

$$q_1 = \frac{\ln A_1}{2 \cdot \ln \frac{8h}{W}} \cdot \left[1 + \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \cdot \arccos \left(\frac{W}{8hH_1} \cdot \sqrt{A_1} \right) \right] \quad (\text{A.9})$$

$$q_1 = (9), \text{ para}(H_i, A_i) - (9), \text{ para}(H_{i-1}, A_{i-1}), i = 2, 3, \dots, M - 1 \quad (\text{A.10})$$

$$q_M = \frac{1}{2} + \frac{0.9}{\pi \cdot \ln \frac{8h}{W}} - (9), \text{ para}(H_{M-1}, A_{M-1}) \quad (\text{A.11})$$

$$q_{M+1} = \frac{1}{2} - \frac{0.9 + \frac{\pi}{4} \cdot \ln B_{M+1} \cdot \arccos \left[\left(1 - \frac{1 - \frac{W}{8h}}{H_{M+1}} \right) \cdot \sqrt{B_{M+1}} \right]}{\pi \cdot \ln \frac{8h}{W}} \quad (\text{A.12})$$

$$q_j = (12), \text{ para } (H_j, B_j) - (12), \text{ para } (H_{j-1}, B_{j-1}), \quad j = M + 2, M + 3, \dots, N - 1 \quad (\text{A.13})$$

E q_N é dada por (6).

$$A_i = \frac{1 + H_i}{1 - H_i + \frac{W}{4h}}, \quad B_j = \frac{1 + H_j}{H_j + \frac{W}{4h} - 1} \quad (\text{A.14})$$

Deriva-se uma relação geral para permissividade efetiva de micrófitas multicamadas

$$\varepsilon_{erf} = \frac{\left(\sum_{i=1}^M q_i \right)^2}{\sum_{i=1}^M \frac{q_i}{\varepsilon_{ri}}} + \frac{\left(\sum_{j=M+1}^N q_j \right)^2}{\sum_{j=M+1}^N \frac{q_j}{\varepsilon_{ri}}} \quad (\text{A.15})$$

Referências bibliográficas

AGUIAR, F. C. M. Pina-Rodrigues e M. B. I. B. de. *Sementes Florestais Tropicais*. [S.l.]: ABRATES, 1988. 137-174 p.

ANDRONOVA, V. I. A study of the crystalloine structure of vermiculite from the tebinbulak deposit. *Refractories and Industrial Ceramics*, v. 48, p. 91–95, 2007.

ANJOS, I. F. dos. *Efeitos da Radiação de Micro-ondas em Minerais Micáceos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

BAKER-JARVIS, J.; GEYER, R.G.; GROSVENOR, J.H.; JANEZIC, M.D.; JONES, C.A.; RIDDLE, B.; WEIL, C.M.; KRUPKA, J. Dielectric characterization of low-loss materials a comparison of techniques. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 5, n. 4, p. 571–577, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/94.708274>>.

BAKER-JARVIS, James; JANEZIC, Michael D.; RIDDLE, Bill F.; JOHNK, Robert T.; KABOS, Pavel; HOLLOWAY, Christopher L.; GEYER, Richard G.; GROSVENOR, Chriss A. *Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metals, Bulding Materials, and Negative-Index*. Washington, 2015.

BAKER-JARVIS MICHAEL D. JANEZIC, Grosvenor John H. Jr James; GEYER, Richard G. *Transmission/Reflection and Short-circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability*. Washington, 1993.

BALANIS, C. A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. 2. ed. [S.l.]: Jonh Wiley & Sons, 2012.

BASSETT, William A. The geology of vermiculite occurrences. *Clays and Clay Minerals*, Clay Minerals Society, v. 10, n. 1, p. 61–69, 1961. Disponível em: <<https://doi.org/10.1346/ccmn.1961.0100106>>.

BURDETTE, E.C.; CAIN, F.L.; SEALS, J. In vivo probe measurement technique for determining dielectric properties at VHF through microwave frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 28, n. 4, p. 414–427, apr 1980. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tmmt.1980.1130087>>.

