

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

José Jesus Pereira

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS
ABSORVEDORES DE MICROONDAS VIA MEDIDAS
DE PERMISSIVIDADE E PERMEABILIDADE
COMPLEXAS NA BANDA X**

Taubaté - SP

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

José Jesus Pereira

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS
ABSORVEDORES DE MICROONDAS VIA MEDIDAS
DE PERMISSIVIDADE E PERMEABILIDADE
COMPLEXAS NA BANDA X**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Tecnologias de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara.

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Mirabel Cerqueira Rezende.

Taubaté – SP

2007

JOSÉ JESUS PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS ABSORVEDORES
DE MICROONDAS VIA MEDIDAS DE PERMISSIVIDADE E
PERMEABILIDADE COMPLEXAS NA BANDA X**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Tecnologias de Materiais e Processos de Fabricação.
Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara.
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Mirabel Cerqueira Rezende.

Data: 07 de maio de 2007.

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Universidade de Taubaté.

Presidente da banca - orientador

Prof^a. Dra. Mirabel Cerqueira Rezende

Comando-Geral de Tecnologia

Co-orientadora

Aeroespacial.

Prof^a. Dra. Luiza de Castro Folgueras

Universidade de Taubaté.

Membro interno

Prof^a. Dra. Cynthia Cristina Martins Junqueira

Comando-Geral de Tecnologia

Membro externo

Aeroespacial.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida.

Em especial aos orientadores e amigos, Prof^a. Mirabel e Prof. Evandro, pela atenção e dedicação, seus ensinamentos são inestimáveis.

À Universidade de Taubaté (UNITAU) pela oportunidade da realização do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica com subárea em Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação.

Ao Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA) e à Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), fornecendo a infra-estrutura e equipamentos para a realização deste trabalho.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) do Ministério Ciência e Tecnologia e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

Aos pesquisadores, militares, técnicos e estagiários da Divisão de Materiais pelo suporte técnico na realização desta pesquisa.

Ao grupo de pesquisa MARE da Divisão de Materiais, Adriano, Galvão, Guilherme, Valéria, Joseane, Andreza, Adriana, Cristina, Luiz Alberto, Mauro, Rafael, Cristiane, Viviane, Rogério, Luiza, João Fernandes, Liliana, Michelle e Valdirene. Vocês foram muito importantes na execução deste trabalho.

Às bibliotecárias Luciana e Roberta da Divisão de Materiais, pelo ótimo atendimento e dedicação, esses são inigualáveis.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação da UNITAU, Beli, Patrícia, Alda, Helena e as estagiárias Sabrina e Marcela pelo incentivo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU, Arauto e Ruth pelo apoio.

Ao Prof. Dr. José Kleber Cunha Pinto da Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP), seus ensinamentos foram imprescindíveis para este trabalho.

Ao Engenheiro Maurício Kobayashi, pela atenção e suporte técnico aos equipamentos Agilent Technologies.

Ao Engenheiro Daniel Chagas do Nascimento, mestrando do ITA, pelas dicas na interpretação das medidas de impedância em Carta de Smith.

Ao Prof. Dr. Eugênio Oscari Giacaglia da UNITAU, pelas palavras de incentivo, elogios, chamadas de atenção e exemplos tornaram força propulsora para a realização desta pesquisa.

Aos colegas e professores do mestrado da UNITAU, pelos momentos de aprendizados e descontração que foram bem aproveitados.

A todos os meus amigos, muitos são e, não os cito para não esquecer algum, sempre incentivaram na continuidade na vida acadêmica e profissional.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Dedico este trabalho aos meus pais José Antonio Pereira e Otávia Alves Pereira, pelo amor e dedicação, deixando a tranqüilidade do campo para dar melhor futuro a nós, seus filhos.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Evandro Luís Nohara e Prof^a. Dr^a. Mirabel Cerqueira Rezende, pelas instruções, apoio e pela oportunidade.

Ensinar é aprender duas vezes.

Joseph Joubert, escritor francês.

À minha família, Pedro, Benedito, Mariane,
Mariângela e Ivan, pelo incentivo, formamos uma
fortaleza.

À Renata Fabiane, minha noiva, pela
compreensão nos momentos de falta e pelo
incentivo, nosso amor supera todos os
obstáculos.

Faça o necessário, depois o possível, e, de repente,

você estará fazendo o impossível.

Francisco de Assis (1182-1226), santo italiano.

RESUMO

Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) têm recebido atenção crescente devido à intensificação do controle, normatização e regulamentação dos níveis de radiação eletromagnética espúria por parte de governos em todo o mundo. Estes materiais geram também grande interesse na indústria de defesa, caracterizando o MARE como uma tecnologia tipicamente *dual-use*. Como seria de se esperar para uma tecnologia *dual-use*, o acesso à tecnologia MARE é limitado porque esta está intimamente ligada à área estratégica e militar. Por esse motivo a literatura disponível não traz informações detalhadas sobre formulações e caracterização eletromagnética de MARE. O objetivo do presente trabalho é estudar o modelo Nicolson-Ross para obtenção dos parâmetros permissividade (ϵ_r^*) e permeabilidade (μ_r^*) complexas, obter os parâmetros S (S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22}) e obter a energia absorvida e refletividade com placa metálica de materiais, utilizando guia de ondas retangular na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz. As medidas de permeabilidade e permissividade complexa em guias de onda são dependentes da espessura do material, que deve estar dentro do intervalo do comprimento de onda da onda guiada (λ_g) entre $\lambda_g/180^\circ$ e $\lambda_g/2$, que corresponde a 20° e 180° da fase da onda eletromagnética interagindo com o material, respectivamente. O modelo Nicolson-Ross recomenda uma espessura do material igual a $\lambda_g/4$, o que equivale a 90° da fase da onda eletromagnética. Os materiais utilizados foram o poli(difluoroetileno) e material absorvedor de radiação eletromagnética (MARE) baseado em ferrocarbonila em matriz epóxi. O poli(difluoroetileno) foi estudado com quatorze espessuras dentro do intervalo entre 0,88 mm a 23,50 mm, equivalente a $\lambda_g/27$ a $\lambda_g/1$, respectivamente. O MARE foi estudado com seis concentrações de ferrocarbonila (40% a 65% em massa, com passos de 5%) e doze espessuras dentro do intervalo entre 2,50 mm a 9,77 mm, equivalente a $\lambda_g/5,9$ a $\lambda_g/1,8$. Os resultados obtidos de energia refletida (E_r) do MARE mostram que o aumento de concentração e espessura aumenta o caráter refletor do material. A energia transmitida (E_t) aumenta com a diminuição da concentração e espessura e a energia absorvida (E_a) aumenta com o aumento da concentração e espessura. A refletividade do MARE sob uma placa metálica

apresenta um comportamento ressonante, isto é, típico de cancelamento de fase da onda eletromagnética. Os valores de ϵ_r^* e μ_r^* dos materiais com espessuras próximas a $\lambda_g/18$ e $\lambda_g/2$ não se apresentam coerentes, uma vez que as espessuras em torno de $\lambda_g/18$ apresentam uma quantidade pequena de fase da onda eletromagnética interagindo com o material (20º) e para espessuras em torno de $\lambda_g/2$ ocorre cancelamento de fase do parâmetro S_{11} . Os valores mais coerentes de ϵ_r^* e μ_r^* foram obtidos com espessuras próximas de $\lambda_g/4$, comprovando o modelo Nicolson-Ross.

Palavras chave: Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética, Modelo Nicolson-Ross, Ferrocarbonila, Poli(difluoroetileno), Permissividade complexa, Permeabilidade complexa, Banda X.

ABSTRACT

Electromagnetic absorber has been receiving growing attention due to intensification on control and regulation of spurious levels of electromagnetic radiation by governments around the world. These materials also generate great interest in defense industry, characterizing the electromagnetic absorbers as dual-use technology. As expected for a dual-use technology, the access to this technology is limited because is linked to strategic and military area. For this reason, there is not detailed information available on literature about formulation and electromagnetic characterization of electromagnetic absorbers. The aim of the present work is to study the Nicolson-Ross model to obtain complex permittivity (ϵ_r^*) and permeability (μ_r^*), to obtain the S parameters (S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22}) and to obtain the absorbed energy and reflectivity on a metal plate, using rectangular wave guide in the frequency range of 8,2 – 12,4 GHz. The measurement of complex permittivity and permeability in wave guide are dependent on material thickness, that must be in the interval of wave guided length (λ_g) between $\lambda_g/180^\circ$ and $\lambda_g/2$, which corresponds to 20° and 180° of wave electromagnetic phase interacting with the material, respectively. The Nicolson-Ross model recommends a material thickness equal to $\lambda_g/4$, equivalent to 90° of wave electromagnetic phase. The materials used were poly(difluoroethylene) and electromagnetic absorber based on carbonyl iron in epoxy matrix. The poly(difluoroethylene) was studied in fourteen thickness in the 0,88 mm to 23,50 mm interval, equivalent to $\lambda_g/27$ to $\lambda_g/1$, respectively. The electromagnetic absorber was studied in six carbonyl iron concentrations (40% to 65% w/w, with 5% step) and twelve thickness in the 2,50 mm to 9,77 mm interval, equivalent to $\lambda_g/5,9$ to $\lambda_g/1,8$, respectively. The obtained results of electromagnetic absorber reflected energy (E_r) show that the increase of concentration and thickness increases the reflector character of material. The transmitted energy (E_t) increases with the decrease of concentration and thickness and the absorbed energy (E_a) increases with the increase of concentration and thickness. The reflectivity of electromagnetic absorber on a metallic plate presents a resonant behavior, i.e., typical of electromagnetic wave cancellation. The ϵ_r^* and μ_r^* values with material thickness near to $\lambda_g/18$ and $\lambda_g/2$ does not present coherent values, once thickness near to $\lambda_g/18$ present a small quantity of wave electromagnetic phase (20°) and thickness near to

$\lambda_g/2$ present electromagnetic wave cancellation of S_{11} parameter. The most coherent values of ϵ_r^* and μ_r^* were obtained with thickness close to $\lambda_g/4$, proving the Nicolson-Ross model.

Key words: Electromagnetic absorbers, Nicolson-Ross model, carbonyl iron, poly(difluoroethylene), complex permittivity, complex permeability, X band.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 Introdução	33
1.1 Considerações Iniciais	33
1.2 Justificativas e Objetivos.....	36
1.3 Organização da Dissertação.....	37
2 Revisão Bibliográfica.....	39
2.1 Introdução.....	39
2.2 Propagação da onda eletromagnética	39
2.2.1 Conceito de Campo.....	39
2.2.2 Propagação da Onda Eletromagnética em Materiais	41
2.3 Parâmetros S.....	44
2.4 Metodologias de Caracterização Eletromagnética.....	46
2.4.1 Consideração Eletromagnética.....	47
2.4.2 Caracterização Eletromagnética.....	47
2.5 Permissividade e permeabilidade	56
2.5.1 Permissividade complexa.....	56
2.5.2 Permeabilidade complexa	59
2.5.3 Modelo Nicolson-Ross.....	61
2.5.4 Critérios de Dimensionamento dos corpos-de prova para medidas de permissividade e permeabilidade	62
2.6 Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE).....	69

2.6.1	Introdução.....	69
2.6.2	MARE Baseados em Aditivos Dielétricos	70
2.6.3	MARE Baseados em Aditivos Magnéticos	71
3.	Materiais e Métodos	88
3.1	Materiais	89
3.1.1	Poli(difluoroetileno).....	89
3.1.2	Ferrocarbonila	89
3.1.3	Caracterização Eletromagnética.....	90
3.2	Métodos	90
3.2.1	Calibração do analisador de redes vetorial.....	90
3.2.2	Técnica de Medidas dos Parâmetros S.....	93
3.2.3	Técnica de Medidas de Refletividade com Placa Metálica.....	94
3.2.4	<i>Software</i> de cálculo da permissividade e permeabilidade complexas	95
3.2.5	Preparação dos corpos-de-prova para medidas de permissividade e permeabilidade complexas.....	97
3.2.5.1	Dimensionamento do porta-amostra do <i>kit</i> WR-90 (banda X)	97
4	Resultados e Discussão	107
4.1	Introdução	107
4.2	Parâmetros S.....	107
4.2.1	Ferrocarbonila	108
4.7	Permissividade e Permeabilidade complexas.....	119
4.7.1	Poli(difluoroetileno).....	119
4.7.2	Permissividade e permeabilidade da ferrocarbonila	134

