Universidade do Vale do Paraíba Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Programa de Mestrado Profissional em Processamento de Materiais

RAFAELA REAL PASSOS

MÉTODOS DE MEDIDAS DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS EM ESPAÇO LIVRE NA BANDA X

São José dos Campos, SP – Brasil 2020

RAFAELA REAL PASSOS

MÉTODOS DE MEDIDAS DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS EM ESPAÇO LIVRE NA BANDA X

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Processamento de Materiais complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Processamentos em Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Valdirene Aparecida da Silva

São José dos Campos, SP – Brasil 2020





TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Passos, Rafaela Real

Métodos de medidas de caracterização eletromagnética de materiais em espaço livre na banda X / Rafaela Real Passos; orientadora, Valdirene Aparecida da Silva. - São José dos Campos, SP, 2020. 1 CD-ROM, 65 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais.

Inclui referências

1. Processamento de Materiais. 2. Medidas Eletromagnéticas de Materiais. 3. Dielétricos. 4. Espaço Livre. 5. Banda X. I. Silva, Valdirene Aparecida da, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais. III. Título.

Eu, Rafaela Real Passos, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 15 de Setembro de 2020.

Autor(a) da Obra

Data da defesa: <u>29 / 06 / 2020</u>





RAFAELA REAL PASSOS

•

"MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS EM ESPAÇO LIVRE NA BANDA X".

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

PROF.ª DR.ª ERIKA PETERSON GONÇALVES
PROF.ª DR.ª VALDIRENE APARECIDA DA SILVA
PROF.ª DR.ª ANDREZA RIBEIRO SIMIONI
PROF.ª DR.ª MIRABEL CERQUEIRA REZENDE - Unifesp

Prof.ª Dr.ª Lúcia Vieira Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 29 de junho de 2020.

Av. Shishima Hifumi, 2911 - 12244-000 São José dos Campos – SP www.univap.br

Dedico este trabalho à Renato Crucello Passos. "Sonho que se sonha só É só um sonho que se sonha só Mas sonho que se sonha junto é realidade" (Raul Seixas)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela presença constante na minha vida, pelo auxílio em minhas escolhas e pelo conforto nas horas difíceis.

Ao meu filho Rafael, luz da minha vida! "Continue a nadar!"

Aos meus pais, Roberto de Castro Real (*in memorian*) e Neusa Ap. Chagas Real, por todo amor e dedicação.

À minha avó Maria Conceição de Castro Real (*in memorian*) e minha tia Rosiléia Real (*in memorian*), que iluminaram a minha vida de bondade e poesia.

Às minhas irmãs Roberta e Renata, por todo amor, carinho e apoio incondicionais.

À minha orientadora Dra. Valdirene Aparecida da Silva, por não desistir de mim, por apoiar em meus momentos críticos, por todo respeito, ensinamento e carinho. Fui abençoada por ter te conhecido!

A Dra. Cynthia Junqueira e Daniela Ronsó por estender a mão nos momentos difíceis.

Aos meus amigos Mário, Júlio, Agnaldo, Andrade, Daniel, Eny, Bete e Maximino, por todo suporte e diversão nesses últimos anos.

Ao Major Sérgio pelo apoio e carinho desde sempre. Obrigada meu amigo.

E por fim, ao Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI/DCTA), por proporcionar apoio Técnico durante as fases deste trabalho.

RESUMO

A técnica de caracterização eletromagnética em espaço livre preconiza a possibilidade de medir propriedades constitutivas sem entrar em contato com o material. Consiste na avaliação de um sinal recebido decorrente de uma transmissão em espaço livre por meio de duas antenas do tipo cornetas e lentes colimadoras de feixe e um analisador de redes vetorial. As características do sinal transmitido são modificadas por um material posicionado entre as antenas transmissora e receptora. Laboratórios de ensaios de caracterização em espaço livre devem ser capazes de garantir o isolamento de interferências nas medições de níveis de potência, reduzir erros nas medidas, assim como, garantir a confiabilidade nas medições e a rastreabilidade dos equipamentos envolvidos nos ensaios. Este trabalho apresenta métodos de caracterização eletromagnética em espaço livre na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz (Banda X), em uma câmara semi-anecóica, buscando desenvolvimento do processo de medições que apresentem repetibilidade e confiabilidade nos resultados. Foram realizadas medidas de permissividade, parâmetros S e medidas com arco NRL utilizando antenas com lentes focais, que permitem ensaios de refletividade em materiais planos além de um estudo das fontes de incertezas em medidas de permissividade com alta confiabilidade.

Palavras-chave: Medidas Eletromagnéticas de Materiais. Dielétricos. Permissividade. Parâmetros S. Espaço Livre. Arco NRL. Banda X.

Methods of eletromagnetic characterization measurements of materials in free space in banda X

ABSTRACT

A technique of electromagnetic characterization in the free space advocates the possibility of measuring the constitutive properties without coming into contact with the material. Consider an evaluation of a received signal resulting from transmission in free space by two horn-like and collimating beam-type antennas and a vector network analyzer. The characteristics of the transmitted signal are modified by a specific material between the transmitting and receiving antennas. In characterization testing laboratories in free space, they must be able to guarantee or isolate interferences in the measurements of power levels and obtain reduction of errors in the measurements, as, for example, in the measurement tests and traceability of the equipment used in the tests. This work presents methods of electromagnetic characterization in free space in the frequency range 8.2 to 12.4 GHz (Band X), in a semi-anechoic chamber. seeking the development of a measurement process that presents repeatability and uses the results. Permittivity measurements, measurements and measurements with NRL arch were performed, using antennas with focal lenses or which allows reflexivity tests on flat materials in addition to a study of sources of uncertainty in permittivity measurements with high rates.

Keywords: Electromagnetic Measurements Materials. Dielectric. Permittivity. S Parameters. Free Space. NRL Arch. Band X.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resposta de um material dielétrico a diferentes frequências
Figura 2: Interação da onda eletromagnética com o material: energia incidente, energia refletida, energia transmitida e energia absorvida
Figura 3: Relação de ondas incidentes e refletidas em um quadripolo23
Figura 4: Diagrama esquemático de sistemas de medidas de ensaios em espaço livre a) em visada direta e b) arco NRL
Figura 5 Diagrama esquemático de um sistema de medidas de ensaios em espaço livre com lentes colimadoras de feixe
Figura 6 Sobreposição das curvas S11 e S22 para obtenção do intervalo de janelamento no domínio do tempo
Figura 7: Parâmetro S ₁₁ domínio do tempo30
Figura 8: Arco NRL clássico
Figura 9: Fluxograma com as principais atividades desenvolvidas neste estudo34
Figura 10: Equipamentos e acessórios utilizados no sistema de medidas de caracterização de materiais em espaço livre
Figura 11: Etapas da calibração: a) Calibração das duas portas do VNA e cabos conectados nas entradas das antenas, b) Padrão de calibração Reflect (Plano terra) e c) Padrão de calibração Line (Vazio)
Figura 12 <i>Sistema</i> de medidas do Laboratório de Medições Eletromagnéticas do IFI/DCTA para caracterização eletromagnética em arco NRL. (a) posicionamento angular da antena tipo corneta R _x e porta amostras (b)
Figura 13: Medidas das permissividades real e imaginaria em função da frequência dos padrões ar e Teflon [@] 40
Figura 14: Valores medidos dos Parâmetros de espalhamento S ₁₁ na banda X das amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz e (d) 11,4-12,4 GHz43
Figura 15: Valores medidos dos Parâmetros de espalhamento S_{21} na banda X das amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz e (d) 11,4-12,4 GHz
Figura 16: Valores medidos das permissividades real e imaginária das amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz
Figura 17: Valores medidos das permeabilidades real e imaginária de amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz e (d) 11,4-12,4 GHz51
Figura 18: Curvas de refletividade para ângulo de incidência de 30° de amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X
Figura 19: Curvas de refletividade para ângulo de incidência de 45°de amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X

Figura 22: Posicionamento angular de 180° entre antenas e posicionamento angular da normal de 0° da superfície do porta amostras em relação à antena conectada a porta 2......65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração de Ferrocarbonila nas amostras de MARE estudadas	.35
Tabela 2 - Relação entre refletividade e a porcentagem da energia absorvida (LEE, 1991)	.53
Tabela 3 - Planilha de cálculo para as fontes de incerteza em medidas de permissividade	.57

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativas	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivos gerais	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Caracterização Eletromagnética	17
2.1.1	Materiais dielétricos	18
2.1.2	Materiais Magnéticos	20
2.1.3	Parâmetros de Espalhamento S	22
2.1.4	Refletividade	25
2.1.5	Sistema de medidas em espaço livre	25
2.1.6	Calibração GRL	27
2.1.7	Incerteza de medição	30
2.1.8	Sistema de medidas com Arco NRL	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Materiais	35
3.2	Caracterização eletromagnética	35
3.2.1	Medidas de caracterização eletromagnética em espaço livre	37
3.2.2	Incerteza de Medição	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Medidas de Calibração	40
4.2	Medidas das Amostras	41
4.2.1	Medidas dos parâmetros S	41
4.2.2	Medidas de permissividade e permeabilidade	47
4.2.3	Medidas de Refletividade	52
4.2.4	Cálculo de incerteza	56
CON	CLUSÕES	59
REFE	CRÊNCIA	60
ANEX	XO A: SISTEMA DE MEDIDAS	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

Quando uma onda eletromagnética interage com a matéria, o resultado dessa interação vai depender das propriedades elétricas e/ou magnéticas dessa matéria e das características da onda, como a faixa de frequências e intensidade. Assim, os métodos de caracterização eletromagnética de materiais, envolvem, fundamentalmente, a avaliação da distribuição de energia, relacionados com a interação da onda eletromagnética com o material (RONSÓ, 2017; SILVA, 2008).

Na maioria dos materiais, as propriedades eletromagnéticas estão relacionadas às suas propriedades físicas e químicas. Todo material possui um conjunto único de características elétricas, que são dependentes de suas propriedades dielétricas. A determinação de características a partir de propriedades dielétricas pode ser aplicada a uma grande gama de materiais (TERESHCHENKO; BUESINK; LEFERINK, 2011).