CARVALHO, Cássio. Vermiculita. In: *Sumário Mineral*. Brasília: DNPM/MME, 2015. v. 35.

CHANG, Kai; HSIEH, Lung-Hwa. *Microwave Ring Circuits and Related Structures*. John Wiley & Sons, Inc., 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/0471721298>>.

CHEN, L. F.; ONG, C. K.; NEO, C. P.; VARADAN, V. V.; VARADAN, V. K. *Microwave Electronics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/0470020466>>.

EDWARDS, T.C.; OWENS, R.P. 2-18-GHz dispersion measurements on 10-100-ohm microstrip lines on sapphire. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 24, n. 8, p. 506–513, aug 1976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tmtt.1976.1128888>>.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. *Matriz Energética e Elétrica*. 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>.

FERRAZ, C. P. Vermiculita - um importante mineral industrial. *I Simpósio de Mineração*, v. 32, p. 1414–1425, 1971.

FOLORUNSO, Olaosebikan; DODDS, Christopher; DIMITRAKIS, Georgios; KINGMAN, Samuel. Continuous energy efficient exfoliation of vermiculite through microwave heating. *International Journal of Mineral Processing*, Elsevier BV, v. 114-117, p. 69–79, nov 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.10.003>>.

FRANÇA, J. F. Ugarte e G. M. Arruda S. C. A. Vermiculite utilization on treatment of water contaminated with organic compounds. *2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering*, v. 1, p. 1–9, 2005.

HEINOLA, J.-M.; TOLSA, K. Dielectric characterization of printed wiring board materials using ring resonator techniques: a comparison of calculation models. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 13, n. 4, p. 717–726, aug 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tdei.2006.1667729>>.

KREMER, Friedrich; SCHÖNHALS, Andreas (Ed.). *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer Berlin Heidelberg, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-642-56120-7>>.

LAGALY., Faiza Bergaya B.K.G. Theng G. *Handbook of clay science*. [S.l.]: Elsevier, 2013.

LANGHE, P. De; BLOMME, K.; MARTENS, L.; ZUTTER, D. De. Measurement of low-permittivity materials based on a spectral-domain analysis for the open-ended coaxial probe. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 42, n. 5, p. 879–886, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/19.252521>>.

MACKINNON, A.; SURVEY, Ontario Geological; KINGSTON, P.W.; SPRINGER, J.S.; MINES, Ontario.; DIVISION, Minerals. *Vermiculite in the Stanleyville Area, Lanark County, Eastern Ontario*. Queen's Printer for Ontario, 1989. (Open file report). Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=YwibnQEACAAJ>>.

MANNING, D.A.C. Handbook of clay science (developments in clay science, 1) - edited by f. bergaya, b.k.g. theng & g. lagaly. *European Journal of Soil Science*, Wiley, v. 58, n. 2, p. 518–519, apr 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00898_4.x>.

MARCOS, C.; RODRÍGUEZ, I. Expansion behaviour of commercial vermiculites at 1000 °c. *Applied Clay Science*, Elsevier BV, v. 48, n. 3, p. 492–498, apr 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.02.012>>.

MARCOS, Celia; RODRÍGUEZ, Irene. Exfoliation of vermiculites with chemical treatment using hydrogen peroxide and thermal treatment using microwaves. *Applied Clay Science*, Elsevier BV, v. 87, p. 219–227, jan 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.008>>.

MARINSHAW. *Mineral Product Industry: Vermiculite Processing*. North Carolina, 1995.

MCLELLAN, B.C.; CORDER, G.D.; GIURCO, D.; GREEN, S. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – review and analysis of current approaches. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier BV, v. 17, n. 16, p. 1414–1425, nov 2009.

MELO, Victor F. M. B.; D'ASSUNÇÃO, Adaildo G. Jr.; NETO, Alfredo Gomes; FREIRE, R. C. S.; FONTGALLAND, Glauco. The new configuration of measure pcb electric permittivity using the ring resonator. In: IMEKO WORLD CONGRESS FUNDAMENTAL AND APPLIED METROLOGY. Lisbon, Portugal, 2009. p. 678–681.