5 Conclusões	149
6 Sugestões para Trabalhos Futuros	154
7 Produção Técnico-científica gerada durante o trabalho.....	156
8 Referências Bibliográficas	158
ANEXO 1 - Estruturas Absorvedoras da Radiação	170
ANEXO 2 - Fenômenos de Atenuação da Radiação.....	173
A-2.1 Cancelamento de Fase	173
A-2.2 Energia Absorvida	174
A-2.3 Multireflexões Internas	176
A-2.4 Multireflexões Externas	177
ANEXO 3 - Medidas de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova de ferrocarbonila	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Marcapasso cardíaco [RESOURCES PACEMAKER, 2006]	34
Figura 1.2 – Aplicações de MARE em circuitos eletrônicos: (a) mantas de MARE usadas entre circuitos eletrônicos de aparelhos celulares, (b) revestimentos de cavidades de microondas revestidos com MARE [GEAR, 2004] e (c) elementos eletrônicos.....	34
Figura 2.1 – Propagação da onda eletromagnética [EDMINISTER, 1980].....	42
Figura 2.2 – Interação da Onda Eletromagnética em um material [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006].....	44
Figura 2.3 – Esquema da propagação do sinal em duas portas [LAVERGHETTA, 1988]	45
Figura 2.4 – Esquema da conservação de energia [NOHARA, 2003a].....	46
Figura 2.5 – Esquema da conservação de energia com placa metálica [NOHARA, 2003a].....	47
Figura 2.6 – Metodologias de caracterização eletromagnética em espaço livre, linha de transmissão e outros [BUSSEY, 1967; NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD AND TECHNOLOGY, 1993; AGILENT TECHNOLOGIES, 2002; AGILENT TECHNOLOGIES, 2003; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003; ROHDE & SCHWARZ, 2004a; ROHDE & SCHWARZ, 2004b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].....	48
Figura 2.7 – Câmara anecóica para medidas de Seção Reta Radar [MIACCI; MARTIN; NOHARA; FERRAZ; REZENDE, 2001].....	49
Figura 2.8 – Arco NRL [DIAS, 2001; FRANCHITTO, 2001; NOHARA, 2003; SILVA, 2000].....	49
Figura 2.9 – Configuração para medida de inserção entre antenas[AGILENT Technologies, 2007a].....	50
Figura 2.10 – Porta-amostra do método de medidas em cabo coaxial.	50
Figura 2.11 – Guia de ondas retangular [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006].	52
Figura 2.12 – Modo de propagação TE ₁₀ em guia de ondas retangular [KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993].....	53

Figura 2.13 – Energia armazenada em um capacitor e circuito equivalente [BALANIS, 1989; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003].	57
Figura 2.14 – Indutor e circuito equivalente [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006].	59
Figura 2.15 – Dimensionamento do corpo-de-prova para medidas de permissividade e permeabilidade complexas. (a) dimensões a, b e c. (b) espessura com 20° ($\lambda/18$) da fase de um comprimento de onda. (c) espessura com 180° ($\lambda/2$) da fase de um comprimento de onda [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].	63
Figura 2.16 – Medida da componente real da permissividade complexa relativa de um corpo-de-prova de poli(tetrafluoretileno) na faixa de freqüências de 2 a 18 GHz, com espessuras iguais a (a) 0,1 polegada e (b) 0,5 polegada [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].	68
Figura 2.17 – Representação tridimensional do modelo barra e bola da ferropentacarbonila $Fe(CO)_5$ (vermelho - oxigênio, preto - carbono e roxo – ferro) [WIKIPEDIA, 2007].	72
Figura 2.18 – Estrutura física (a) e química (b) da ferrocarbonila. (a) seção transversal mostrando a estrutura tipo cebola. (b) regiões compostas de $Fe-\alpha$ (magnéticas e condutoras) e regiões dispostas radialmente compostas de Fe_xN e Fe_xC (não magnéticas e não condutoras) [NOHARA, 2002].	74
Figura 2.19 – Fluxograma do processo de produção do ferrocarbonila [BASF, 2007].	75
Figura 2.20 – Permissividade e permeabilidade complexas da ferrocarbonila pura, tipo EN, ES, EW e EW-I na faixa de freqüências de 8 a 18 GHz [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003].	78
Figura 2.21 – Permissividade e permeabilidade complexas da ferrocarbonila tipo EN, EW e ES na faixa de freqüências de 8 a 40 GHz [WANG; AFSAR; BAHADOOR, 2005].	80
Figura 2.22 – Permissividade e permeabilidade complexas em 10 GHz do ferrocarbonila com matriz epóxi em função da fração volumétrica [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005].	81
Figura 2.23 – Permissividade e permeabilidade complexas de ferrocarbonila incorporada em EPDM. (a) Componente real e (b) componente imaginária da permissividade complexa. (c) Componente real e (d) componente imaginária da	

permeabilidade complexa. (e) Perdas dielétricas e (f) Perdas magnéticas [FENG; QIU; SHEN; LI, 2006].....	83
Figura 2.24 – Permissividade e permeabilidade complexas de partículas de ferrocarbonila incorporadas em borracha de silicone [PARK; CHOI; KIM, 2000]	85
Figura 2.25 – Permissividade e permeabilidade complexas de ferrocarbonila incorporada em borracha de silicone [KOMORI; FELOW, 1994]	86
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.....	88
Figura 3.2 – Conjunto de calibração em guia de ondas para a banda X, composto de: (a) parafusos com porcas e parafusos guia. (b) trechos de guia de ondas com atenuador de impedância fixa, (c) trecho de guia de ondas com extremidades abertas, (d) acopladores para conexão do guia de ondas ao cabo coaxial de 3,5mm, (e) placa metálica e (f) porta-amostras ou item usado como atraso em conjunto da placa metálica [AGILENT TECHNOLOGIES, 2002]	92
Figura 3.3 – Configuração para medidas dos parâmetros S. (a) Vista geral do sistema montado. (b) Vista ampliada do porta-amostra com corpo-de-prova. (1) acoplador da porta um, (2) porta-amostra, (3) trecho de guia de ondas da porta dois e (4) corpo-de-prova [AGILENT TECHNOLOGIES, 2000; PEREIRA; REZENDE; NOHARA, 2006c].....	94
Figura 3.4 – Configuração de medida de refletividade com placa metálica. (a) Vista ampliada do porta-amostra com corpo-de-prova e placa metálica. (b) Esquema do posicionamento do corpo-de-prova no porta-amostra, mostrando a seção longitudinal da figura (a). (1) acoplador da porta 1, (2) porta-amostra, (3) placa metálica, (4) trecho de guia de ondas da porta 2 e (5) corpo-de-prova dentro do porta-amostra. [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005c, PEREIRA; REZENDE; NOHARA, 2006a].....	95
Figura 3.5 – Dimensão c do porta-amostra para medidas de permissividade e permeabilidade complexas.....	98
Figura 4.1 – Medidas experimentais dos parâmetros S_{11} , S_{21} , S_{22} , e S_{12} do ar atmosférico.....	108
Figura 4.2 – Medidas da energia refletida (S_{11}) dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocarbonila: 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm;	

(■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5mm.....	110
Figura 4.3 – Medidas da energia transmitida (S_{21}) dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocarbonila: 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm; (■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5mm.....	113
Figura 4.4 – Medidas da energia absorvida (E_a) dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocarbonila: 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm; (■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5mm.....	115
Figura 4.5 – Medidas de refletividade com placa metálica dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocarbonila: 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm; (■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5mm.	118
Figura 4.6 – Valores de parâmetros S_{21} e S_{11} dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: a) 0,88 mm; b) 1,30 mm; c) 1,36 mm; d) 1,72 mm e e) 2,35 mm.	121
Figura 4.7 – Valores de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: a) 0,88 mm; b) 1,30 mm; c) 1,36 mm; d) 1,72 mm e e) 2,35 mm.	123
Figura 4.8 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: a) 3,45 mm; b) 4,10 mm; c) 4,60 mm; d) 5,75 mm e e) 7,72 mm.	126
Figura 4.9 – Valores de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: a) 3,45 mm; b) 4,10 mm; c) 4,60 mm; d) 5,75 mm e e) 7,72 mm.	128
Figura 4.10 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com as espessuras a) 9,77 mm; b) 11,73 mm; c) 15,65 mm e d) 23,50 mm. ...	131
Figura 4.11 – Valores de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras de: a) 9,77 mm; b) 11,73 mm; c) 15,65 mm e d) 23,50 mm	133

Figura 4.12 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova com espessura igual a 2,50 mm ($\lambda_g/5,9$) e concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila).135.....	135
Figura 4.13 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila), espessura de 2,50 mm.....	137
Figura 4.14 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila) com espessuras iguais a $\lambda_g/4$	141
Figura 4.15 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila), com espessuras iguais a $\lambda_g/4$	142
Figura 4.16 – Valores de parâmetros S de corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila), com espessuras que não atendem à condição máxima de $\lambda_g/2$	145
Figura 4.17 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações de 40, 45, 50, 55, 60 e 65 (% em massa de ferrocarbonila), espessuras que não atendem à condição máxima de $\lambda_g/2$	147
Figura A-2.1 – MARE baseado na Estrutura de Salisbury. E_i energia incidente. E_{r1} energia refletida. E_{r2} , E_{r3} ... E_m energia emergente. E_t energia transmitida [SIMÕES, 2005].	173
Figura A-2.2 – Esquema do caminho de energia da onda eletromagnética [NOHARA, 2003a].....	175
Figura A-2.3 – Multireflexões internas: (a) Multireflexões entre os centros absorvedores, (b) multireflexões entre as superfícies MARE-ar e MARE-material condutor [BALANIS, 1989].	177
Figura A-2.4 – MARE com topografia piramidal [ETS-LINDGREN, 2006].....	178
Figura A-2.5 – Fotografia do interior de uma câmara anecóica recoberta por MARE [PEREIRA; REZENDE; NOHARA, 2006b]	178
Figura A-3.1 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocarbonila e espessura de 2,70 mm.	179

Figura A-3.2 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocarbonila e espessuras 2,80 mm e 2,90 mm.	180
Figura A-3.3 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,10 e 3,20 mm.	181
Figura A-3.4 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,30 e 3,40 mm.	182
Figura A-3.5 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 45% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 2,70 e 2,90 mm.	183
Figura A-3.6 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 45% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,10 e 3,20 mm.	184
Figura A-3.7 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 45% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,30 e 3,40 mm.	185
Figura A-3.8 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 50% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 2,70 e 2,80 mm.	186
Figura A-3.9 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 50% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 2,90 e 3,20 mm.	187
Figura A-3.10 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 50% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,30 e 3,40 mm.	188
Figura A-3.11 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações de 50% e 40% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,50 e 2,70 mm, respectivamente.	189
Figura A-3.12 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 55% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 2,80 e 3,10 mm.	190

Figura A-3.13 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 55% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,20 e 3,30 mm	191
Figura A-3.14 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 55% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,40 e 3,50 mm	192
Figura A-3.15 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 60% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 2,80 e 2,90 mm	193
Figura A-3.16 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 60% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,10 e 3,20 mm	194
Figura A-3.17 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 60% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,30 e 3,40 mm	195
Figura A-3.18 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações de 40% e 65% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,50 e 2,80 mm, respectivamente	196
Figura A-3.19 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 65% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 2,90 e 3,10 mm	197
Figura A-3.20 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 65% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,20 e 3,30 mm	198
Figura A-3.21 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 65% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,40 e 3,50 mm	199