Medições precisas das propriedades dielétricas dos materiais podem fornecer valiosas informações sobre seu comportamento eletromagnético, para incorporar adequadamente o material em determinadas aplicações, ou monitorar um processo de fabricação para melhoria da qualidade. Uma medição de materiais dielétricos pode fornecer informações de parâmetro crítico de projeto para muitas aplicações eletrônicas, como por exemplo, a perda do isolador de um cabo, a impedância de um substrato ou a frequência de um dielétrico. A informação também é útil para melhorar modelos de ferrita e absorvedores de radiação eletromagnética (KEYSIGHT, 2019; AKHTER; AKHTAR, 2016).

Na área do eletromagnetismo, os ensaios não destrutivos, que têm por finalidade observar as interações do material com o meio ambiente, podem ser realizados com o campo eletromagnético confinado no interior de guias de ondas ou em linhas de transmissão em conjunto com a amostra, ou irradiado, onde placas planas do material são avaliadas sob campos eletromagnéticos no espaço livre (RONSÓ, 2017).

As técnicas de medidas eletromagnéticas em materiais, são definidas de acordo com a faixa de frequências de medição, tamanho da amostra, característica de absorção/transparência entre outras. Entre as técnicas existentes pode-se citar: placas paralelas, sensor coaxial, cavidade ressonante, linha de transmissão e espaço livre (GHODGAONKAR; ALI, 2000). Sendo que, essa última, avalia de forma não destrutiva em uma banda larga de frequências e temperatura, as propriedades que constituem o material sob teste. Tais propriedades determinam a resposta do material exposto a campos eletromagnéticos, pois são extraídas por

algoritmos por meio de medições (GHODGAONKAR; ALI, 2000; GHODGAONKAR; VARADAN; VARADAN, 1989).

Para se ter resultados confiáveis na caracterização de materiais, os laboratórios de ensaios de caracterização em espaço livre devem ser capazes de garantir o isolamento de interferências nas medições de níveis de potência. Da mesma forma, a confiabilidade nas medições e a rastreabilidade dos equipamentos envolvidos nos ensaios são requisitos primordiais para a estabilidade e a repetitividade dos resultados (ROCHA *et al.*, 2013; KEYSIGHT, 2019). Um ensaio é inequívoco quando os mesmos tipos de materiais são medidos sob as mesmas condições de operação, de modo que os resultados não se diferenciam entre si. Uma condição essencial para a confiabilidade de um laboratório é a inserção dos componentes de incerteza relevantes na implementação do método de medição (JORNADA, 2020).

Para a caracterização de materiais em espaço livre, os métodos de medidas, geralmente, requerem procedimentos complicados de calibração, devido à indisponibilidade de informações precisas dos padrões. O procedimento de calibração requer uma placa metálica como material padrão de referência, que é colocada sob o material a ser medido. Se a placa metálica se mover compromete a calibração, pois o procedimento de calibração torna-se sensível à posição do padrão. Também influenciam no processo de calibração as propriedades elétricas do material de referência, como condutividade, rugosidade da superfície, entre outros (AKHTER; AKHTAR, 2016).

Assim, este trabalho busca desenvolver uma metodologia de medidas de caracterização de materiais segura em espaço livre, com procedimentos que apresentem repetibilidade e confiabilidade, e que possa atender as diversas áreas que utilizam da caracterização eletromagnética de materiais.

1.1 Justificativas

Atualmente, o Laboratório de Medições Eletromagnéticas do Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI) realiza ensaios para caracterização de antenas em desenvolvimento para os institutos do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial do Comando da Aeronáutica e empresas privadas dos setores aeronáutico e espacial. O laboratório apoia pesquisas na área de materiais absorvedores, superfícies refletoras e dispositivos de referência para medições de seção reta de radar. Em decorrência dos avanços tecnológicos nos setores civis e militares, tais como, os setores de sistemas de comunicação, de defesa e segurança empregadas em aeronaves, navios, comunicação entre satélites e atividades de pesquisa e desenvolvimento, instituições públicas e privadas buscam laboratórios de caracterização de materiais.

Pesquisadores têm ampliado os estudos na pesquisa e tecnologia de novos materiais que possuam características de absorção ou blindagem eletromagnética, proporcionando assim avanços significativos nas áreas de eletroeletrônica, nuclear, espacial, aeronáutica e naval.

Assim, este trabalho foi impulsionado pela necessidade de realizar, qualificar e caracterizar materiais com características dielétricas, por meio de ensaios confiáveis, rastreáveis ao sistema metrológico nacional, visto que há uma carência de laboratórios, demanda não atendida, para a prestação de serviços na área de caracterização eletromagnética de materiais em espaço livre. Este trabalho, busca apresentar metodologia de medidas eletromagnéticas em espaço livre, bem como a validação do método por meio de medidas de incerteza. Com este método, é possível fazer a caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de ondas eletromagnética, materiais de blindagem eletromagnética, materiais transparentes e metamateriais, na faixa de frequências da Banda - X, tornando o Laboratório de Medições Eletromagnéticas do IFI referência nessas caracterizações.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Desenvolver metodologia de medidas eletromagnéticas em espaço livre, na faixa de frequências da banda X, entre 8,2 a 12,4 GHz, para medidas de materiais e a validação do método por meio de medidas de incerteza.

1.2.2 Objetivos específicos

Para este estudo, os objetivos específicos envolvem:

- Medidas dos parâmetros complexos real e imaginário de permeabilidade e permissividade, μ', μ", ε' e ε";
- Medidas dos parâmetros S de transmissão e reflexão, S₂₁ e S₁₁, respectivamente;
- Medidas de refletividade com placa com o uso do arco NRL, e

• Medidas de incerteza, para validação do método.

1.3 Estrutura do trabalho

O conteúdo deste trabalho está estruturado em 6 capítulos. O Capítulo 1 – Introdução, apresenta, de forma concisa, o tema desta dissertação e sua relevância, a justificativa e o objetivo deste trabalho. No Capítulo 2 - Revisão de Literatura, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos que embasam este trabalho para um bom entendimento teórico, como: Materiais Dielétricos e Magnéticos, das técnica de Caracterização Eletromagnética de Materiais, dos parâmetros de Permissividade e Permeabilidade, Parâmetros de Espalhamento, Refletividade, que são parâmetros que caracterizam os materiais e os Método de Caracterização Eletromagnética em Espaço Livre, bem como a Calibração GRL Sistema de Medidas em Espaço Livre e o Sistema de Medidas com Arco NRL. O Capítulo **3 – Metodologia,** apresenta em detalhes a parte experimental envolvidas nas medidas eletromagnéticas, Sistemas de Controle e Aquisição e Metodologia da Medição. No Capítulo 4 - Resultados e Discussões, encontram-se os resultados e discussões dos dados obtidos neste estudo e as correlações necessárias para o entendimento dos resultados encontrados. O Capítulo 5 - Conclusões apresenta as considerações finais, as sugestões para trabalhos futuros e a produção técnicocientífica gerada até o presente momento e, finalmente, Referências – lista toda a bibliografia consultada em ordem alfabética, segundo a ABNT NBR 6023/2010.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O conhecimento da resposta dos materiais a campos eletromagnéticos quando interagem com a onda eletromagnética é fundamental para inúmeros projetos de pesquisas e atividades de desenvolvimento de materiais eletromagnéticos. Muitos pesquisadores e engenheiros exigem parâmetros precisos dos materiais para extrair resultados experimentais e prever o comportamento de seus produtos.

São classificados como materiais eletromagnéticos os absorvedores de ondas eletromagnéticas (MARE), materiais de blindagem eletromagnética (EMI), materiais transparentes e metamateriais. Assim, faz-se necessário um entendimento, de forma geral e concisa, de conceitos básicos relacionados a esses materiais. Deste modo, este capítulo aborda uma revisão bibliográfica das propriedades que envolvem a interação da onda eletromagnética com a matéria, que são estudadas em materiais dielétrico e magnéticos, os parâmetros de espalhamento S e as constantes de permeabilidade e permissividade. Apresenta também, os conceitos das técnicas de medidas eletromagnéticas, objeto deste trabalho.

2.1 Caracterização Eletromagnética

Várias técnicas de caracterização de materiais estão disponíveis na literatura, podendo ser divididas em duas categorias: Métodos Ressonantes e Métodos de Transmissão/Reflexão. No Método Ressonante, é possível obter uma caracterização eletromagnética (EM) muito precisa, porém requer uma fabricação precisa da amostra a ser medida e do ressonador projetado. No Método Transmissão/Reflexão, a medida é feita através de cabos coaxiais, guias de ondas e em espaço livre (COSTA *et al.*, 2017).

Tendo conhecimento das dimensões físicas do material, as medidas da reflexão e/ou de transmissão através de um material, fornecem informações necessárias para caracterizar a permissividade e permeabilidade do material. Previamente calibrados, para que não ocorram erros, o analisador de rede vetorial faz uma varredura em alta frequência e a caracterização é feita em banda larga (COSTA *et al.*, 2017). Um analisador de rede vetorial, consiste de uma fonte de sinal, um receptor e um visor, onde a fonte fornece um sinal em uma faixa de frequências que interage com o material em teste. O receptor é ajustado para detectar a frequência dos sinais refletidos e transmitidos pelo material (KEYSIGHT, 2019; SILVA *et al.*, 2015).

A caracterização da permissividade elétrica ε , da permeabilidade magnética μ e da potência da condutividade elétrica σ do material, são propriedades que determinam a resposta do material em teste aos campos eletromagnéticos (GONÇALVES *et al.*, 2018).

2.1.1 Materiais dielétricos

Um material dielétrico ideal é um material que não contém cargas livres. Possuem cargas dominantes em seus átomos e moléculas, positivas e negativas, com forças atômicas e moleculares que impedem que suas cargas fiquem livres (SILVA *et al.*, 2015). As moléculas dos dielétricos são afetadas pela presença de um campo elétrico, que produz uma força exercida sobre cada partícula carregada, induzindo assim a formação de vários dipolos que se alinham com o campo. Esses dipolos empurram as cargas positivas no sentido do campo e as partículas negativas no sentido inverso, de forma que as partes positivas e negativas de cada molécula se deslocam de suas posições de equilíbrio em sentidos opostos, interagindo com o campo aplicado. Esses materiais possuem a capacidade de armazenar a energia da carga elétrica do campo aplicado (SILVA, 2008; NOHARA, 2003).