MEREDITH, Roger. *Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating*. IET, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/pbpo025e>>.

METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. *Industrial Microwave Heating*. IET, 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/pbpo004e>>.

MYSORE, D; VIRARAGHAVAN, T; JIN, Y. Treatment of oily waters using vermiculite. *Water Research*, Elsevier BV, v. 39, n. 12, p. 2643–2653, jul 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.034>>.

NATION, United. *World population prospects: The 2012 Revision*. Stanford, California, 2013.

NICOLSON, A. M.; ROSS, G. F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 4, p. 377–382, nov 1970. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tim.1970.4313932>>.

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier BV, v. 18, n. 3, p. 266–274, feb 2010.

OBUT, A.; GIRGIN, İ. Hydrogen peroxide exfoliation of vermiculite and phlogopite. *Minerals Engineering*, Elsevier BV, v. 15, n. 9, p. 683–687, sep 2002.

OBUT, Abdullah; GIRGIN, Ismail; YÖRÜKOĞLU, Abdülkerim. Microwave exfoliation of vermiculite and phlogopite. *Clays and Clay Minerals*, Clay Minerals Society, v. 51, n. 4, p. 452–456, aug 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1346/ccmn.2003.0510412>>.

PAIS, Marília F. M. Gomes Paloma S. M.; CORONEL, Daniel A. Análise da competitividade das exportações brasileiras de minério de ferro, de 2000 a 2008. *Revista de Administração Mackenzie*, v. 13, n. 4, p. 121–145, jul. 2012.

PETERSAN, Paul J.; ANLAGE, Steven M. Measurement of resonant frequency and quality factor of microwave resonators: Comparison of methods. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, v. 84, n. 6, p. 3392–3402, sep 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.368498>>.

RAGAN, G. L. *Microwave Transmission Circuits*. New York, USA: Dover Publications, Inc., 1965. 653-655 p.

RASHAD, Alaa M. Vermiculite as a construction material – a short guide for civil engineer. *Construction and Building Materials*, Elsevier BV, v. 125, p. 53–62, oct 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>>.

RASHIDIAN, Atabak; ALIGODARZ, Mohammadreza; KLYMYSHYN, David. Dielectric characterization of materials using a modified microstrip ring resonator technique. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 4, p. 1392–1399, aug 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tdei.2012.6260016>>.

REEVES, I. Sims G. M.; CRIPPS, J. C. *Clay materials used in construction*. London: Geological Society of London, 2006. v. 21.

REIS, E. *Vermiculita no Brasil: Situação Atual*. [S.l.], 2002.

SCHNEIDER, M. V. Dielectric loss in integrated microwave circuits. *Bell System Technical Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 48, n. 7, p. 2325–2332, sep 1969. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01175.x>>.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. *Microeletrônica*. [S.l.]: Pearson.

STRAND, P. R.; STEWART, O. F. Vermiculite: Industrial rocks and minerals. In: *Society of Mining Engineers*. [S.l.: s.n.], 1983.

SVACINA, J. Analysis of multilayer microstrip lines by a conformal mapping method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 40, n. 4, p. 769–772, apr 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/22.127530>>.

UGARTE, J. F. d. O.; FRANÇA, S. C. A. *Rochas & Minerias Industriais: Usos e Especificações*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 677-698 p.

UNESP. *Vermiculita*. 2018. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/flossilicatos/vermiculita.html>>.

WADA, T.; OSAKA. *Method for the Expansion of Vermiculite*. Google Patents, 1973. US Patent Application 41/61560. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US3758415A/en>>.

WEIR, W.B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. *Proceedings of the IEEE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 1, p. 33–36, 1974. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/proc.1974.9382>>.

ZACARIAS, João R. A.; FORTE, Gustavo G. S.; FONTGALLAND, Glauco; CARVALHO, Joabson N.; IDALMIR, S. Q. Thermal analysis of vermiculite using microwave heating. In: *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/i2mtc.2018.8409869>>.