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Métodos de caracterização eletromagnética de materiais.....	51
Tabela 2.2 – Parâmetros eletromagnéticos de guias de onda retangular para o modo de propagação TE ₁₀ [AGILENT TECHNOLOGIES, 2002; DORADO INTERNATIONAL CORPORATION, 2007; PENN ENGINEERING COMPONENTES, 2007; SURPLUS SALES OF NEBRASKA, 2007].	55
Tabela 2.3 – Tipos de ferrocarbonila sintetizados e comercializados pela BASF [BASF, 2007].....	76
Tabela 2.4 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexa [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003].....	77
Tabela 2.5 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexas [WANG; AFSAR; BAHADOOR, 2005].....	79
Tabela 2.6 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexas [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005]	81
Tabela 2.7 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexas utilizado na literatura [FENG; QIU; SHEN; LI, 2006]	82
Tabela 2.8 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexa da referência [PARK; CHOI; KIM, 2000]	84
Tabela 2.9 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexa apresentado na literatura [KOMORI; FELOW, 1994]	86
Tabela 3.1 – Modelos de cálculo de permissividade e permeabilidade complexa do <i>software</i> Agilent Techonologies 85071E [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a]	96
Tabela 3.2 – Valores de $\lambda_g/18$, $\lambda_g/2$ e λ_g do poli(difluoroetileno) para as frequências 8,2GHz e 12,4 GHz.....	101
Tabela 3.3 – Dados experimentais de ϵ_r' , ϵ_r'' , μ_r' e μ_r'' de corpos-de-prova em fração volumétrica de ferrocarbonila em resina epóxi, em 10 GHz [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005]	105
Tabela 3.4 – Valores de $\lambda_g/18$ e $\lambda_g/2$ dos corpos-de-prova de ferrocarbonila para banda X.	105

Tabela 3.5 – Valores calculados de λ_g , $\lambda_g/2$, $\lambda_g/4$ e $\lambda_g/18$ dos corpos-de-prova de ferrocbonila em resina epóxi na freqüência principal da banda X ($f_o = 10,084$ GHz).....	106
Tabela 4.1 – Valores de espessura dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) em milímetros (mm) e λ_g em 10 GHz	120
Tabela 4.2 – Valores médios de permissividade e permeabilidade complexas, diferença entre o maior e o menor valor (Δ) e o valor percentual da diferença (Δ) em relação ao valor médio da propriedade (%) entre 8,2 e 12,4 GHz para os corpos-de-prova com espessuras 0,88 mm ($\lambda_g/27$), 1,30 mm ($\lambda_g/18$), 1,36 mm ($\lambda_g/17$), 1,72 mm ($\lambda_g/14$) e 2,35 mm ($\lambda_g/10$)	124
Tabela 4.3 – Valores médios de permissividade e permeabilidade complexas, diferenças entre o maior e o menor valor (Δ) e valor percentual da diferença (Δ) em relação ao valor médio da propriedade (%) entre 8,2 e 12,4 GHz para os corpos-de-prova com espessuras 3,45 mm ($\lambda_g/7$), 4,10 mm ($\lambda_g/6$), 4,60 mm ($\lambda_g/5$), 5,75 mm ($\lambda_g/4$) e 7,72 mm ($\lambda_g/3$)	129
Tabela 4.4 – Relação entre concentração de ferrocbonila (% em massa) e espessura λ_g para os corpos-de-prova com espessura igual a 2,50 mm.	134
Tabela 4.5 – Valores médios e desvio padrão da permissividade e permeabilidade complexas, entre 8,2 e 12,4 GHz, para os corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%.	138
Tabela 4.6 – Espessuras que correspondem a $\lambda_g/4$ dos corpos-de-prova de ferrocbonila para cada concentração	140
Tabela 4.7 – Valores médios e desvio padrão da permissividade e permeabilidade complexas entre 8,2 e 12,4 GHz para os corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% e espessura igual a $\lambda_g/4$	143
Tabela 4.8 – Espessuras superiores a $\lambda_g/2$ dos corpos-de-prova de ferrocbonila para cada concentração.....	144

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

AMR	Divisão de Materiais
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CTA	Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade eletromagnética)
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> (Interferência eletromagnética)
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos – Ministério da Ciência e tecnologia
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
HARPA	<i>Halpern Anti Radiation Paint</i>
HP	<i>Hewlett Packard</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineer</i>
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
MARE	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NaCl	Cloreto de sódio

NR	Nicolson e Ross
NRL	<i>Naval Research Laboratory</i>
PAni	Polianilina
PU	Poliuretano
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RCS	<i>Radar Cross Section</i>
TE₁₀	Onda transversal elétrica com uma variação senoidal na direção x e nenhuma variação senoidal na direção y do plano cartesiano
TEM	Onda transversal eletromagnética (<i>Transverse Electromagnetic Modes</i>)
USPTO	<i>United States Patent and Trademark Office</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%MF$	Concentração de ferro carbonilo em %
$-jX$	Reatância capacitiva
$+jX$	Reatância indutiva
a	Dimensão maior da seção do guia de ondas retangular
A	Ampére
b	Dimensão menor da seção do guia de ondas retangular
$\vec{B} = \vec{b}$	Densidade de fluxo de campo magnético em Wb/m ²
Banda C	Faixa de freqüências compreendida entre 4 e 8 GHz
Banda S	Faixa de freqüências compreendida entre 2 e 4 GHz
Banda X	Faixa de freqüências compreendida entre 8 e 12 GHz
c	Velocidade da luz no vácuo $\approx 2,997925 \times 10^8$ em m/s
C	Capacitância elétrica ou coulomb
d	Espessura do meio em m
$\vec{D} = \vec{d}$	Densidade de fluxo de campo elétrico em C/m ²
dB	Decibél
dBm	Milidecibél
e	Número neperiano $\approx 2,7183$
$\vec{E} = \vec{e}$	Intensidade de campo elétrico em V/m
E_a	Energia absorvida
E_d	Energia dissipada
E_i	Energia incidente
E_r	Energia refletida
E_t	Energia transmitida

E_{rp}	Energia refletida com placa metálica
f	Frequência em Hz
f_c	Frequência de corte, para guia de onda na banda X = 6,557 em GHz
f_0	Frequência principal, para banda X = 10,084 em GHz
F	Faraday ou força em N
F	Ferro carbonilo
F:R	Relação entre ferro carbonilo e resina epóxi, dado em porcentagem em massa
GHz	Gigahertz = 1×10^9 Hz
$\vec{H} = \vec{h}$	Intensidade de campo magnético em A/m
H	Henry
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica em A
j	Unidade imaginária
$\vec{J} = \vec{j}$	Densidade de corrente elétrica em A/m ²
KHz	Kilohertz = 1×10^3 Hz
L	Indutância em H
L_0	Indutância do vácuo em H
m	Metro
m	Primeiro índice do modo de propagação
mm	Milímetro
MF	Massa de ferro carbonilo em g
MHz	Megahertz = 1×10^6 Hz
MR	Massa de resina epóxi em g
n	Segundo índice do modo de propagação

N	Newton
R	Resina epóxi
R	Resistência elétrica em Ω
rad	Radianos
REF	Referência
s	Segundos
S	Siemens
S₁₁	Medida de reflexão dos Parâmetros S da porta 1 para a porta 1
S₁₂	Medida de transmissão dos Parâmetros S da porta 2 para a porta 1
S₂₁	Medida de transmissão dos Parâmetros S da porta 1 para a porta 2
S₂₂	Medida de reflexão dos Parâmetros S da porta 2 para a porta 2
T	Torque em N.m
<i>tgh</i>	Tangente hiperbólico
<i>tgδ</i>	Tangente de perdas
<i>tgδ_m</i>	Tangente de perdas magnéticas
<i>v</i>	Velocidade de propagação da onda no material em m/s
V	Tensão elétrica em V
V	Volts
Wb	Weber
X	Reatância
Z	Impedância em Ω
Z₀	Impedância característica do vácuo $\approx 376,991$ em Ω
Z_{en}	Impedância de entrada em Ω
Γ	Coeficiente de reflexão
δ	Ângulo entre dois vetores em graus

ϵ	Permissividade em F/m
ϵ^*	Permissividade elétrica complexa em F/m
ϵ'	Componente real da permissividade elétrica complexa
ϵ''	Componente imaginária da permissividade elétrica complexa
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo $\approx 8,854 \times 10^{-12}$ em F/m
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa;
ϵ_r^*	Permissividade elétrica complexa relativa
ϵ_r'	Componente real da permissividade elétrica complexa relativa;
ϵ_r''	Componente imaginária da permissividade elétrica complexa relativa
λ	Comprimento de onda em m
λ_0	Comprimento de onda da frequência principal da banda em m
λ_c	Comprimento de onda de corte em m
λ_d	Comprimento de onda no material em m
λ_g	Comprimento de onda da onda guiada em m
λ_l	Comprimento de onda no espaço livre em m
λ_x	Comprimento de onda da frequência de interesse em m
η	Impedância intrínseca do meio em Ω
μ	Permeabilidade magnética em H/m
μ^*	Permeabilidade magnética complexa em H/m
μ'	Componente real da permeabilidade magnética complexa
μ''	Componente imaginária da permeabilidade magnética complexa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo $\approx 1,256 \times 10^{-6}$ em H/m
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
μ_r^*	Permeabilidade magnética complexa relativa
μ_r'	Componente real da permeabilidade magnética complexa relativa

μ_r''	Componente imaginária da permeabilidade magnética complexa relativa
ρ	Coeficiente de onda estacionária ou densidade de carga elétrica em C/m ³
σ	Condutividade elétrica em S/m
τ	Tempo de relaxação da polarização elétrica em s
T	Coeficiente de transmissão
$\chi_{d.c.}$	Susceptibilidade magnética estática
ω	Coeficiente angular em rad/s
Ω	Ohms

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) são denominados assim por possuírem propriedades que lhes permitem a troca de energia da radiação eletromagnética incidente pela energia térmica. Dentre os materiais utilizados como centro absorvedores destacam-se o negro de fumo, ferrocarbonila e as ferritas de microondas [LEE, 1991].

Alguns setores como o aeroespacial, aeronáutico, telecomunicações e médico utilizam esses materiais, visando obter o controle do nível de radiação eletromagnética espúria dos equipamentos, sendo este tipo de ruído, prejudicial ao ambiente, ao homem e na precisão de medidas experimentais na faixa de microondas [PEREIRA; REZENDE; NOHARA, 2006b; REZENDE; NOHARA; MARTIN; MIACCI, 2003; SILVA, 2000]. No setor militar as plataformas terrestres, aéreas e marítimas são revestidas com este material visando a não detecção por radares inimigos. No setor civil, a utilização deste material envolve, principalmente, o controle de interferência e compatibilidade eletromagnética (*EMC/EMI – electromagnetic compatibility/electromagnetic interference*), como por exemplo, pode-se citar na área médica, é usado este material no revestimento de aparelhos cardíacos como marcapasso, apresentado na Figura 1.1 [TAN; HINBERG; WADHWANI, 2006] e na área de telecomunicações os MARE são aplicados em circuitos [CHOMERICS CORPORATION, 1996] e elementos eletrônicos, como apresentado na Figura 1.2.

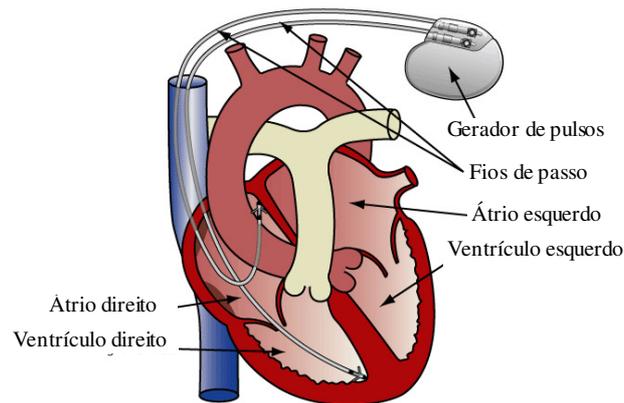


Figura 1.1 – Marcapasso cardíaco [RESOURCES PACEMAKER, 2006]

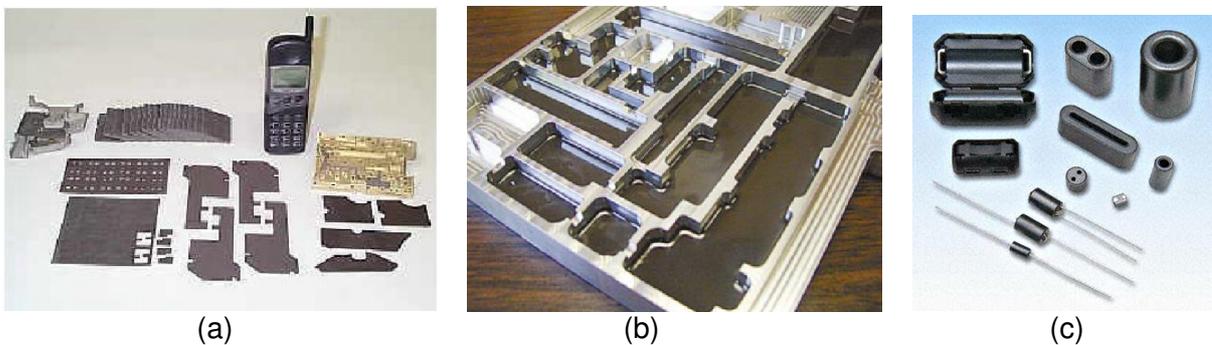


Figura 1.2 – Aplicações de MARE em circuitos eletrônicos: (a) mantas utilizadas entre circuitos eletrônicos de aparelhos celulares, (b) revestimentos de cavidades de microondas [GEAR, 2004] e (c) elementos eletrônicos.