Materiais dielétricos desempenham papel fundamental, com uma ampla gama de aplicações da comunicação terrestre e via satélite, incluindo *software* de rádio, GPS (*Global Positioning System*), entre outros (SEBASTIAN, 2008). Os materiais dielétricos são caracterizados por uma baixa condutividade e capacidade de polarização em um campo elétrico aplicado. Os materiais dielétricos são frequentemente incorporados e distribuídos em uma variedade de produtos, por exemplo capacitores e baterias, especificamente por causa de suas propriedades dielétricas (HILL, 1981).

As propriedades dielétricas dependem da frequência, temperatura e das características dos materiais (BAKER-JARVIS; JANEZIC; DEGROOT, 2010). A constante dielétrica é uma propriedade intrínseca dos meios e está relacionada com a resposta dos materiais aos campos elétricos. A interação fundamental dos campos com a matéria se manifesta mediante a polarização, induzida ou permanente, dos momentos de dipolos atômicos ou moleculares de um corpo quando submetido a um campo externo (CALLISTER JUNIOR, 2007).

Existem basicamente três mecanismos de polarização: eletrônica, presente em todos os átomos; iônica, que ocorre só em materiais iônicos, e dipolar, que ocorre só em substâncias que possuem momentos de dipolo permanentes (CALLISTER JUNIOR, 2007).



Figura 1: Resposta de um material dielétrico a diferentes frequências.

Fonte: Adaptado de Keysight (2016).

O objetivo das medições dielétricas é verificar a permissividade relativa de uma amostra em teste por um período de orientação do campo elétrico e em determinada frequência. O que constitui o parâmetro em um material dielétrico, é a permissividade, ε. Este é um parâmetro complexo e que geralmente depende da frequência e temperatura (BAKER-JARVIS JANEZIC; DEGROOT, 2010)

A permissividade elétrica de um material (ϵ) está ligada ao processo de armazenamento e dissipação da energia de um campo elétrico a que esse material é submetido. A permissividade é um fenômeno eletromagnético, cuja descoberta é atribuída a Faraday quando ele estava experimentando capacitores. É um fato bem conhecido que condutores permitem que as cargas se movimentem livremente quando um campo elétrico externo é aplicado. Por outro lado, os isoladores não permitem que as cargas se movimentem livremente que as cargas se movimentem livremente, mesmo na presença de tais (SOTODEH, 2014; SILVA, 2008).

A permissividade elétrica ε é a quantidade física da interação do campo elétrico com um dado material. A razão da permissividade característica (ε) do material pela permissividade do vácuo (ε_0) resulta na permissividade relativa (ε_r), Equação 1, que possui natureza complexa com partes real (ε_r ') e imaginária (ε_r ''):

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \tag{1}$$

Onde $\varepsilon_0 = 8,854 \text{ x } 10^{-12} \text{ F/m}$, ε_r ' a quantidade de energia armazenada e ε_r '' está relacionada a quantidade de energia dissipada no meio.

A parte real da permissividade, ε_r ', é chamada de constante dielétrica, que é definida como a energia elétrica armazenada dentro de um determinado material. A parte imaginária, ε_r " é conhecida como fator de perda e, como o próprio nome indica, é definida como a perda ou dissipação de energia elétrica no meio. Relação entre a parte imaginária e a parte real da permissividade é representada na forma complexa tan δ : tan $\delta = \varepsilon_r$ " / ε_r '. A dissipação de energia elétrica é frequentemente expressa como tangente perda, que é a proporção de energia elétrica armazenada perdida em um meio (COSTA *et al.*, 2017; SOTODEH, 2014; SILVA, 2008; SEBASTIAN, 2008)

Um determinado material ou meio pode mudar a resposta da permissividade, dependendo da frequência do campo aplicado, da temperatura ambiente e umidade. A extensão em que esses fatores afetam a permissividade depende inteiramente das propriedades inerentes do material e não é facilmente caracterizada de uma forma geral, e sua influência é verificada em condições de laboratório (SOTODEH, 2014; COSTA *et al.*, 2017; BAKER-JARVIS; JANEZIC; DEGROOT, 2010).

2.1.2 Materiais Magnéticos

Materiais eletromagnéticos possuem características quanto à permissividade elétrica e a permeabilidade magnética, assim como nos materiais dielétricos, os materiais magnéticos têm a capacidade de interagir com os campos elétricos e/ou magnéticos da onda eletromagnética (LETERTRE; POULIGUEN; SABOUROUX, 2019).

Os materiais magnéticos são classificados de acordo com sua susceptibilidade e permeabilidade, sendo: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos. Nos materiais diamagnéticos a magnetização ocorre de forma oposta ao campo magnético aplicado e, nos materiais paramagnéticos o sentido de magnetização ocorre no mesmo sentido do campo magnético aplicado. De um modo geral, em ambos os casos, os efeitos são fracos. Os materiais ferromagnéticos apresentam comportamento contrário e apresentam efeitos de magnetização significativos (SILVA, 2008).

Todos os materiais ferro e ferrimagnéticos exibem o denominado efeito de histerese, uma relação não-linear entre um campo magnético aplicado (H) e a indução magnética (*B*) do material, apresentando, consequentemente, propriedades associadas a esse efeito, como permeabilidade magnética, saturação de magnetização e forças coercitivas (CABRAL, 2005; LIMA, 2007; RIBEIRO, 2006).

A permeabilidade magnética de um material (μ) está ligada ao processo de armazenamento e dissipação da energia de um campo magnético a que esse material é submetido. A permeabilidade magnética é uma grandeza complexa, ou seja, apresenta uma parte real e uma parte imaginária. A parte real (μ ') está ligada ao processo de armazenamento e a parte imaginária (μ '') está associada a dissipação de energia, equação

Medidas dos parâmetros eletromagnéticos de materiais magnéticos é crucial para avaliar o seu desempenho. A compreensão precisa dos parâmetros eletromagnéticos, como a permissividade e permeabilidade complexas, são importantes pois permitem entender o comportamento da onda eletromagnética quando esta se propaga no material (ZHOU *et al.*, 2017).A permeabilidade magnética descreve a interação do material a um campo magnético e de maneira análoga à permissividade relativa e a razão da permeabilidade característica (μ) pela permeabilidade do vácuo (μ_0) resulta na permeabilidade relativa (μ_r) do material:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r'' \tag{2}$$

Onde $\mu_0 = 4\pi \ge 10^{-7}$ H/m, μ'_r é a componente real da permeabilidade relativa e está relacionada a quantidade de energia armazenada no material e a componente imaginária da permeabilidade relativa μ''_r está relacionada a quantidade de energia dissipada. no material.

Permeabilidade magnética está ligada ao momento magnético dos átomos constituintes do material, devido ao momento de *spin* do elétron em termos da sua velocidade de rotação em torno do seu próprio eixo e à rotação dos elétrons na eletrosfera em torno do núcleo dos átomos presentes no material. O fenômeno do armazenamento da energia da onda eletromagnética quando a onda interage com o material ocorre com a aceleração da rotação do elétron sobre seu próprio eixo e o consequente aumento do momento de *spin*. A dissipação dessa energia ocorre quando o elétron, ao atingir grandes velocidades rotacionais, inverte seu *spin* (CALLISTER JUNIOR, 2008; SILVA, 2008).

2.1.3 Parâmetros de Espalhamento S

Os parâmetros de espalhamento, também chamados de parâmetros S, representam os sinais refletidos e transmitidos pelo material quando da sua caracterização eletromagnética (BATISTA, 2017)

Os parâmetros de espalhamento S foram desenvolvidos para facilitar a caracterização das redes elétricas em alta frequência, pois o comprimento de onda do sinal é comparável ou menor que o comprimento dos condutores num circuito elétrico (ANDERSON, 1967). Em analogia aos circuitos elétricos, os parâmetros de espalhamento S avaliam a distribuição da energia da onda eletromagnética e sua interação com o material. A caracterização de materiais eletromagnéticos é fundamentada por meio de parâmetros que envolvem relações de medidas da onda eletromagnética incidente, refletida, absorvida e transmitida no material (COSTA *et al.,* 2017; ANDERSON, 1967). A Figura 2 representa, esquematicamente, esse comportamento.



Figura 2: Interação da onda eletromagnética com o material: energia incidente, energia refletida, energia transmitida e energia absorvida

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2009)

Os parâmetros de espalhamento S são usados para caracterizar dispositivos de duas ou mais portas que trabalham em altas frequências. Também relacionam as amplitudes das ondas que incidem e refletem nas portas do dispositivo sob teste (BATISTA, 2017). Tais parâmetros foram primeiramente mencionados no artigo (ANDERSON, 1967) e são demonstrados pela matriz:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$
(3)

Esses parâmetros são definidos com uma matriz matemática que contém informações sobre as propriedades de espalhamento das ondas eletromagnéticas. A partir desta matriz, são relacionas as ondas de sinais incidentes e refletidas nas portas dos dispositivos, para a matriz de um quadripolo. A Figura 3 mostra um quadripolo com a representação dessas ondas (GONÇALVES, 2012)



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2012).

onde:

- ai é a amplitude da onda de sinal incidente na porta 1;

- b1 é a amplitude da onda de sinal refletida na porta 1;

- a2 é a amplitude da onda de sinal incidente na porta 2;

- b2 é a amplitude da onda de sinal refletida na porta 1;

O funcionamento entre seus terminais é descrito pelas Equações (4) e (5):

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \tag{4}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \tag{5}$$

Escrevendo as Equações (4) e (5) na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$
(6)

Sendo os parâmetros de espalhamento definidos como:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2 = 0} \tag{7}$$

$$s_{12} = \frac{b_2}{a_1}\Big|_{a_1 = 0} \tag{8}$$

$$s_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2 = 0} \tag{9}$$

$$s_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1 = 0} \tag{10}$$

- S₁₁ é o coeficiente de reflexão medido na porta 1, com a porta 2 terminada em uma carga casada;
- S₂₁ é o coeficiente de transmissão da porta 1 para a porta 2, com a porta 2 terminada em uma carga casada;
- S₁₂ é o coeficiente de transmissão da porta 2 para a porta 1, com a porta 1 terminada em uma carga casada;
- S₂₂ é o coeficiente de reflexão medido na porta 2, com a porta 1 terminada em uma carga casada.

Quando uma baixa transmissão (S_{12} e S_{21}) está associada à elevada reflexão (S_{11} e S_{22}), normalmente, significa que o material apresenta elevada condutividade elétrica, contribuindo para uma maior reflexão da onda na primeira superfície do material. Se uma baixa transmissão da onda estiver associada à uma reduzida reflexão, o material pode absorver parte ou quase que totalmente a energia da onda eletromagnética incidente (SILVA *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2017). As medidas dos parâmetros de espalhamento realizadas nesta dissertação se basearam na determinação do coeficiente de reflexão (S_{11} ou S_{22}) e do coeficiente de transmissão (S_{21} ou S_{12}).

2.1.4 Refletividade

Quando uma onda eletromagnética incide em um material, parte dessa energia é refletida e parte é transmitida através do material. Uma vez que os métodos de caracterização eletromagnética fornecem medidas relativas a uma referência metálica, o material em teste é avaliado nas mesmas condições (PINTO; REZENDE, 2012).

A partir dos valores de permissividade complexa, o analisador de redes vetorial fornece os valores de atenuação da onda eletromagnética em decibéis (dB). Para a determinação da refletividade em função da frequência em giga-hertz, a medida é feita colocando-se uma placa metálica atrás do material sob teste. A refletividade (R) pode ser avaliada como a redução da intensidade dos campos elétricos ou magnéticos pela interação da onda com o material absorvedor. A refletividade com placa pode ser definida pela Equação 11 (SILVA, 2008):

$$R(dB) = \log_{10} \frac{E_r}{E_i} \tag{11}$$

onde: R é a refletividade em decibéis, Er é a energia refletida e Ei é a energia incidente.

Avaliar a distribuição da energia da onda eletromagnética e sua interação com o material, fundamenta os métodos de caracterização. A refletividade de um material a um sinal emitido por um sistema de radares pode ser função das propriedades desse material, como também da sua geometria. Essa geometria pode apresentar um ângulo de incidência ao sinal, favorecendo um espalhamento da onda eletromagnética em direções não detectáveis pelo radar emissor (LEE, 1991; NOHARA, 2003; SOLEIMANI *et al.*, 2012; SILVA, 2008).

2.1.5 Sistema de medidas em espaço livre

As técnicas de caracterização em espaço livre oferecem a capacidade de medir amostras planares em uma ampla faixa de frequências, podendo controlar a polarização da onda eletromagnética incidente com precisão através da polarização das antenas usadas no equipamento, tornando a técnica útil para investigar propriedades eletromagnéticas dos materiais (RILEY; KOUDELA; NARAYANAN, 2019).

Apesar da importância da utilização dessas medidas na caracterização de materiais, suas utilizações são limitadas, devido à falta de metodologia padronizada, ao alto custo envolvido e à dificuldade na interpretação das medidas (NOHARA, et al. 2002). Entre essas várias técnicas de caracterização de materiais, o método de espaço livre merece atenção, pois permite a avaliação não destrutiva de materiais em uma ampla faixa de frequências e temperaturas. (LUUKKONEN; MASLOVSKI; TRETYAKOV, 2011; ROCHA *et al.*, 2013).

As medidas com o uso de micro-ondas em espaço livre possibilitam a caracterização de amostras planas de materiais quando estas estão posicionadas entre uma fonte transmissora e outa receptora, sendo uma técnica não-destrutiva. Na literatura são descritos diversos sistema de medidas desenvolvidos para o alcance deste objetivo (JOHNK; ONDREJKA, 1997). Um dos tipos de configuração é aquele onde se utilizam antenas tipo corneta preferencialmente com lente focal, um analisador de redes vetorial e um dispositivo que permita a mobilidade de pelo menos uma das antenas (KEYSIGHT, 2019). Na Figura 4 é mostrado um desenho esquemático deste tipo de *sistema de medidas* de ensaios.





Fonte: Adaptado de Keysight (2016).

O método do espaço livre envolve erros sistemáticos, tais como perda de retorno na entrada das antenas e de propagação das ondas até o plano de referência definido pelas duas

superfícies da amostra (JOHNK; ONDREJKA, 1997; COSTA *et al.*, 2017). Para que os resultados sejam qualificados, as amostras devem ser posicionadas paralelamente ao plano de abertura das antenas. Curvaturas, imperfeições, rugosidades, tanto na superfície metálica usada como plano de terra, quanto no material sob ensaio podem causar distorções significativas nos resultados de permissividade e permeabilidade, sendo a parte imaginária dos valores grandemente afetados. Essa grande sensibilidade da metodologia é bem descrita na literatura e, aliada à problemas de reflexões múltiplas no processo de medição, justifica a colocação da mesa de medição dentro de ambiente semi-anecóica ou do uso de antenas colimadoras de feixe (LUUKKONEN; MASLOVSKI; TRETYAKOV, 2011; ROCHA *et al.*, 2013; JOHNK; ONDREJKA, 1997; COSTA *et al.*, 2017).

Medições de permeabilidade e permeabilidade são reconsultados em inúmeras aplicações para uma grande variedade de materiais. O procedimento de Nicolson-Ross-Weir (NRW) é o método mais comumente utilizado para avaliar os parâmetros complexos permissividade elétrica e permeabilidade magnética em um dado material citar ref. Seus valores são calculados a partir de medidas dos parâmetros S, assumindo que o material é homogêneo e sem perdas. Os parâmetros S (S₁₁, S₂₁, S₁₂ e S₂₂) são utilizados para derivar os coeficientes de reflexão e transmissão do material (JUNQUEIRA; PEROTONI; LIMA, 2014).

2.1.6 Calibração GRL

Erros no sistema de medição devidos ao espalhamento da incidência do campo na amostra e o efeito do acoplamento entre as antenas são minimizados utilizando técnicas de calibração no domínio do tempo.

Os padrões de calibração de espaço livre podem apresentar problemas, pois não têm conexão, ou seja, são "sem conector". Uma calibração pode ser tão simples quanto uma resposta ou tão complexa quanto uma calibração completa de duas portas (KEYSIGHT, 2019.). A calibração GRL, *Gated Reflect Line*, é uma técnica de medidas no espaço livre, desenvolvida pela Keysight. A técnica permite caracterizar materiais dielétricos ou magnéticos com o apoio de um analisador de redes vetorial equipado com *hardware* e *software* de análise temporal e

associado a um *sistema de medidas* onde o material sob análise é inserido entre duas antenas conforme Figura 5 (KEYSIGHT, 2019).





Fonte: Adaptado de KEYSIGHT (2019)

Para efetuar as medidas em espaço livre, a calibração utilizada foi a técnica de calibração GRL (*Gated Reflect Line*). Esse tipo de calibração está disponível em um *software* de medida de materiais Agilent 85071E, do analisador de redes vetorial (VNA) que é utilizado nas medidas.

O primeiro passo da calibração em espaço livre é determinar a localização do portaamostras no domínio do tempo. A fim de se eliminar o efeito de difração das bordas do portamostras faz-se uma supressão (janelamento) que garante apenas a energia em visada direta. Os sinais refletidos não desejados são filtrados e esta operação é chamada de *Gating*, correspondente à palavra '*Gated*' em GRL (*Gated Refletct Line*).

A largura de janelamento, Figura 6, é obtida sobrepondo a curva de S_{11} e S_{22} por meio de placa metálica de espessura conhecida e com superfície plana colocada no porta-amostras. Os parâmetros S são medidos e armazenados pelo *software*. Esta etapa corresponde ao "*Reflect*" em GRL. Em seguida, a placa metálica é removida e as mesmas medições são realizadas com o porta-amostra vazio que corresponde o "*Line*" em GRL.



Figura 6 Sobreposição das curvas S_{11} e S_{22} para obtenção do intervalo de janelamento no domínio do tempo.

Fonte: Elaborado pela Autora.

A Figura 7 mostra no domínio do tempo o parâmetro S_{11} medido com o sistema de medidas vazio. Observa- se que é possível identificar as várias respostas, tais como reflexões associadas à antena transmissora, seguida das do ar e das reflexões associadas com a antena receptora aliado às reflexões da estrutura do sistema de medidas.



Figura 7: Parâmetro S₁₁ domínio do tempo

Fonte: Adaptado de KEYSIGHT (2019)

2.1.7 Incerteza de medição

Como a caracterização de materiais é baseada em medições, é necessário que essas sejam analisadas estatisticamente, para se conhecer a faixa de variabilidade dos resultados. O cálculo de incertezas é atribuição de cada laboratório de medidas, pois deve acompanhar e validar seus resultados.

Esses resultados deverão ser avaliados aplicando-se uma metodologia internacional. O documento normativo mais importante é o ISO/IEC Guide 98-3:2008 – *Guide to the Expression of* Uncertainty in Measurement, também conhecido como ISO GUM (GUIMARÃES, 2008). Sua versão traduzida contendo as atualizações mais recentes sobre o tema é editada pelo INMETRO (ASSOCIAÇÃO..., 2003).

O método GUM é baseado na aproximação linear da função de medição por meio da série de Taylor em primeira ordem, onde as derivadas parciais são consideradas constantes.

Há dois tipos de incerteza: a incerteza do Tipo A, que corresponde ao cálculo estatístico de repetidas medições da grandeza de entrada x_i, determinada pela Equação (12):

$$u(\overline{x_i}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \tag{12}$$

Onde $s(x_i)$ é o desvio-padrão dos valores individuais do conjunto de observações, e n é o número de observações repetidas. O desvio padrão experimental da amostra é determinada utilizando a equação (13):

$$s(x_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \frac{(x_{i,k} - \overline{x}_i)^2}{n-1}}$$
(13)

Onde $x_{i,k}$ é a k-ésima medida da grandeza e x_i o número de medidas tomadas.

E o segundo tipo é denominada incerteza Tipo B, baseada em julgamentos científicos obtidos a partir de:

- Instrumento de medidas ou padrões utilizados: certificados de calibração;
- Condições ambientais: temperatura, humidade, pressão;
- Operador: experiência, paralaxe, respeito ao warm-up do instrumento;
- Etc.

Independente da classificação, a incerteza é modelada pelo tipo de distribuição de probabilidade, utilizada para apresentar quais valores uma variável aleatória pode assumir associada à probabilidade de sua ocorrência.