O desenvolvimento e a pesquisa deste material concentram-se principalmente em países como: Grã-Bretanha, Estados Unidos da América, Japão, Itália, França, Alemanha e Rússia. Porém, a Índia, China e Brasil buscam a autonomia na tecnologia de obtenção de MARE, uma vez que o acesso a essas informações é restrito por se tratar de tecnologia “*Stealth*” ou furtiva, de estratégia militar [NOHARA, 2003a]. Essa tecnologia é um dos métodos que visa obter baixa detecção radar de alvos como plataformas terrestres, marítimas e aéreas [NOHARA; MIACCI; PEIXOTO; MARTIN; REZENDE, 2003b; REZENDE; MARTIN; MIACCI; NOHARA, 2001; REZENDE; MARTIN; MIACCI; NOHARA, 2002].

As informações encontradas em literaturas resumem-se a conceitos genéricos e de interpretação difícil, pois em alguns documentos os conceitos estão escritos de forma implícita. Entretanto, durante este trabalho foi efetuada uma pesquisa bibliográfica com o termo “*Radiation Absorbing Materials*” em alguns sítios de patentes na rede internacional de computadores (*internet*) para verificar a quantidade de informações disponíveis pela rede. Em *Fresh Patents* [FRESH PATENTS, 2006] foram encontradas 1568 patentes, em *Free Patents on Line* [FREE PATENTS ON LINE, 2006] foram encontradas 1.069 patentes, em *United States Patent and Trademark Office* [UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE, 2006] foram encontradas 120 patentes com o termo pesquisado em título e 1539 patentes com o termo pesquisado em resumo e no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) [INSTITUTO NACIONAL DE PROPRIEDADE INDUSTRIAL, 2006] com termo de busca como “Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética” foram encontradas 04 patentes, desta forma observa-se que há um grande número de documentos publicados, porém com informações pouco detalhadas sobre os materiais utilizados, processamento e caracterização eletromagnética.

As principais faixas de freqüências de interesse no setor aeronáutico militar compreendem as bandas S (2 a 4 GHz) e X (8 a 12 GHz), utilizadas no monitoramento aéreo e traqueamento de plataformas aéreas, respectivamente [NOHARA; MIACCI; PEIXOTO; MARTIN; REZENDE, 2003b]. No setor marítimo militar, a principal faixa de freqüências de traqueamento, é a banda S [PINHO; SEBRÃO; NUNES; SOARES, 2003]. O exército faz uso das bandas S e X [SILVA; ORLANDO; NOHARA; MARTIN; REZENDE, 2004a]. A banda C (4 a 8 GHz) é

amplamente utilizada em radares meteorológicos, bem como em telecomunicações [SILVA, 2004b].

1.2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

O processamento de MARE para o setor aeronáutico procura obter um material capaz de absorver a radiação eletromagnética, além de atender a alguns critérios como: espessura reduzida da ordem de alguns milímetros, flexível de forma a revestir superfícies curvas, baixa massa específica para não comprometer a estrutura e o peso final do avião após o revestimento, resistência às oscilações ambientais de temperaturas e umidade e ainda, trabalhar em banda larga de frequências [NOHARA; MIACCI; PEIXOTO; MARTIN; REZENDE, 2003b; REZENDE; NOHARA; MARTIN; MIACCI, 2003]. Para isso a caracterização eletromagnética é essencial para compreender os mecanismos de interação destes materiais com a radiação eletromagnética a fim de converter a energia irradiada sobre o material em energia térmica, absorvendo desta maneira a radiação eletromagnética incidente.

A obtenção dos valores de permissividade e permeabilidade complexas auxilia na compreensão dos fenômenos de absorção da radiação eletromagnética pelo MARE, além de fornecer dados para a simulação computacional do comportamento destes materiais, pelo uso de programas específicos, que simulam o nível de atenuação desejada, a espessura e a frequência de maior atenuação, otimizando, desta forma, o processo de obtenção destes materiais associado à economia de matéria-prima.

Nos últimos anos, os autores Franchitto, Nohara e Silva têm enfatizado em seus trabalhos [FRANCHITTO, 2001; NOHARA, 2003a; SILVA, 2000] a importância

da permissividade e permeabilidade complexa de materiais absorvedores de radiação eletromagnética, além da tangente de perdas ($tg \delta$) e da diferença entre as impedâncias (Z) do material absorvedor e do meio externo, para a faixa de frequências estudado neste trabalho 8,2 a 12,4 GHz.

A caracterização eletromagnética de materiais, no âmbito nacional, restringe-se, principalmente, em baixas frequências, isto é, hertz (Hz), quilohertz (KHz) e megahertz (MHz); envolvendo o desenvolvimento de materiais para o setor eletroeletrônico. Diante deste cenário e reconhecendo a importância deste assunto para o domínio do desenvolvimento de MARE, este trabalho possui os seguintes objetivos:

1) O domínio das metodologias de caracterização eletromagnética (parâmetros S, permissividade e permeabilidade complexa) de materiais absorvedores de radiação eletromagnética. Estas metodologias são importantes nas avaliações das propriedades intrínsecas do material processado e no seu desempenho quando aplicado em alvos complexos, na faixa de frequências de 8,2 e 12,4 GHz.

2) Estudar a metodologia de avaliação de caracterização eletromagnética em guia de ondas, retangular na banda X, para obtenção dos valores de permissividade e permeabilidade complexa.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Como forma de atingir os objetivos propostos no item 1.2, este trabalho é composto dos itens seguintes, além deste item que apresenta a Introdução:

Revisão Bibliográfica reúne os conceitos e definições sobre Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética e métodos de caracterização eletromagnética, necessários para compreensão os mecanismos de interação onda-matéria.

Materiais e métodos são apresentados os materiais, equipamentos e metodologias e procedimentos utilizados nesta dissertação.

Resultados e Discussões apresenta os resultados obtidos nas medidas dos parâmetros S, energia absorvida, refletividade eletromagnética com placa metálica, permissividade e permeabilidade complexa. Este item, também correlaciona os resultados a partir das interpretações de curvas obtidas nas avaliações.

Conclusões são apresentadas as conclusões deste trabalho.

Sugestões para Trabalhos Futuros e Produção Técnico-científica gerada durante o trabalho: produção técnico-científica gerada, durante a execução do trabalho.

Referências Bibliográficas são apresentados lista todas as referências bibliográficas utilizadas e padronizadas segundo a norma ABNT NBR 6023, de agosto de 2002.

Anexos reúnem documentos e dados técnicos para uma melhor compreensão deste texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Para um melhor entendimento das propriedades eletromagnéticas dos MARE é apresentada uma revisão bibliográfica dos princípios e fundamentos físicos e químicos que envolvem este assunto. Neste item, são abordados os conceitos de propagação da onda eletromagnética, parâmetros S, metodologias de caracterização eletromagnética, permissividade e permeabilidade complexas e materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE).

2.2 PROPAGAÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA

2.2.1 Conceito de Campo

Entende-se por campo um conjunto de valores assumidos por uma quantidade física em vários pontos de uma região do espaço, em vários instantes de tempo. Tanto a região do espaço como os intervalos de tempo podem ser finitos ou infinitos em extensão. Uma teoria física de campo é composta de leis físicas que fornecem as relações entre os campos fontes e os resultantes. A teoria eletromagnética é uma teoria de campo, e cujas leis válidas são representadas pelas Equações de Maxwell [DINIZ; FREIRE, 1973; EDMINISTER, 1980; KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993; REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982].

As Equações de Maxwell que caracterizam o campo eletromagnético clássico são as Equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 [EDMINISTER, 1980; FRANCHITTO, 2001; KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993; REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982]:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \Leftrightarrow \nabla \times \vec{e} = -\frac{\partial \vec{d}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} \Leftrightarrow \nabla \times \vec{h} = \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} + \vec{j} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \Leftrightarrow \nabla \cdot \vec{d} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \Leftrightarrow \nabla \cdot \vec{b} = 0 \quad (2.4)$$

onde:

$\vec{E} = \vec{e}$ = intensidade de campo elétrico, em volts por metro;

$\vec{H} = \vec{h}$ = intensidade de campo magnético, em ampére por metro;

$\vec{D} = \vec{d}$ = densidade de fluxo de campo elétrico, em coulomb por metro quadrado;

$\vec{B} = \vec{b}$ = densidade de fluxo de campo magnético, em weber por metro quadrado;

$\vec{J} = \vec{j}$ = densidade de corrente elétrica, em ampére por metro quadrado;

ρ = densidade de carga elétrica, em coulomb por metro cúbico.

As relações constitutivas estabelecem ligações entre as funções vetoriais de campo e de densidade de campo. Os meios nos quais os fenômenos eletromagnéticos se processam são caracterizados no domínio da frequência por valores de permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade elétrica (σ). Os

parâmetros ε e μ são constantes complexas características do meio onde se propaga a onda eletromagnética [EDMINISTER, 1980; FRANCHITTO, 2001; KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993; REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982]. Assim, têm-se as Equações 2.5, 2.6 e 2.7:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

onde:

\vec{D} = densidade de fluxo de campo elétrico, em coulomb por metro quadrado;

\vec{E} = intensidade de campo elétrico, em volt por metro;

ε = permissividade, em faraday por metro;

\vec{B} = densidade de fluxo de campo magnético, em weber por metro quadrado;

\vec{H} = intensidade de campo magnético, em ampére por metro;

μ = permeabilidade, em henry por metro;

\vec{J} = densidade de corrente elétrica, em ampére por metro quadrado,

σ = condutividade elétrica, em siemens por metro.

2.2.2 Propagação da Onda Eletromagnética em Materiais

Uma onda do campo eletromagnético (Figura 2.1) é formada por uma onda do campo elétrico (\vec{E}) e uma onda do campo magnético (\vec{H}), que ao propagar-se pelo espaço livre tem a velocidade de $2,998 \times 10^8$ m/s, ou seja, a velocidade da luz (c) [EDMINISTER, 1980]. A onda eletromagnética tem comprimentos de onda (λ)

diferentes, variando de acordo com a frequência, sendo que λ é inversamente proporcional à frequência (f), ou seja, $\lambda = c/f$. À medida que a frequência diminui, o comprimento de onda aumenta [LANDAU, 1960; ROUSSY; PEARCE, 1995].

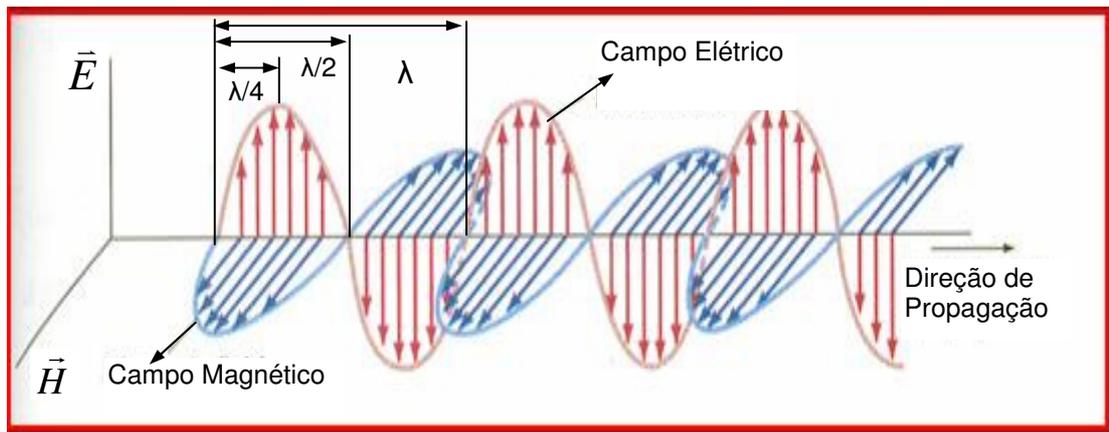


Figura 2.1 – Propagação da onda eletromagnética [EDMINISTER, 1980].