Quando uma grandeza y depende por meio de uma função de n outras grandezas x_1 , x_2 , ..., x_n , cada medida com uma determinada incerteza-padrão, a incerteza global, designada por incerteza-padrão combinada $u_c(y)$, é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 u_{xi}^2 + 2\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\partial F}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$
(14)

Onde: $\partial F / \partial x_i$ - coeficiente de sensibilidade

 $u(\boldsymbol{x}_i)$ - a incerteza padrão associada à estimativa \boldsymbol{x}_i

 $u(x_i, x_j)$ - a covariância estimada.

2.1.8 Sistema de medidas com Arco NRL

O Laboratório de Pesquisa Naval dos Estados Unidos da América, Naval Research Laboratory, na década de 50, desenvolveu um método de ensaios denominado NRL, sistema de medidas no espaço livre para ensaios de materiais absorvedores de micro-ondas. Este método permite a caracterização de materiais com diferentes ângulos do sinal incidente (NOHARA, 2003; KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993).

Originalmente, o *sistema de medidas* foi elaborado com duas antenas de banda larga (cornetas padrão), fixas a um suporte em formato de arco de dimensões tal que fosse guardada a condição de campo distante nas bandas de frequência de ensaios. Numa distância constante das antenas de recepção e transmissão é posicionada a amostra sob ensaio apoiada sobre um plano de terra refletor (KNOTT, 1985). Conforme a Figura 5, o material a ser testado é posicionado no centro do arco, um gerador de sinais, ligado à uma antena transmissora, emite o sinal que atinge a amostra e o sinal refletido é captado por uma antena receptora, transmitindo-o para um detector e um amplificador (NOHARA, 2003).

O raio do arco NRL é dependente da faixa de frequências de caracterização, pois devese obedecer às condições de campo distante, isto é, deve-se garantir a incidência de uma frente de ondas planas no material em estudo. Quanto menor a frequência, maior deve ser o raio do arco, para atender as condições de campo distante (NOHARA *et al.*, 2002). A técnica NRL consiste em uma medida estática, onde o painel que está sendo caracterizado permanece fixo em uma posição, enquanto as ondas incidem na superfície de referência e em seguida são refletidas e medidas na antena receptora. Após a caracterização do painel refletor, que é a referência, este é substituído pelo material a ser medido, posicionando-o exatamente no mesmo local do painel de referência. Em seguida, sobre este painel, a radiação eletromagnética é novamente emitida pela antena transmissora e o sinal refletido é medido. O posicionamento do painel é feito em um suporte situado a uma distância pré-fixada, atendendo à condição de campo distante (SILVA *et al.*, 2009), das antenas de transmissão e recepção, apresentado na Figura 5.

O aparato utilizado nessas medidas consiste, basicamente, de uma estrutura em madeira na forma de arco, que permite fixar um par de antenas tipo corneta piramidal em uma variedade de ângulos, ao longo dessa estrutura. A estrutura deve ser de madeira compensada para evitar reflexões indesejadas. A amostra em estudo é posicionada sobre um pequeno pedestal no centro da curvatura do arco, obedecendo a condição de campo distante e eliminando o efeito de acoplamento indutivo entre a antena transmissora e o corpo de prova (REZENDE *et al.*, 2003) (REZENDE *et al.*, 1999).

A estrutura do arco é projetada de maneira que permite que a antena esteja apontada para o centro do corpo-de-prova em teste, sem levar em consideração de onde essa estrutura seja posicionada. Entre as antenas transmissora e receptora deve ser colocado um material absorvedor de micro-ondas de características conhecidas, assim, é possível reduzir as interferências devido aos lóbulos laterais da radiação (REZENDE et al., 1999; CURRIE, 1989). O material em teste é colocado no centro geométrico do arco. A Figura 5 mostra como é constituído um arco clássico.



Fonte: Adaptado de Rezende et al. (2003)

3 METODOLOGIA

Medidas eletromagnéticas em espaço livre preconizam a possibilidade da caracterização de amostras planas de materiais quando estão posicionados entre uma fonte transmissora e outra receptora. Este trabalho foi realizado seguindo uma série de atividades de medidas para caracterização de materiais, que envolveram um material padrão (Teflon®) e materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), que tem por finalidade a validação das técnicas de medidas de caracterização eletromagnética.

A Figura 9 apresenta de maneira simplificada, um fluxograma com as principais etapas envolvidas neste estudo.

Figura 9: Fluxograma com as principais atividades desenvolvidas neste estudo.



3.1 Materiais

Conforme Junqueira, Perotoni e Lima (2014) a amostra deve apresentar uma dimensão que corresponde a 2,5 vezes o diâmetro da área focal das antenas. A diminuição da dimensão das amostras é dependente da dimensão da área focal das antenas instaladas no *sistema de medidas*. Atenção deve ser dada à obediência de colocação da amostra na distância focal das antenas.

Os materiais utilizados nesse estudo são:

- Material refletor: placa de alumínio nas dimensões de 25 cm x 25 cm com 3 mm de espessura.
- Padrão: placas de Teflon@ 25 cm x 25 cm com 1, 3, 5, 7 e 12 mm de espessura;
- Mantas absorvedoras: mantas absorvedoras de 25 cm x 25 cm com espessura de 5 mm aditada com ferrocarbonila em concentrações de 20 a 70%, variando em 5%, Tabela 1. As mantas foram confeccionadas em matriz elastoméricas de Borracha de Butadieno Estireno (SBR), aditadas com ferrocarbonila como centro absorvedor e cedidas pela empresa KBF CHEM Industria Comércio e Representação Ltda.

Amostra	mostra Concentração Amostra		
	(% em massa)		(% em massa)
Α	20	G	50
В	25	Н	55
С	30	Ι	60
D	35	J	65
Ε	40	L	70
F	45		

Tabela 1 - Concentração de Ferrocarbonila nas amostras de MARE estudadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Caracterização eletromagnética

A câmara semi-anecoica do IFI/DCTA foi projetada para operar como laboratório de ensaios para caracterização de materiais, Figura 7.

Para a execução deste trabalho, foram utilizadas medidas eletromagnéticas em espaço livre, na faixa de frequências da banda-X, 8,2 a 12,4 GHz.

Os equipamentos e acessórios utilizados nas medidas em espaço livre e em arco NRL encontram-se listados a seguir:

- Câmara semi-anecoica: câmara de teste projetada para reduzir energias eletromagnéticas indesejadas. É constituída de blindagem metálica e revestida internamente com materiais absorvedores de radiação eletromagnética nas paredes e teto.
- Analisador de redes vetorial VNA (*Vetorial Network Analyser*), modelo PNA-L, fabricante Keysight, 9kHz-13,5GHz: realiza medições dos parâmetros de espalhamento na faixa de frequências de operação;
- Cabos e conectores de baixas perdas, modeo Sucotest, fabricante HUBER+SUHNER: apresentam baixa atenuação, faixa de operação DC-12,5 GHz
- Antenas do tipo corneta piramidal com lentes colimadoras de feixe, 8,2-12,4 GHz, modelo RA-4540-10, fabricante Rozendal: antenas com polarizações horizontal e vertical com lentes colimadoras de feixe eletromagnético;
- Software comercial para cálculo de permissividade e permeabilidade 85071E, fabricante Keysight: realiza a análise do sinal recebido e comparando com o sinal transmitido pode indicar as características eletromagnéticas do material posicionado na linha de transmissão;
- 6. Módulo de calibração eletrônico ECAL, modelo N4691B, fabricante Keysight: instrumento que realiza calibração eletrônica dos cabos e conectores;

Figura 10: Equipamentos e acessórios utilizados no sistema de medidas de caracterização de materiais em espaço livre.



Fonte: Elaborado pela Autora.

3.2.1 Medidas de caracterização eletromagnética em espaço livre

A técnica de caracterização eletromagnética de materiais em espaço livre se aproxima das condições reais encontradas nos ambientes de operação da amostra.

Para a realização de medidas em espaço livre é necessário a realização de duas calibrações distintas. A primeira, conforme a Figura 11(a), inicia-se realizando a calibração do *sistema de medidas* de medidas (VNA, cabos e conectores) até a entrada das antenas, utilizando um equipamento chamado ECAL (módulo de calibração eletrônico). Em seguida, com o *sistema de medidas* já conectado às antenas, define-se o intervalo de janelamento, posicionando as antenas equidistantes ao porta-amostra Figura 11(b). Este deverá conter um padrão de plano terra, ou seja, uma placa metálica de espessura conhecida, preferencialmente com espessura próxima às espessuras das amostras a serem medidas. Logo após realiza-se a sobreposição das curvas de reflexão no domínio do tempo dos parâmetros S_{11} e S_{22} . Geralmente, o segundo pico determina o intervalo de janelamento que se encontra entre os vales, t_1 e t_2 . O *software* solicita a inserção dos valores do janelamento e uma nova medida com o plano terra é realizada. Por fim, o *software* solicita que se retire o plano terra e uma medida a vazio é iniciada, Figura 11(c).

Figura 11: Etapas da calibração: a) Calibração das duas portas do VNA e cabos conectados nas entradas das antenas, b) Padrão de calibração Reflect (Plano terra) e c) Padrão de calibração Line (Vazio)



Fonte: Adaptado de KEYSIGHT (2019).

Com o sistema calibrado, os erros devido às posições das antenas diminuem, o que possibilita uma maior confiabilidade nas medidas em espaço livre. A configuração do *sistema de medidas* não é modificada para medidas de parâmetros S e medidas de permissividade e permeabilidade. Para medidas de refletividade é necessário realizar os posicionamentos angulares da antena transmissora e do porta amostras.

A Figura 12 apresenta esquematicamente, o *sistema de medidas* de medidas onde foram realizadas as medidas de caracterização em arco NRL nas diferentes posições das antenas.

Figura 12 *Sistema* de medidas do Laboratório de Medições Eletromagnéticas do IFI/DCTA para caracterização eletromagnética em arco NRL. (a) posicionamento angular da antena tipo corneta R_x e porta amostras (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

A primeira medida obtida é de um material metálico, denominada de curva de referência que será comparada com as curvas de refletividade medidas nas amostras em teste. A medida de refletividade da amostra deve ser obrigatoriamente realizada com o material sobre a placa metálica (referência), que deve possuir as mesmas dimensões.