A propagação da onda eletromagnética em um meio é função da permissividade e permeabilidade complexa deste meio. [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; BUSSEY, 1967; KIM; JO; GUEON; CHOI; KIM; CHURN, 1991; NOHARA, 2003a]. Quando uma onda TEM (*Transverse Electromagnetic Mode* – transversal eletromagnética) incide em um meio, parte dessa onda é transmitida (coeficiente de transmissão) e parte é refletida (coeficiente de reflexão). Neste caso, o comprimento e a velocidade da onda que interage com o material são menores que o comprimento e a velocidade da onda no espaço livre, de acordo com as Equações 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11 [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006]. Considerando-se que no material sempre há alguma perda, haverá atenuação, conforme a Figura 2.2 [AFSAR; BIRCH; CLARKE; CHANTRY, 1986; LIMA, 2005].

$$Z = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.8)$$

$$\eta = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 376,9911\Omega \quad (2.9)$$

$$\lambda_d = \frac{\lambda_l}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (2.10)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (2.11)$$

onde:

Z = impedância intrínseca do meio, em ohms;

$\eta = Z_0$ = impedância característica do espaço livre, em ohms;

ϵ_r' = componente real da permissividade complexa relativa;

μ_0 = permeabilidade do espaço livre, em henry por metro;

ϵ_0 = permissividade do espaço livre, em faraday por metro;

λ_d = comprimento de onda no material, em metro;

λ_l = comprimento de onda no espaço livre, em metro;

v = velocidade de propagação da onda no material, em metro por segundo;

c = velocidade de propagação da onda no espaço livre, em metro por segundo.

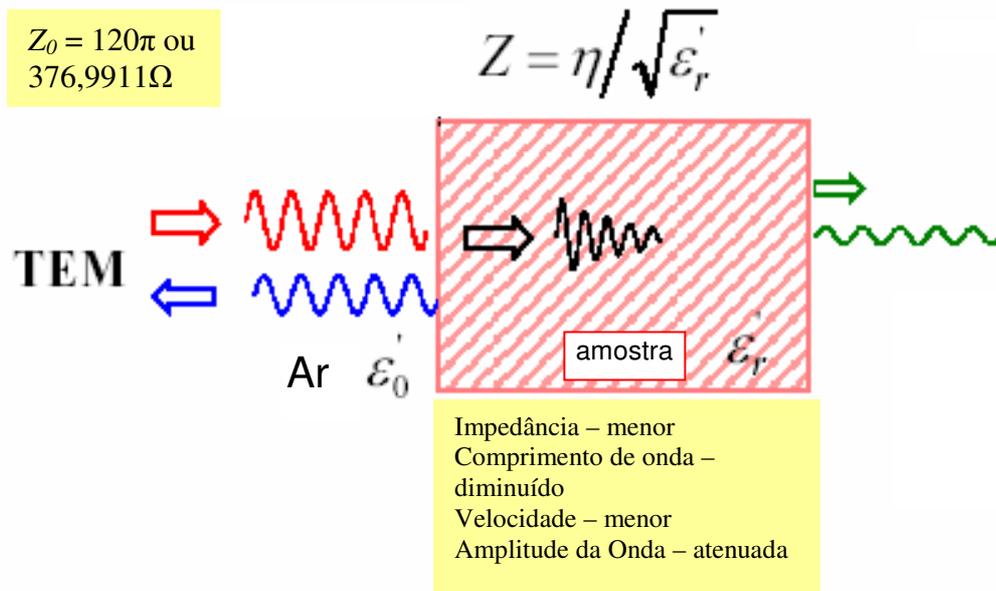


Figura 2.2 – Interação da onda eletromagnética em um material [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006].

2.3 PARÂMETROS S

Os parâmetros S foram desenvolvidos devido à necessidade de técnicas de análise de redes elétricas que operam em altas frequências e teve início em 1967, quando o *Hewlett-Packard Journal* publicou um artigo de Dick Anderson, com as colaborações de Lee Smith e Jeff Gruszynski [DICK; SMITH; GRUSZYNSKI, 1966]. Neste artigo foram definidos parâmetros de espalhamento (*scattering parameters*) que apresentam como principal vantagem, o fato de não necessitarem de conexões em curto-circuito ou em circuito aberto para serem determinados, possibilitando medidas precisas em altas frequências [CHIAMENTI, 2005].

Na caracterização eletromagnética de materiais, os parâmetros S representam as energias da onda eletromagnética refletida e transmitida pelo material. Esses parâmetros podem ser fornecidos por equipamentos que fazem análises de sinais eletromagnéticos como o analisador de espectro, analisador de

redes escalar e analisador de redes vetorial. Os parâmetros S são definidos em uma matriz que contém informações sobre as propriedades de espalhamento das ondas eletromagnéticas [BHATTACHARYYA; SENGUPTA, 1991], e apresentado na Equação 2.12.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Os parâmetros S_{11} e S_{22} representam a energia refletida e S_{12} e S_{21} a energia transmitida. A Figura 2.3 apresenta um esquema da propagação do sinal em duas portas, onde a_1 é a amplitude da onda de sinal incidente na porta 1, b_1 é a amplitude da onda de sinal refletida na porta 1, a_2 é a amplitude da onda de sinal refletida na porta 2 e b_2 e é a amplitude da onda de sinal incidente da porta 2. A fração de a_1 que é refletida da porta 1 é S_{11} ; a fração de a_1 que é transmitida da porta 1 é S_{21} . Analogamente, a fração de a_2 que é refletida da porta 2 é S_{22} ; a fração de a_2 que é transmitida da porta 2 é S_{12} .

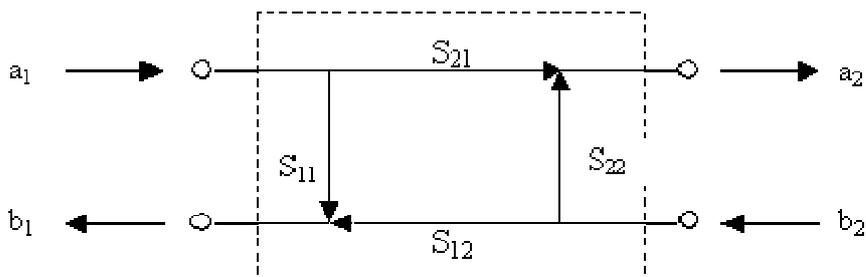


Figura 2.3 – Esquema da propagação do sinal em duas portas [LAVERGHETTA, 1988].

2.4 METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

2.4.1 Considerações Iniciais

Os métodos de caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de radiação eletromagnética envolvem, fundamentalmente, a avaliação da distribuição da energia, relacionados com a interação da onda eletromagnética com o material. De acordo com o princípio de conservação da energia, a onda eletromagnética incide no material, e sua energia pode ser totalmente ou parcialmente refletida, absorvida ou transmitida [NOHARA, 2003a], apresentado na Figura 2.4.

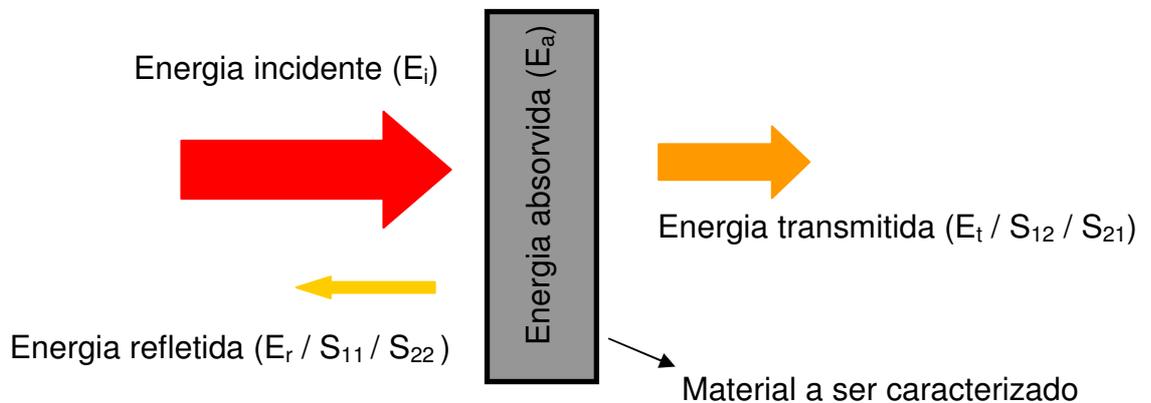


Figura 2.4 – Esquema da conservação de energia [NOHARA, 2003a].

Outra condição de caracterização eletromagnética, envolve a avaliação do coeficiente de reflexão com uma placa metálica sob o material (E_{rp}) , tendo como referência o sinal refletido pela placa metálica sem aplicação material absorvedor de radiação (Figura 2.5). Este procedimento permite avaliar a capacidade do material absorvedor diminuir a energia refletida (E_r) do metal [NOHARA, 2003a].

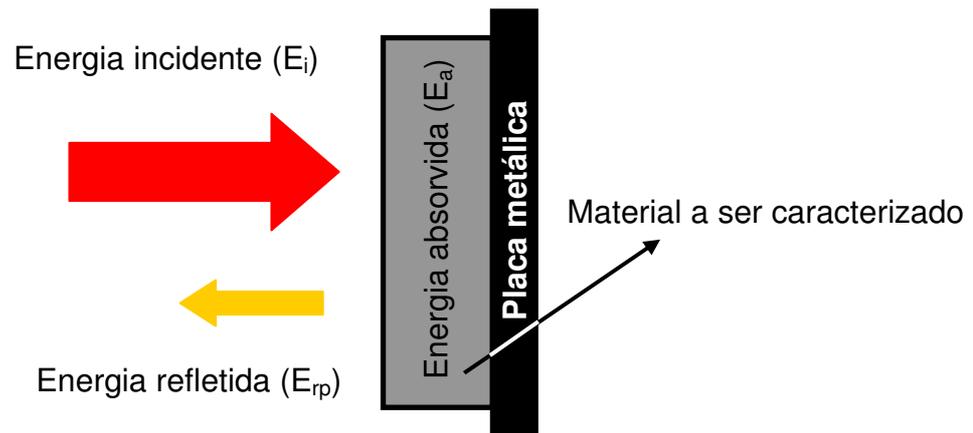


Figura 2.5 – Esquema da conservação de energia com placa metálica [NOHARA, 2003a].