3.2.2 Incerteza de Medição

Para simplificar a incerteza, visto que os resultados serão obtidos por meio de valores relativos entre as medições, será realizado a análise da dispersão dos valores de ensaios do sistema de medição, durante o período equivalente na realização das medições. Desta forma, poder-se-á obter uma aproximação dos níveis de estabilidade dos resultados, devido à influência de todas as componentes do sistema no resultado da medição.

Para a estimativa da incerteza de ε'_r devido às incertezas na medição foi utilizada uma análise diferencial dada pela equação:

$$u_{\varepsilon_{r}'}^{2} = u_{est}^{2} + \left(\frac{\partial \varepsilon_{r}'}{\partial G_{rx}}u_{G_{rx}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \varepsilon_{r}'}{\partial G_{tx}}u_{G_{tx}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \varepsilon_{r}'}{\partial VNA}u_{vna}\right)^{2}$$
(15)

Para facilitar o cálculo da estimativa de incerteza de todas as fontes significativas de incerteza, é utilizada uma planilha de cálculo, apresentada em resultados e discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo são apresentados e discutidos neste capítulo em três partes. Inicialmente, é feita a calibração das medidas para validação dos resultados com os padrões. Em seguida, são apresentados os resultados de medidas eletromagnéticas do MARE utilizado, sendo elas, medidas de permissividade e permeabilidade complexas e parâmetros S. E, para finalizar, são apresentados os cálculos de incerteza.

4.1 Medidas de Calibração

Antes de qualquer medida é necessário a realização de calibrações a fim de obter resultados confiáveis. Visando confirmar uma correta calibração, é necessário validar a medida utilizando um material com propriedades constitutivas conhecidas para caracterização. Para tanto, foram escolhidos como padrões o ar e uma placa de Teflon[®], conforme (ROHDE; SCHWARZ, 1999).

Os resultados das medições com porta amostra vazio são os padrões para o conhecimento da calibração. Os valores teóricos da parte real e imaginária da permissividade do ar são, respectivamente, ε '=1 e ε ''=0 e do Teflon[®], ε '=2,1 e ε ''=0 (ROHDE; SCHWARZ, 1999). As Figura 13(a) e 13(b) mostram as medidas das curvas de permissividade real e imaginária em função da frequência dos padrões ar e Teflon[®].



Figura 13: Medidas das permissividades real e imaginaria em função da frequência dos padrões ar e Teflon®

Os valores de permissividade real, ε ', e permissividade imaginária, ε '', do ar apresentam valores de 1 e 0, respectivamente. Esses valores medidos estão de acordo com a literatura em toda a faixa de frequências 8,2 – 12,4 GHz (HECTOR; SCHULTZ, 1936; ROHDE; SCHWARZ, 1999).

Da mesma forma, os resultados apresentados nas medidas de permissividade real, ε ', e permissividade imaginária, ε '', para o Teflon®, estão de acordo com a literatura (ROHDE; SCHWARZ, 1999). As curvas da Figura 11(b) indicam uma variação da permissividade real de 0,6 na faixa de frequências de 12,3 a 12,4 GHz, mantendo-se, praticamente com o mesmo valor em toda a faixa de frequências, 2,0. O valor máximo na variação dos valores da parte imaginária da permissividade foi de 0,22. Essas variações no resultado dos valores medidos podem ser desconsideradas, pois as maiores distorções sempre ocorrerem no início e fim de faixa de frequências, devido ao processo de filtragem no domínio do tempo ocorrer em banda larga, inserindo assim, erros na medida (KEYSIGHT, 2017).

Após análise por comparação de valores, procede-se à medição das amostras.

4.2 Medidas das Amostras

A seguir são apresentados os resultados das medições dos parâmetros S, permissividade real e imaginária e Arco NRL obtidos das amostras de MARE, processadas em matriz elastomérica e aditadas com ferrocarbonila. Nos MARE, a espessura do absorvedor e a concentração dos aditivos influenciam na atenuação da onda eletromagnética (PINTO; REZENDE, 2012). Sabendo-se que a concentração das amostras utilizadas variou de 20 a 70% em massa. Foram utilizadas amostras com dimensão 25 cm x 25 cm e espessuras de 5 mm na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz.

4.2.1 Medidas dos parâmetros S

As medidas dos parâmetros S permitem obter os valores de permissividade elétrica e permeabilidade magnética dos materiais. Para obter tais valores, utilizou-se o método *Nicolson Ross Weir* (NRW), também chamado de Método de Transmissão e Reflexão. Através do método NRW são extraídos os valores de permeabilidade magnética e permissividade elétrica dos coeficientes medidos. Assim, para se obter os valores de permeabilidade e permissividade

dos materiais, o método NRW deve ser utilizado. Este método é aplicado para materiais homogêneos, isotrópicos e dielétricos. (GONÇALVES, 2012).

O parâmetro S_{11} representa o quanto da energia da onda incidente é refletida a partir do material. Quanto mais próximo o valor medido estiver de 0 dB maior é o caráter refletor do material e quanto mais distante o valor medido estiver de 0 dB maior é sua atenuação ou transmissão através do material, ou seja, menor é a energia que retorna à origem a partir do material atingido pela onda incidente.

A Figura 14 apresenta as curvas de medidas dos parâmetros de reflexão, S₁₁. As curvas do parâmetro S₁₁ das amostras A-L apresentadas na Figura 14 (a) são referentes à faixa de frequências de 8,2-10,4 GHz, Figura 14 (b) à faixa de frequências de 10,2-12,4 GHz, Figura 14 (c) à faixa de 10,2-11,4 GHZ e Figura 14 (d) são referentes à faixa de frequências de 11,4 GHz a 12,4 GHz. As curvas dos parâmetros S₁₁ apresentam um comportamento ressonante, com valores que variam entre -5 dB até -30 dB em toda a faixa de frequência, com picos de ressonância que atingem -50 dB. Analisando as curvas, nota-se que o aumento da concentração de ferrocarbonila no MARE, os valores de S₁₁ aumentam, como pode ser observado na curva L, que é referente ao MARE com 70 % de ferrocarbonila. Os resultados mostram que o MARE apresenta um bom comportamento como absorvedor de micro-ondas, pois quanto mais longe da referência, ou seja, 0 dB, menor é o comportamento de reflexão, sugerindo que grande parte da onda eletromagnética que incide é transmitida e/ou absorvida pelo MARE.

Figura 14: Valores medidos dos Parâmetros de espalhamento S_{11} na banda X das amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz e (d) 11,4-12,4 GHz





O parâmetro S_{21} representa a energia transmitida pelo material. Quanto mais próximo da referência estiver o valor de S_{21} medido, maior é a energia transmitida, ou seja, maior a

energia que penetrou no material, irradiada a partir do emissor e que se propagou pelo material e foi transmitida para o receptor (SILVA, 2008).

Os gráficos da Figura 15 apresentam as curvas de medidas dos parâmetros S_{21} . As curvas do parâmetro S_{21} das amostras A-L apresentadas na Figura 15(a), são referentes à faixa de frequências de 8,2-10,4 GHz, Figura 15(b) à faixa de frequências de 10,2-12,4 GHz, Figura 15(c) à faixa de 10,2-11,4GHz e Figura 15(d) são referentes à faixa de frequências de 11,4 GHz a 12,4 GHz. Observa-se pelos gráficos que há uma boa homogeneidade na amostra em toda a faixa de frequência. Os valores de S_{21} , assim como S_{11} , aumentam com o aumento da concentração de ferrocarbonila no MARE. Considerando a curva da amostra L, nota-se que os valores de transmissão variam de -7 dB a -12 dB na faixa de frequência estudada. Esses valores mostram que o MARE estudado apresentam uma boa transmissão da onda eletromagnética incidente.

Figura 15: Valores medidos dos Parâmetros de espalhamento S_{21} na banda X das amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz e (d) 11,4-12,4 GHz









Os parâmetros S_{21} tratam da energia transmitida no material, favorecida pelo casamento de impedâncias entre o espaço livre (ar) e o material. Esses valores apresentam o quanto da energia atravessa todo o material, sendo detectada no lado oposto da incidência da onda. A partir dos valores de S_{21} e dos dados de S_{11} é possível avaliar o quanto da energia eletromagnética é atenuada propriamente no MARE. Correlacionando os resultados de S11 e S21, pode-se sugerir, que o material estudado apresenta um bom comportamento como MARE.

4.2.2 Medidas de permissividade e permeabilidade

Em uma caracterização eletromagnética, os valores de permissividade elétrica e permeabilidade magnética auxiliam no estudo e no entendimento dos mecanismos de perdas da onda eletromagnética no material. Conhecer esses parâmetros, permite um maior estudo de predição no comportamento dos materiais. Para a caracterização de MARE, é possível projetar materiais mais eficientes e eficazes, em faixas de frequências sintonizadas, com a redução de custos e tempo de seu processamento. Estes valores são dependentes dos coeficientes de transmissão e reflexão, S₂₁ e S₁₁, respectivamente, obtidos no analisador de redes vetorial. A faixa de frequências de interesse e a natureza do material são condições importantes na escolha do método de medidas desses parâmetros (SILVA *et al.*, 2015).

Os gráficos da Figura 16 apresentam os valores obtidos nas medidas de permissividade elétrica real, ϵ ', e imaginária, ϵ ''.

Nota-se pelos gráficos da Figura 16 que os valores de permissividade real e imaginária aumentam com o aumento da concentração de ferrocarbonila. Sendo a permissividade uma propriedade extrínseca do material, esse aumento é esperado (SILVA *et al.*, 2009). Observa-se comportamento linear das curvas apresentadas em todas as frequências estudadas, tanto para a permissividade real, ε ', como para a permissividade, imaginária, ε '', com exceção da medida feita entre 11,3 a 12,4 GHz, que apresenta uma elevação de ε '' no final da faixa de frequências.

Figura 16: Valores medidos das permissividades real e imaginária das amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz.







Os gráficos da Figura 17 apresentam os valores obtidos nas medidas de permeabilidades magnéticas real, μ ', e imaginária, μ ''. Observa-se que os valores de permeabilidades real e imaginária se mantiveram constantes, sem quaisquer variações, em toda a faixa de frequências. Os valores obtidos nas medidas de permeabilidades magnética real, μ ', e imaginária, μ '' são, respectivamente, 1 e 0. Esses resultados estão de acordo com as medidas em espaço livre no Método de Reflexão e Transmissão (GONÇALVES, 2012).