2.4.2 Caracterização Eletromagnética

As metodologias utilizadas na caracterização eletromagnética de materiais são divididas em 3 tipos: Espaço Livre, Linha de Transmissão e Não convencionais, apresentado na Figura 2.6 [BUSSEY, 1967; NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD AND TECHNOLOGY, 1993; AGILENT TECHNOLOGIES, 2002; AGILENT TECHNOLOGIES, 2003; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003; ROHDE & SCHWARZ, 2004a; ROHDE & SCHWARZ, 2004b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

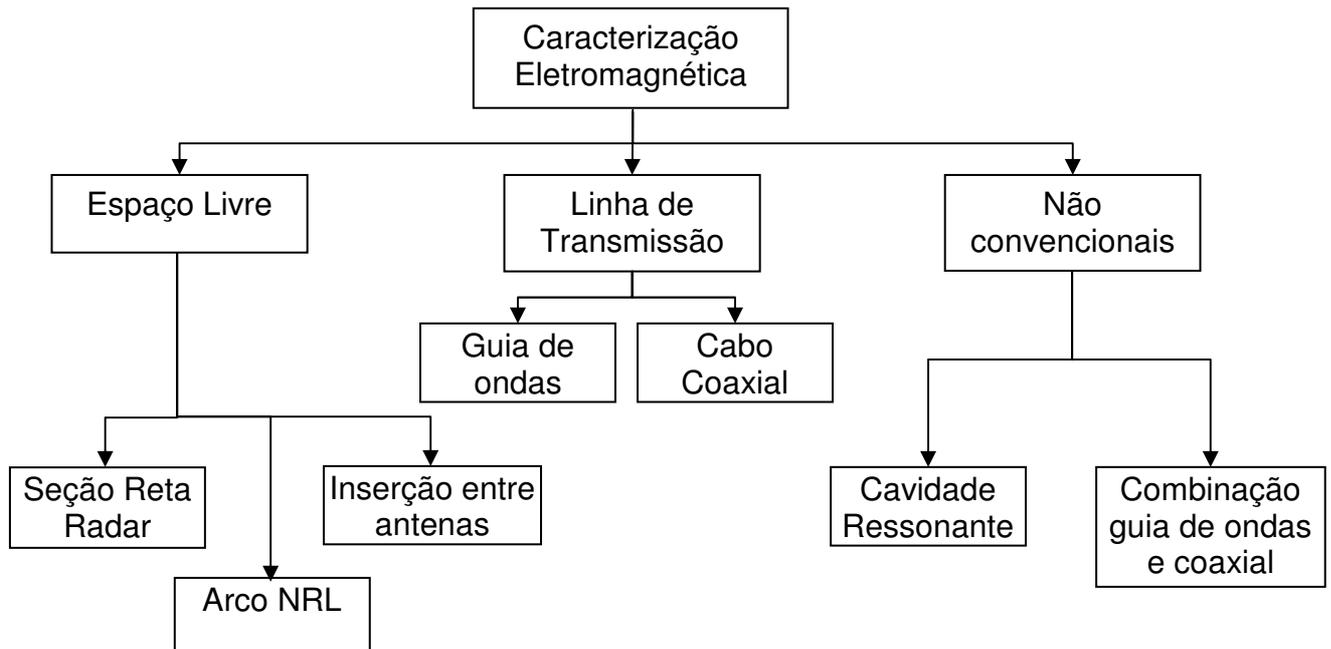


Figura 2.6 – Metodologias de caracterização eletromagnética em espaço livre, linha de transmissão e outros [BUSSEY, 1967; NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD AND TECHNOLOGY, 1993; AGILENT TECHNOLOGIES, 2002; AGILENT TECHNOLOGIES, 2003; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003; ROHDE & SCHWARZ, 2004a; ROHDE & SCHWARZ, 2004b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

Na caracterização eletromagnética do tipo Espaço Livre, os métodos Seção Reta Radar e Arco NRL, utilizam o analisador de espectro em conjunto com o gerador de sinais ou analisador de redes escalar. Esses métodos analisam a energia refletida do material em estudo, e o método de Seção Reta Radar pode ser realizado em câmara anecóica (Figura 2.7) ou em espaço livre [MIACCI; MARTIN; NOHARA; FERRAZ; REZENDE, 2001]. Esse método caracteriza-se pela mudança de ângulo de aspecto do material em estudo, em relação ao sistema de antenas T_x/R_x , que permanece fixo, em condição monoestática ou biestática [BATTACHARYYA, 1991; KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993]. Deve-se salientar que, também é utilizado na caracterização de alvos simples e complexos, quanto aos seus diagramas de espalhamento da radiação incidente.

O método do Arco NRL (Figura 2.8) pode ser utilizado em ambiente aberto ou fechado, evitando-se apenas a reflexão do solo, com a utilização de absorvedores de radiação do tipo piramidal, conforme apresentado na Figura 2.7 [SILVA, 2000; DIAS, 2001; NOHARA, 2003]. Caracteriza-se pela mudança de ângulo entre as antenas T_x/R_x (condição biestática) e o material em estudo permanece em uma posição fixa [SILVA, 2000; DIAS, 2001; NOHARA, 2003].

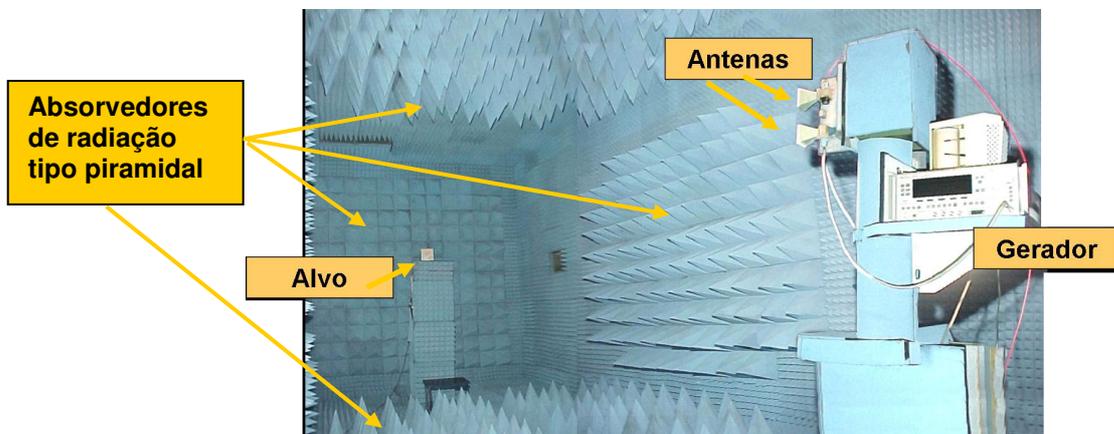


Figura 2.7 – Câmara anecóica para medidas de Seção Reta Radar [MIACCI; MARTIN; NOHARA; FERRAZ; REZENDE, 2001].

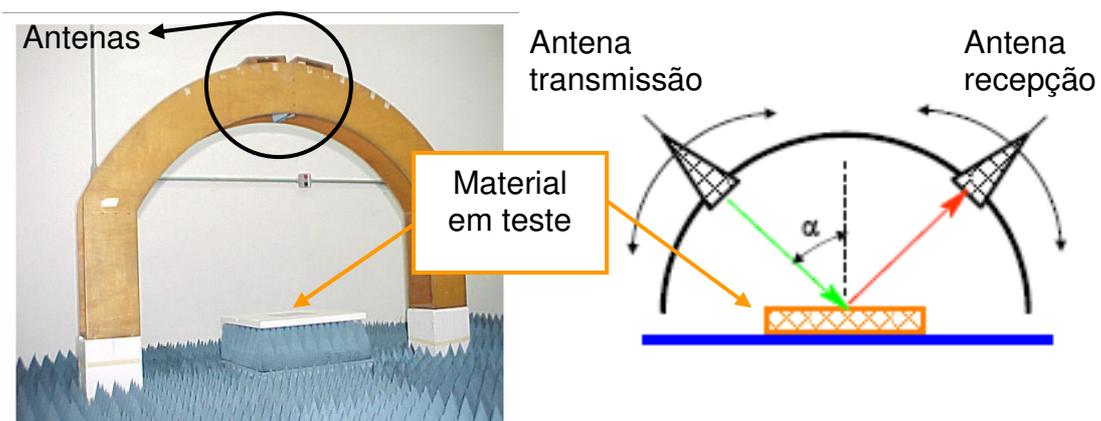


Figura 2.8 – Arco NRL utilizado para caracterização eletromagnética de MARE [DIAS, 2001; FRANCHITTO, 2001; NOHARA, 2003; SILVA, 2000].

O método de inserção entre antenas fornece o coeficiente de transmissão do material em estudo, e consiste em colocar duas antenas, uma emissora e outra receptora, apontadas para si mesma (Figura 2.9), podendo ser utilizado em campo aberto ou em câmara anecóica [KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993].

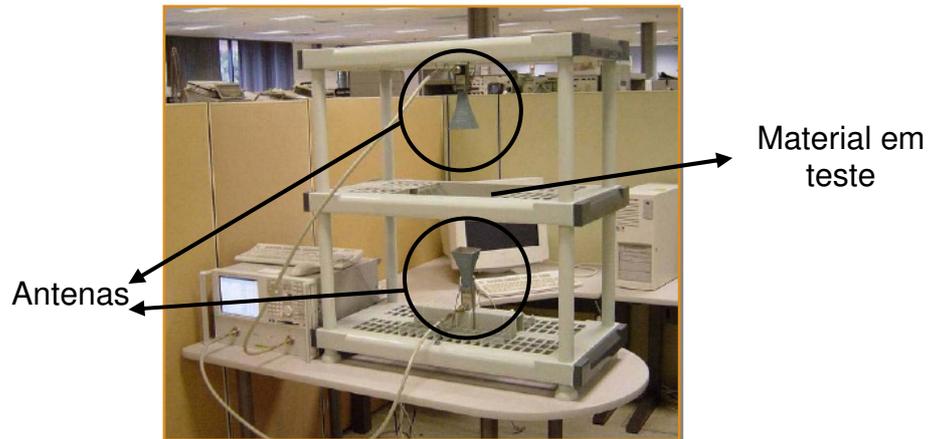


Figura 2.9 – Configuração para medida de inserção entre antenas [AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

A caracterização eletromagnética tipo Linha de Transmissão, a onda eletromagnética propaga-se em ambiente confinado, ou seja, em guia de ondas ou cabo coaxial. Nas medidas efetuadas com cabo coaxial, o material em teste é em formato toroidal, e inserido no interior do porta-amostra, como mostra a Figura 2.10.

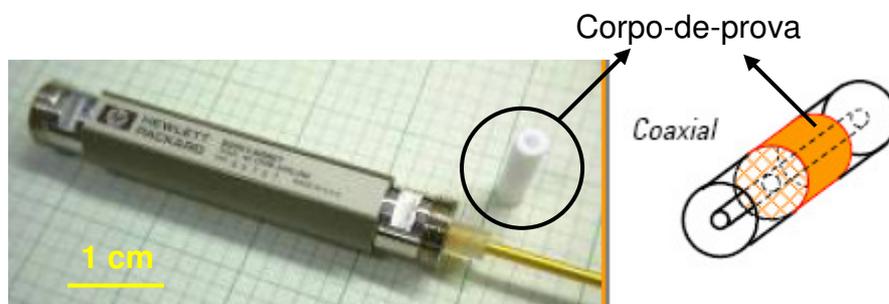


Figura 2.10 – Porta-amostra do método de medidas em cabo coaxial.

Existem outros tipos de caracterização eletromagnética, que não são apresentados, por não serem abordados neste trabalho, como por exemplo guia de ondas utilizado em conjunto com cabo coaxial, cavidade ressonante, entre outros [BUSSEY, 1967; NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD AND TECHNOLOGY, 1993; AGILENT TECHNOLOGIES, 2002; AGILENT TECHNOLOGIES, 2003; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003; ROHDE & SCHWARZ, 2004a; ROHDE & SCHWARZ, 2004b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a]. A Tabela 2.1 apresenta os principais métodos de caracterização eletromagnética de materiais.

Tabela 2.1 – Métodos de caracterização eletromagnética de materiais.

Método	Formato do material em estudo	Dimensão do material em estudo	Características
Seção Reta Radar	geometria simples geometrias complexas	câmara anecóica e espaço livre: dependente da condição de campo distante	Avaliação em diversos ângulos de aspecto do material No caso de MARE requer maior quantidade de material
Arco NRL	placas planas	placas planas com dimensões mínimas de $5\lambda \times 3\lambda$ dependente da condição de campo distante	Avaliação em diversos ângulos entre antenas T_x/R_x No caso de MARE requer maior quantidade de material em relação ao guia de ondas e cabo coaxial
Inserção entre antenas	placas planas	dependente da faixa de freqüências (tamanho das cornetas) dependente da condição de campo distante	No caso de MARE requer maior quantidade de material em relação ao guia de ondas e cabo coaxial
Guia de ondas	amostra retangular, circular ou elíptica	dependente da faixa de freqüências	Preparação do corpo-de-prova exige ferramental adequado
Cabo coaxial	amostra toroidal	dependente da geometria da conexão coaxial	Preparação do corpo-de-prova exige ferramental adequado Faixa larga de medição (100 MHz a 18 GHz)

2.4.2.1 Linha de transmissão em guia de ondas retangular

Para conduzir a energia da onda eletromagnética, entre a fonte e a carga, utilizando a caracterização eletromagnética tipo Linha de Transmissão é basicamente feita por um tubo metálico de seção retangular, circular ou elíptica, e que é denominado como guia de ondas. O dispositivo mais comumente utilizado é o guia de ondas retangular, neste trabalho, foi utilizado este método. Na fabricação é necessário alta precisão mecânica, onde a onda eletromagnética se propaga em um sistema fechado, conforme é apresentado na Figura 2.11.