Figura 17: Valores medidos das permeabilidades real e imaginária de amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X. (a) 8,2-9,4 GHz, (b) 9,2-10,4 GHz (c) 10,2-11,4 GHz e (d) 11,4-12,4 GHz .





4.2.3 Medidas de Refletividade

Método de medidas em arco NRL permite caracterizar materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) em função dos ângulos de incidência e recepção. O *sistema de medidas* consiste em duas antenas do tipo cornetas padrão posicionadas atendendo a

condição de campo distante e com ângulo de incidência e reflexão normal ao plano refletor (CURRIE, 1989). Para a aquisição dos dados foi utilizado um VNA, cabos e conectores de baixas perdas (Figura 8).

A refletividade é a relação entre a energia eletromagnética refletida e a energia incidente no material, Tabela 2.

Refletividade (dB)	Absorção da radiação incidente (%)			
0	0			
-3	50			
-10	90			
-15	96,9			
-20	99			
-30	99,9			
-40	99,99			

Tabela 2 - Relação entre refletividade e a porcentagem da energia absorvida (LEE, 1991).

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, se a refletividade indicar um nível de -40 dB, o material terá uma eficiência de 99,99% de absorção de campo eletromagnético, na frequência indicada (LEE, 1991).

A realização das medidas de refletividade consiste em utilizar o mesmo sistema de medidas de medidas de caracterização eletromagnética utilizado nas medidas dos parâmetros de espalhamento e nas medidas dos parâmetros constitutivos do material. Porém, é necessário posicionar o porta-amostra e a antena conectada a porta 2 do VNA, conforme Figura 8.

A Figura 17 mostra a curva dos resultados da refletividade para o ângulo de incidência de 30° na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz e 3201 pontos resolução. Para as amostras A, B, C, E, F, G, H, I e J atenuação aumenta com o acréscimo de ferrocarbonila no material em toda a banda. Na faixa de frequências de 8,2 GHz a 9,3 GHz a curva da amostra D apresenta um decréscimo da atenuação de -15 dB até -9 dB. Houve um aumento na atenuação de -8 dB até -15 dB na faixa de frequências de 10,2 GHz a 12,4 GHz na curva da amostra L. O comportamento das curvas de atenuação nas amostras garante que a ferrocarbonila interfere no campo eletromagnético que incide sobre a mesma e sua absorção varia de 50% a aproximadamente 96,9%. Pode-se destacar a amostra L que apresenta maior atenuação em quase toda faixa de frequências analisadas. E a amostra D com menor concentração de

ferrocarbonila porém com atenuação de até -15 dB no início da faixa. A atenuação da onda eletromagnética por um absorvedor varia de acordo com a variação da concentração e da espessura do MARE (PINTO *et al.*, 2019).

Figura 18: Curvas de refletividade para ângulo de incidência de 30° de amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X.



Um comportamento semelhante ocorre na curva dos resultados da refletividade para o ângulo de incidência de 45° na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz e 3201 pontos resolução, Figura 18. A atenuação é significativa para a amostra L, aumentando de -9 dB a -13 dB na faixa de frequências 10,2 GHz a 12,4 GHz. Para as amostras A, B, C, D, E, F, G, H, I e J atenuação aumenta com o acréscimo de ferrocarbonila no material em toda a banda

Figura 19: Curvas de refletividade para ângulo de incidência de 45°de amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 18 mostra a curva dos resultados da refletividade para o ângulo de incidência de 60° na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz e 3201 pontos resolução. As curvas de atenuação apresentam um comportamento homogêneo das amostras em relação a toda a faixa de frequências. A curva da amostra A apresentou uma atenuação de -19 dB em 8,3 GHz, uma eficiência de 99% nesta frequência.



Figura 20: Curvas de refletividade para ângulo de incidência de 60° de amostras com concentrações de ferrocarbonila variando de 20 a 70% em massa na banda X.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Cálculo de incerteza

Embora os erros tenham sido reduzidos pela calibração GRL, ainda existem e devem ser considerados na medição. Para avaliar a incerteza de cada resultado, foi confeccionada uma planilha para chegar a um intervalo de confiança de 95%, K=2.

A incerteza extraída das medidas em placas de Teflon®, com dimensão de 25 cm x 25 cm e espessuras de 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm e 12 mm, na faixa de frequências de 8,2-12,4 GHz, foi denominada de u_{est} . A fim de obter a incerteza padrão nas medidas de permissividade, foram realizadas 10 leituras de permissividade relativa sob as mesmas condições de ensaio e controle ambiental. Os erros devido aos ganhos das antenas u_{Rx} e u_{Tx} devem ser levados em consideração, bem como o erro de descasamento que ocorre no sistema representado pelo VNA (*Vetorial Network Analyser*), devido às suas incertezas terem valores significativos.

A Tabela 3 representa uma planilha de incerteza das fontes de erros apontados nas medidas de permissividade com base na equação 12. O termo Ui² representa a incerteza em cada fonte.

	Componente de	Desvio	Distribuição	Divisor	Incerteza	Ci	Ui	Ui ²
	incerteza	Padrão			Padrão			
<i>U_{estab}</i>	Estabilidade das Medidas		U-Tipo A	1,41		1		
u_{tx}	Antena Tx	0,2(dB)	Retangular- Tipo A	1,73	0,11	0,5	0,055	0,003025
u_{rx}	Antena Rx	0,2(dB)	Retangular- Tipo A	1,73	0,11	0,5	0,055	0,003025
U_{vna}	VNA	0,2(dBm)	U-TipoB	1,41	0,14	0,71	0,01	0,001
							ΣUi ²	
Uc	Incerteza Combinada		Normal					

Tabela 3 - Planilha de cálculo para as fontes de incerteza em medidas de permissividade.

Fonte: Elaborado pela autora.

As incertezas relacionadas à influência dos cabos, conectores e certificado de calibração dos instrumentos não foram levadas em consideração devido à normalização das medidas realizadas na etapa de calibração do *sistema de medidas* a entrada da antena. Bem como as incertezas relacionadas as reflexões, posição das antenas e posição do porta-amostras serem suprimidas devido à etapa de calibração GRL

A Figura 20 apresenta a incerteza expandida calculada com a soma da contribuição de todas as fontes individuais, para k=2.

Figura 21: Incerteza Expandida de medições de placas de Teflon com espessuras de 1, 3, 5, 7 e 12 mm em relação a faixa de frequências de 8,2-12,4 GHz



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que a maiores contribuições são das fontes de incerteza tipo B, das antenas e do analisador de redes vetorial. Estes apresentam uma incerteza padrão de 3 casas decimais.

Em relação aos valores medidos do mesmo material em diferentes espessuras, incerteza tipo A, as placas de 1, 3, 7 e 12mm apresentaram valores próximos com variação na sexta casa decimal, a placa de 5 mm apresentou variações na quarta casa decimal, pode ser devido a impureza do Teflon®, ou alguma irregularidade na superfície da área medida.

5 CONCLUSÕES

A técnica de Caracterização Eletromagnética de Materiais em Espaço Livre é um método simples e rápido para determinar as propriedades de permissividade e permeabilidade de materiais sólidos planos. Apresentados os resultados para os materiais medidos, busca-se ressaltar algumas considerações importantes

Foram realizadas medidas em materiais de padrões e os resultados corroboram com os valores encontrados na literatura, bem como o comportamento característico das medidas realizadas em amostras com concentrações de ferrocarbonila diferentes.

As medidas de parâmetros S realizadas em amostras demonstraram comportamento característicos de homogeneidade.

Com o *sistema de medidas* de medidas de parâmetros de espalhamento S e propriedades constitutivas de materiais dielétricos/magnéticos foi possível realizar medidas de refletividade do material apenas ajustando o ângulo da antena transmissora, o ângulo do porta-amostra e foi adicionado a amostra uma placa metálica. O sistema de medições foi configurado, calibrado e as medidas apresentaram resultados coerentes a literatura.

Em medidas de incerteza para validação do método foi apresentado incerteza com 95% de confiança dependente das propriedades intrínsecas, da frequência e espessura de um material dielétrico, apresentando alta repetibilidade.

As metodologias utilizadas para as medições são consideradas de fácil manuseio por permitir o ensaio com elementos absorvedores de diversos materiais com diversos tamanhos e geometrias.

Com este trabalho, os institutos do DCTA, universidades e empresas do ramo aeroespacial contarão com uma infraestrutura Laboratorial para o desenvolvimento de materiais transparentes e lâminas absorvedoras de radiação eletromagnética necessária às aplicações aeroespaciais, bem como ampliará a capacitação e integração das equipes possibilitando troca de conhecimento e fomento na disponibilização de recursos laboratoriais especializados em itens de tecnologia sensível.

REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. 3. ed. bras. do ISO GUM em língua portuguesa. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003. 120p.

AKHTER, Z.; AKHTAR, M. J. Free-Space Time Domain Position Insensitive Technique for Simultaneous Measurement of Complex Permittivity and Thickness of Lossy Dielectric Samples. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 65, n.10, p. 2394-2405, Oct. 2016.

ANDERSON, D. S-Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design. **Hewlett-Packard Journal**, v.18, n. 6, p.13-24, Feb. 1967.

BAKER-JARVIS, J.; JANEZIC, M.; DEGROOT, D.. High-frequency dielectric measurements. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine,** v. 13, n. 2, p. 24-31, Apr. 2010.

BATISTA, F. **Caracterização numérica e experimental de materiais dielétricos sólidos através dos parâmetros de espalhamento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CABRAL, A. J. O. Síntese de hexaferrita de bário dopada com cobalto-titânio por moagem quimicamente assistida seguida de calcinação. 2005 Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CALLISTER JUNIOR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2008.

CALLISTER JUNIOR, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th. ed. New York, USA: John Wiley, 2007.

COSTA, F. *et al.* Electromagnetic Characterisation of Materials by Using Transmission/Reflection (T/R) Devices. **Electronics**, v. 6, n. 4, p. 95, 2017.

CURRIE, N. C. **Radar Reflectivity Measurement:** Techniques and Applications. Boston, MA: Artech House, 1989.

GAMA, A. M., A. MOURA, e M. C. REZENDE. "Desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética à base de ferro carbonila e silicone." *VIII Simpósio de Guerra Eletrônica*, 2006.