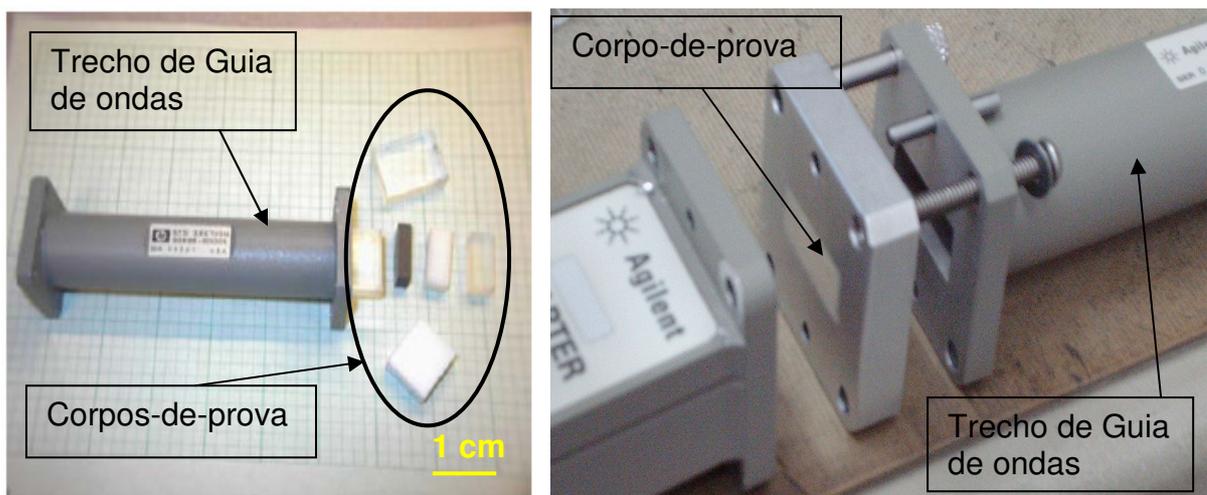


Figura 2.11 – Guia de ondas de seção retangular [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006].

Em guia de ondas é utilizado o modo dominante de propagação TE_{10} , modo fundamental, pois apresenta a frequência de corte mais baixa (f_c), desta forma tem a vantagem de ter configuração de campos mais simples. Na Figura 2.12, observa-se que a onda transversal elétrica em modo TE_{10} apresenta uma propagação na direção a do guia de ondas, e nenhuma propagação na direção b , conforme apresentado na Figura 2.12.

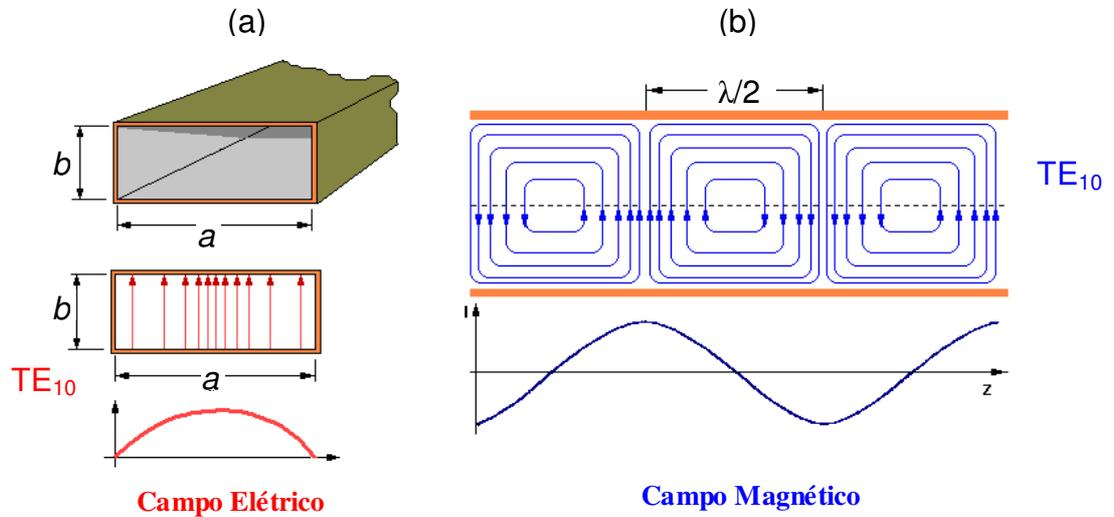


Figura 2.12 – Modo de propagação TE₁₀ em guia de ondas retangular [KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993]. (a) Seção transversal do guia de ondas, (b) Seção longitudinal do guia de ondas.

A frequência de corte (f_c) e a frequência máxima de propagação (f_m) são definidas de acordo com as dimensões do guia de ondas, conforme as Equações 2.13, 2.14 e 2.15 [DINIZ; FREIRE, 1973; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007]. É importante dimensionar o guia de ondas, de forma que exista somente um modo de propagação, a fim de evitar a presença simultânea de outros modos de propagação indesejáveis [DINIZ; FREIRE, 1973].

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2.13)$$

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (2.14)$$

$$f_m = 2f_c \quad (2.15)$$

onde:

λ_c = comprimento de onda de corte, em metro;

m = primeiro índice do modo de propagação;

n = segundo índice do modo de propagação;

a = dimensão maior da seção do guia de ondas retangular, em metro;

b = dimensão menor da seção do guia de ondas retangular, em metro;

f_c = frequência de corte, em hertz;

c = velocidade da luz no vácuo, metro por segundo;

f_m = frequência máxima, em hertz.

De acordo com as Equações 2.13, 2.14 e 2.15, a frequência de corte (f_c) e a frequência máxima (f_m) em guia de ondas retangular variam de acordo com a banda de frequências, devido aos limites mínimo e máximo de comprimento de onda, de maneira a favorecer a propagação no guia. Se a dimensão b do guia de ondas não exceder a $a/2$, o modo TE₁₀ é o único a se propagar para comprimentos de onda entre a e $2a$. Um valor mais elevado para a altura b do guia de ondas reduz a faixa de operação, e um valor menor para b aumenta as perdas no guia de ondas [DINIZ; FREIRE, 1973]. As dimensões internas do guia de ondas determinam a frequência de corte de propagação. Por exemplo, a frequência de corte para a banda X (8,2 a 12,4 GHz) em guia de ondas retangular é de 6,557 GHz, ou seja, para frequências menores a propagação é prejudicada, devido à reflexão da onda entre as paredes internas do guia de ondas, e para frequências acima da frequência máxima (13,114 GHz) é excitado modos superiores de propagação, por exemplo TE₂₀ [DINIZ; FREIRE, 1973]. A Tabela 2.2 apresenta os parâmetros eletromagnéticos de guia de ondas, de acordo com as bandas de frequências [AGILENT TECHNOLOGIES, 2002; DINIZ; FREIRE, 1973].

A utilização do guia de ondas retangular para caracterização eletromagnética requer a produção de corpos-de-prova com dimensões exatas do guia de ondas, por esse motivo exige-se um ferramental adequado. O corpo-de-prova deve preencher completamente a seção transversal do guia, de forma a não existir espaços entre o material e a parede do guia de ondas, caso contrário, ocorre erros nas medidas. No processamento de corpos-de-prova à base de matrizes poliméricas, esses devem ser vazados em moldes com as dimensões internas do guia de ondas. Após a consolidação da matriz polimérica, o corpo-de-prova deve ser desmoldado e o ajuste fino da espessura é obtido pela retificação do amteirla processado [AFSAR; BAHADOOR; WANG, 2005; KIM; KIM, 2002; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003; NOHARA; PEREIRA; REZENDE, 2006c; SINGH; BABBAR; PURI; RAZDAN; SRIVASTAVA, 1999].

Tabela 2.2 – Parâmetros eletromagnéticos de guias de onda retangular para o modo de propagação TE_{10} [AGILENT TECHNOLOGIES, 2002; DORADO INTERNATIONAL CORPORATION, 2007; PENN ENGINEERING COMPONENTES, 2007; SURPLUS SALES OF NEBRASKA, 2007].

Banda de frequências	Frequência inicial da banda, f_i (GHz)	Frequência final da banda, f_f (GHz)	Frequência de Corte, f_c (GHz)	Frequência Máxima, f_m (GHz)	Dimensões do guia	
					a (mm)	b (mm)
S	2,60	3,95	2,078	4,156	77,1	34,03
C	3,95	5,85	3,152	6,304	47,54	22,14
X	8,20	12,40	6,557	13,114	22,86	10,16
Ku	12,40	18,00	9,487	18,974	15,80	7,90
K	18,00	26,50	14,047	28,094	10,67	4,32
Ka	26,50	40,00	21,053	42,106	7,12	3,56

2.5 PERMISSIVIDADE E PERMEABILIDADE

As medidas das componentes complexas da permissividade e da permeabilidade são importantes para pesquisas das características eletromagnéticas de materiais e para possibilitar aplicações científicas e industriais. O desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética implica no conhecimento de suas propriedades, tais como: a permissividade complexa (ϵ^*) e a permeabilidade complexa (μ^*) em função da frequência [FAEZ; REZENDE; MARTIN; DE PAOLI, 2000; KIM; JO; GUEON; CHOI; KIM; CHURN, 1991]. Conhecendo-se estes parâmetros é possível inferir sobre as propriedades de absorção, além de se poder alterar a formulação do material para se obter o melhor desempenho [FAEZ; REZENDE; MARTIN; DE PAOLI, 2000].

2.5.1 Permissividade complexa

Um material é denominado dielétrico se tiver a capacidade de armazenar a energia de um campo elétrico externo [BALANIS, 1989]. Um exemplo do uso de material dielétrico é a obtenção de componentes eletrônicos, como o capacitor. O capacitor é formado por duas placas condutoras paralelas separadas por um material dielétrico que tem a função de armazenar energia, quanto maior a capacitância, maior a capacidade do capacitor em armazenar energia. Desta forma, pela análise dimensional da permissividade obtém-se a unidade faraday por metro (Equação 2.16), ou seja, capacidade de armazenamento de energia do material em

teste por comprimento t que o campo elétrico interage, como apresenta a Figura 2.13 [BALANIS, 1989; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003].

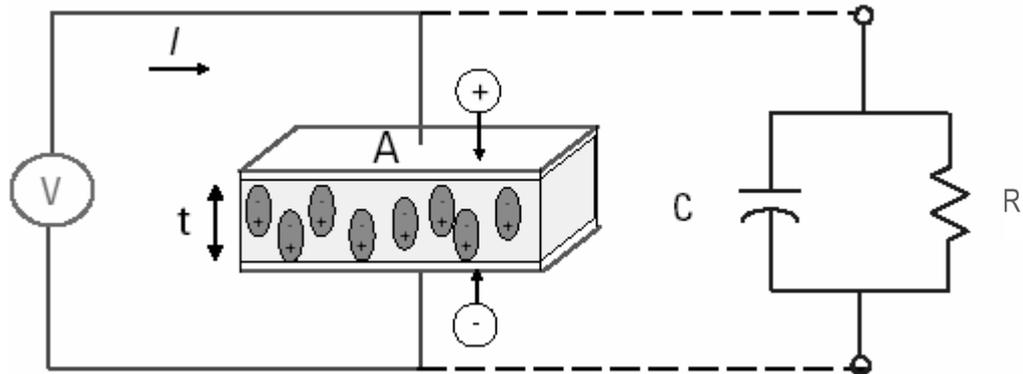


Figura 2.13 – Energia armazenada em um capacitor e circuito equivalente [BALANIS, 1989; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003].

A constante dielétrica no espaço livre ou no vácuo é obtida pela Equação 2.16 [EDMINISTER, 1980]:

$$\epsilon = \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \approx \frac{10^{-9} F}{36\pi m} \quad (2.16)$$

onde:

ϵ_0 = permissividade do vácuo, em faraday por metro;

Para os meio, que não seja o vácuo, a permissividade relativa, denominada também de constante dielétrica do meio em questão, é definida como a relação entre a permissividade complexa (ϵ^*) e a permissividade do vácuo (ϵ_0) [EDMINISTER, 1980; KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993], apresentada na Equação 2.17.

$$\epsilon_r^* = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \right) - j \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \right) \quad (2.17)$$

onde:

ϵ_r^* = permissividade complexa relativa;

ϵ^* = permissividade complexa, em faraday por metro;

ϵ_0 = permissividade do vácuo;

ϵ_r' = componente real da permissividade complexa relativa;

ϵ_r'' = componente imaginária da permissividade complexa relativa;

ϵ' = componente real da permissividade complexa, em faraday por metro;

ϵ'' = componente imaginária da permissividade complexa, em faraday por metro.