GHODGAONKAR, D. K.; ALI N. A. Microwave Nondestructive Testing of Composite Materials using Free-Space Microwave Measurement Techniques. In: WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING (WCNT), 15a. 2000, Roma. **Proceedings**... Roma: AIPnD, 2000. Disponível em: https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn251/idn251.htm. Acesso em: 27 set. 2019. GHODGAONKAR, D. K.; VARADAN, V. V; VARADAN, V. K. Free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies. **IEEE Transactions on Instrumentation and measurement**, v. 38, n. 3, p. 789-793, June 1989. Doi: 10.1109/19.32194

GONÇALVES, F. **Medição das Propriedades Constitutivas Eletromagnéticas de Materiais na Faixa de 1 a 6 GHz pelo Método do Espaço Livre.** 2012. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2012.

GONÇALVES, F. *et al.* Free-Space Materials Characterization by Reflection and Transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and Multi-Frequency Algorithms. **Electronics**, v.7, n.10, p. 260, 2018.

GUIMARÃES, J. V. Ensaios de proficiência em compatibilidade eletromagnética: Programa exploratório de medidas de emissão radiada. Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

HECTOR, L. G.; SCHULTZ, H. L. The Dielectric Constant of Air at Radiofrequencies. **Physics** v. 7, n. 4, p. 33-136, 1936.

HILL, R. M. Characterization of dielectric materials. Journal of Materials Science, v. 16, n.1, p. 118–124, 1981.

IEEE Standard Test Procedures for Antennas. Measurement of electrical and magnetic quantities Aerials. *ANSI/IEEE Std* 149-1979, 1979. DOI: 10.1109/IEEESTD.1979.120310.

JOHNK, R. T.; ONDREJKA, A. Electrical material properties from a free-space time-domain RF absorber reflectivity measurement system. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, AUSTIN STYLE. 1997. Symposium Record ... IEEE, 1997. p. 537-542.

JORNADA, Daniel Homrich da. **Rede Metrológica**. 23 de março de 2020. Disponível em: https://redemetrologica.com.br/uploads/pages/15/1405816078_DOC_128.pdf. Acesso em: 25 abr. 2020.

JUNQUEIRA, C.; PEROTONI, M.; LIMA, D. R. Microwave absorber materials characterization: bulk absorbing and electrical/magnetic parameters. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM (ITS), 2014, Sao Paulo, Brazil. **Proceedings**... Los Alamitos, CA: IEEE, 2014. p. 1-5.

JUNQUEIRA, Cynthia Cristina Martins. **Projeto: Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais para Radomes Cerâmicos em Aplicações Espaciais**: Relatório Final, São José dos Campos, 2014. (CNPQ - Processo: 559991/2010-0) (Não Publicado)

KEYSIGHT Tecnologies. **Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials.** Santa Rosa, Califórnia, EUA: Keysigth. (Application note 5989-2589). Disponível em: https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf. Acesso em: 20 ago. 2019.

KEYSIGHT Tecnologies. Keysight Technologies Time Domain Analysis Using a Network Analyzer, Application Note, Literature Number 5989-5723EN. 2017.

KEYSIGHT Tecnologies. **Option 100 - Freespace Calibration** : User Manual. 2016. Disponível

em:http://na.support.keysight.com/materials/help/85071webhelp/85071_opt100_grl_calibratio n.htm.Acesso em:13/06/2019. Acesso em: 16 set. 2019.

KNOTT, E. F. A progression of high-frequency RCS prediction techniques. **Proceedings of the IEEE**, v. 73, n.2, p. 252-264, 1985.

KNOTT, E.F., SHAEFFER, J.F., TULEY, M.T. **Radar cross section**. 6 ed. Boston, MA: Artech House, 1993. 611p.

LEE, S.M. (ed.). International Encyclopedia of Composites. New York: VHC Publishers, 1991.

LETERTRE, T.; POULIGUEN, P.; SABOUROUX, P. Electromagnetic Characteristics Measurement Setup at Variable Temperatures Using a Coaxial Cell. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2019, p. 1-7, 2019.

LIMA, R.C. Propriedades absorvedoras de microondas de compostos epoxídicos de Yhexaferritas de bário obtidas pelo método de combustão do gel de citrato. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

LUUKKONEN, O.; MASLOVSKI, S. I.; TRETYAKOV, S. A. A Stepwise Nicolson–Ross– Weir-Based Material Parameter Extraction Method. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 10, p. 1295-1298, 2011.

NOHARA, E. L. *et al.* Comparação das técnicas de medidas de refletividade – RCS e ARCO NRL - na avaliação de absorvedores de microondas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIAS DO MATERIAIS (CBECIMAT), Natal, 2002. **Anais.**.. São Paulo: Ipen, 2002. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_300/tc301-063.pdf. Acesso em: 17 set. 2019.

NOHARA, E. L. Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtido pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnético. 2003. Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

PINTO, S. S., REZENDE, M. C. Estudo da aplicação da poli(o-metoxianilina) e de seus compósitos com negro de fumo no processamento de absorvedores de microondas. **Polímeros, Ciência e Tecnologia,** v. 22, n. 4, p. 325-321, 2012.

PINTO, S. S. *et al.* The influence of morphology, structure, and weight fraction of magnetic additives on the electromagnetic characteristics of composites. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 484, p. 126–138, 2019.

REZENDE, M. C. *at al*. Medidas de refletividade de materiais absorvedores de radiação eletromagnética usando as técnicas RCS e NRL. **Física Aplicada Instrumental**, v.16, n.1, p. 30-36, 2003.

REZENDE, M. C., *et al.* Efeito da Polarização de Antenas nas medidas de refletividade de microondas pelo método do arco NRL. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 14 p. 79-85, 1999.

RIBEIRO, U. L. **Síntese e caracterização de nanoferritas à base de níquel-zinco e níquelcobre-zinco**. 2006. Dissertação (Mestrado em Química) –Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

RILEY, E. J.; KOUDELA, K. L.; NARAYANAN, R. M. Characterization of the electromagnetic parameter uncertainty in single-ply unidirectional carbon-fiber-reinforced-polymer laminas. **Composite B**, v. 162, p. 361-368, 2019.

ROCHA, L. S. *et al.* A free space measurement approach for dielectric material characterization. In: SBMO/1EEE MTTS INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTELECTRONICS CONFERENCE (IMOC), 2013. Rio de Janeiro. **Proceedings**... United States: IEEE, 2013. p. 1-5. doi: 10.1109/IMOC.2013.6646474.

ROHDE; SCHWARZ. Measurements made easy: firm grip on complex problems. News from Rohde & Schwarz, n. 164, 1999.

RONSÓ, Daniela Aragão. **Projeto de Lentes Dielétricas para Colimação do Campo Eletromagnético na Banda S.** 2017. 135f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

SEBASTIAN, M. Dielectric Materials for Wireless Communication. Amsterdan: Elsevier 2008.

SILVA, L. V. *et al.* Glass Fiber/Carbon Nanotubes/Epoxy Three-Component Composites as Radar Absorbing Materials. **Polymer Composites**, v. 37, n.8, p. 2277-2284, 2015.

SILVA, V. A. *et al.* Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de microondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La. **Journal of Aerospace Technology and Management,** São José dos Campos , v. 1, n. 2, p. 255-263, Dec. 2009.

SILVA, Valdirene Aparecida. **Propriedades eletromagnéticas de absorvedores de microondas baseados em hexaferritas de CaNiTi e CaCoTi e em nanoferritas de NiZn, NiCuZn e BaNiTi.** 2008 Dissertação (Mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.

SOLEIMANI, H. *et al.* Determination of complex permittivity and permeability of lanthanum iron garnet filled PVDFpolymer composite using rectangular waveguide and Nicholson–Ross–Weir (NRW) method at X-band frequencies. **Measurement**, v. 45, n.6, p. 1621–1625, 2012.

SOTODEH, S. Effective broadband measurements of the permittivity of geological materials. 2014. Dissertation (Master of Sciene in Earth and Space Science) - York University, Toronto, 2014.

TERESHCHENKO, O. V.; BUESINK, F. J. K.; LEFERINK, F. B. J. An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials. In.: URSI GENERAL

ASSEMBLY AND SCIENTIFIC SYMPOSIUM, 30., 2011, Istanbul, **Proceedings**... IEEE, 2011, p. 1-4, doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050287..

ZHOU, S. *et al.* Electromagnetic parameters measurement of magnetic thin film materials. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION, APCAP, 6., 2017, Xi'an, China. **Proceedings**... IEEE, 2017. p.1-3.

ANEXO A: Sistema de Medidas

Medidas de microondas no espaço livre (JUNQUEIRA, 2014) preconizam a possibilidade de caracterização de amostras planas de materiais quando estas estão posicionadas entre uma fonte transmissora e receptora. Existem diversos sistemas desenvolvidos para o alcance deste objetivo, o sistema utilizado neste trabalho consiste na utilização de duas antenas tipo corneta com lente focal, um analisador de redes vetorial e uma mesa que permite a mobilidade das antenas e do porta-amostra.

Para extração dos parâmetros S, permissividade e permeabilidade a configuração de teste é denominada de visada direta, ou seja, as antenas estão posicionadas no mesmo eixo e mesma altura. A configuração do sistema de medidas é dada pelo posicionamento angular (180°) da antena conectada na Porta1 em relação a antena conectada na porta 2 e pelo posicionamento angular da normal da superfície do porta amostras (0°) em relação a antena conectada na Porta 1, Figura 22.





Para medidas de refletividade é necessário realizar os posicionamentos angulares da antena conectada à porta 1 e do porta amostras. A Figura 23, 24 e 25 apresentam esquematicamente, o sistema de medidas onde foram realizadas as medidas de caracterização em arco NRL, em diferentes posições das antenas.



Figura 23: Posicionamento angular de 120° entre antenas e posicionamento angular da normal de 60° da superfície do porta amostras em relação à antena conectada a porta 2.

Figura 24 : Posicionamento angular de 90° entre antenas e posicionamento angular da normal de 45° da superfície do porta amostras em relação à antena conectada a porta 2.



Figura 25 Posicionamento angular de 60° entre antenas e posicionamento angular da normal de 30° da superfície do porta amostras em relação à antena conectada a porta 2.