A componente real da permissividade complexa relativa (ϵ_r') é medida como a energia do campo externo, que é armazenada no material. A componente imaginária da permissividade complexa relativa (ϵ_r'') é a medida da energia dissipada, sendo que ϵ_r'' é sempre maior que zero, e é geralmente muito menor do que ϵ_r' [BALANIS, 1989; NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003; HIPPEL, 1954].

Analisando-se um material absorvedor de radiação eletromagnética, tem-se que quanto maior é a componente imaginária da permissividade complexa, maiores são as perdas impostas à onda incidente. O sinal negativo da permissividade complexa ($\epsilon_r' - \epsilon_r''$) significa que o meio é dissipativo [AGILENT TECHNOLOGIES, 2003; BISCARO, R. S.; BOTELHO; TAKAHASHI; FAEZ; REZENDE, 2002; FAEZ; REZENDE; MARTIN; DE PAOLI, 2000; KRAUS; CARVER, 1978; NOHARA, 2003a].

Em materiais absorvedores de radiação eletromagnética, a condutividade elétrica e a permissividade complexa não são constantes em toda a faixa de frequências. Esses parâmetros podem mudar com a frequência, temperatura, formulação, pressão e estrutura molecular dos materiais [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; FAEZ; REZENDE; MARTIN; DE PAOLI, 2000].

2.5.2 Permeabilidade complexa

A permeabilidade complexa descreve a interação do material com o campo magnético [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; BALANIS, 1989]. Uma análise similar pode ser feita com um indutor com uma resistência para representar a perda central de um material magnético, como apresenta a Figura 2.14. Ao se aplicar uma fonte de corrente elétrica constante através das placas de um indutor, a indutância gerada pode ser relacionada com a permeabilidade complexa, ou seja, a capacidade do material de interagir com o campo magnético, como apresenta a Figura [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; BALANIS, 1989].

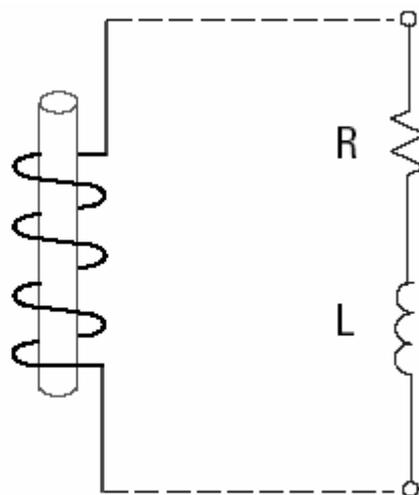


Figura 2.14 – Indutor e circuito equivalente [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006].

A constante de interação do campo magnético com o meio, no espaço livre ou no vácuo, é dada pela Equação 2.18 [EDMINISTER, 1980, CULLITY, 1972]:

$$\mu = \mu_0 = 1,256 \times 10^{-6} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (2.18)$$

onde:

μ = permeabilidade, em henry por metro;

μ_0 = permeabilidade do vácuo, em henry por metro.

Para outro meio diferente do vácuo, é definido como permeabilidade relativa do meio em questão [EDMINISTER, 1980; REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982]. A permeabilidade complexa relativa (μ_r^*) consiste da componente real (μ_r'), que representa o termo de armazenamento de energia e a componente imaginária que representa o termo de dissipação de energia [KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993; ROBERTS, 1960]. A permeabilidade complexa relativa (μ_r^*) é a razão entre a permeabilidade complexa (μ^*) e a permeabilidade do vácuo (μ_0), apresentada na Equação 2.19.

$$\mu_r^* = \frac{\mu^*}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r'' = \left(\frac{\mu'}{\mu_0} \right) - j \left(\frac{\mu''}{\mu_0} \right) \quad (2.19)$$

onde:

μ_r^* = permeabilidade complexa relativa;

μ_0 = permeabilidade do espaço livre, em henry por metro;

μ_r' = componente real da permeabilidade complexa relativa;

μ_r'' = componente imaginária da permeabilidade complexa relativa;

μ' = componente real da permeabilidade complexa, em henry por metro;

μ'' = componente imaginária da permeabilidade complexa, em henry por metro.

O comportamento de um absorvedor magnético é atribuído, entre outros fatores, ao mecanismo natural de ressonância magnética. A ressonância magnética natural é o principal mecanismo de perda do material absorvedor à base de materiais magnéticos, como as ferritas de microondas [SINGH; BABBAR; RAZDAN; SRIVASTAVA; PURI, 1999].

2.5.3 Modelo Nicolson-Ross

Este modelo de cálculo é o mais adequado para materiais magnéticos e fornece valores de permissividade e de permeabilidade complexas. O método de Nicolson e Ross (NR) não é adequado para materiais com baixas perdas e espessuras do material em estudo equivalentes a múltiplos de meio comprimento de onda da espessura elétrica em função da frequência [NICOLSON; ROSS, 1970]. Para evitar este problema, procura-se medir corpos-de-prova com espessuras inferiores a meio comprimento de onda da espessura elétrica [NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD AND TECHNOLOGY, 1993].

O método NR aplica cálculos a valores obtidos dos parâmetros S (S_{21} e S_{11}) no domínio do tempo. Com este método é possível obter os valores da permissividade e da permeabilidade complexas em função dos Parâmetros S [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD TECHNOLOGY, 1993]. Com os parâmetros S_{11} e S_{21} calcula-se o coeficiente de reflexão (Γ) utilizando-se as Equações 2.20 e 2.21 e, posteriormente, o coeficiente de transmissão (T), a partir das Equações 2.22 e 2.23.

$$S_{11} = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (2.20)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (2.21)$$

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2.22)$$

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} + 1} \quad (2.23)$$

onde:

S_{11} = energia refletida, em decibel;

S_{21} = energia transmitida, em decibel;

Γ = coeficiente de reflexão;

T = coeficiente de transmissão;

Z = impedância intrínseca do meio de propagação, em ohms.

2.5.4 Critérios de dimensionamento dos corpos-de-prova para medidas de permissividade e permeabilidade

A espessura do corpo-de-prova para medidas de permissividade e permeabilidade complexas é determinada pelo comprimento de onda (λ) da onda eletromagnética. A Figura 2.15 (a) mostra um corpo-de-prova utilizado em guia de ondas retangular, onde a é a dimensão maior, b a dimensão menor e c o sentido de propagação da onda eletromagnética. A dimensão c do corpo-de-prova deve ser tal que contenha no mínimo 20° ($\lambda/18$) da fase de um comprimento de onda λ (Figura

2.15 (b)), mas idealmente 180° ($\lambda/2$) da fase de um comprimento de onda λ (Figura 2.15 (c)) [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a, NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003].

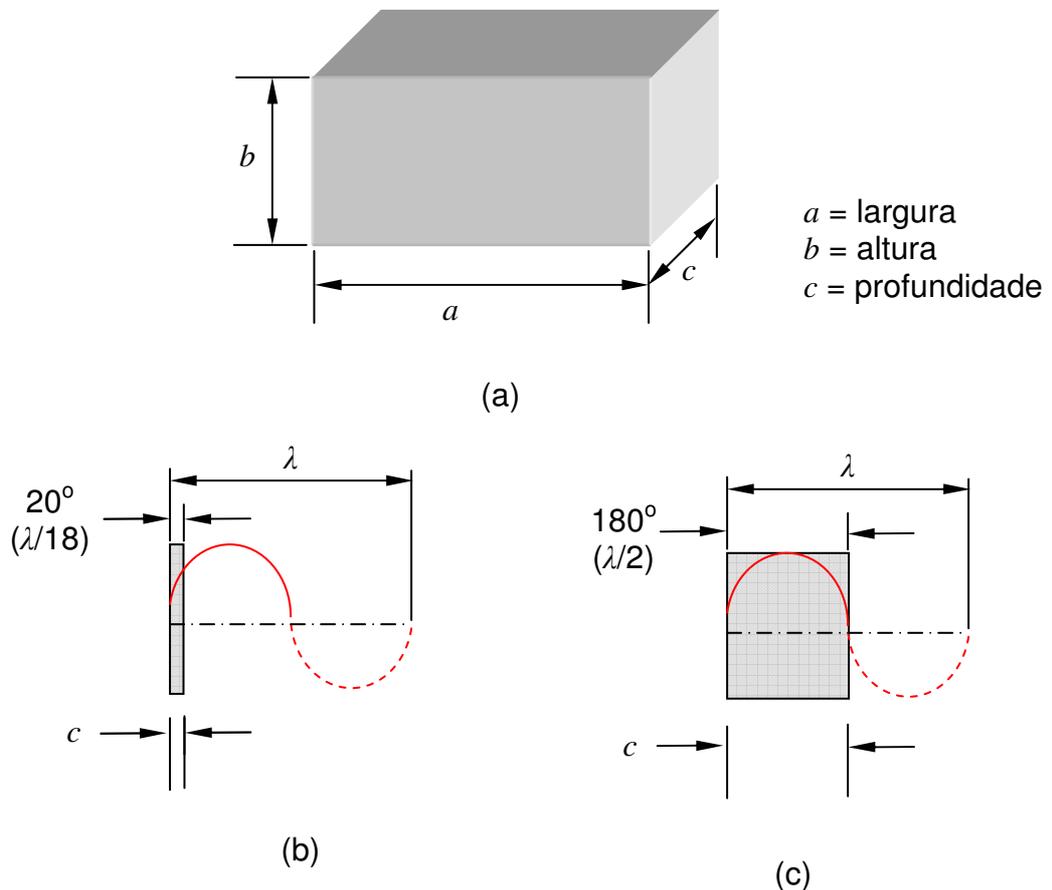


Figura 2.15 – Dimensionamento do corpo-de-prova para medidas de permissividade e permeabilidade complexas: (a) dimensões do volume. (b) espessura com 20° ($\lambda/18$) da fase de um comprimento de onda, (c) espessura com 180° ($\lambda/2$) da fase de um comprimento de onda [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

A espessura do corpo-de-prova para conter uma determinada quantidade da fase da onda eletromagnética é determinada pela espessura elétrica. A espessura elétrica é calculada pelo comprimento de onda guiada (λ_g), apresentada na Equação 2.24 [DINIZ; FREIRE, 1973; AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_x}{\sqrt{\epsilon_r' \mu_r' - \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (2.24)$$

onde:

λ_x = Comprimento de onda da frequência de interesse, em metro;

λ_c = Comprimento de onda de corte, em metro;

ϵ_r' = Componente real da permissividade complexa relativa do meio;

μ_r' = Componente real da permeabilidade complexa relativa do meio.

Para o cálculo do comprimento de onda da frequência de interesse, utiliza-se a Equação 2.25:

$$\lambda_x = \frac{c}{f_x} \quad (2.25)$$

onde:

c = velocidade da luz no vácuo $\approx 2,998.10^8$ m/s;

f_x = frequência de interesse, em hertz.

Para o cálculo do comprimento de onda de corte, utiliza-se a Equação 2.26:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} \quad (2.26)$$

onde:

f_c = frequência de corte, em gigahertz (definidos na Tabela 2.2).

O dimensionamento do porta-amostra para a caracterização eletromagnética utiliza o comprimento de onda da frequência principal da banda (λ_o) ao invés de λ_x na Equação 2.24, e obtido pelas Equações 2.27 e 2.28 [AGILENT TECHNOLOGIES, 2007b].

$$\lambda_o = \frac{c}{f_o} \quad (2.27)$$

$$f_o = \sqrt{f_i f_f} \quad (2.28)$$

onde:

f_o = frequência principal da banda, em gigahertz;

f_i = frequência inicial da banda, em gigahertz (definido na Tabela 2.2);

f_f = frequência final da banda, em gigahertz (definido na Tabela 2.2).

Para medidas de permissividade e permeabilidade complexas utilizando o modelo Nicolson-Ross é necessário atender aos critérios a seguir [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; AGILENT TECNOLOGIES, 2007a]:

1) As dimensões do corpo-de-prova devem atender às dimensões internas do porta-amostra adotado para as medidas, sendo que as superfícies do corpo-do-prova devem ser paralelas. Quando o corpo-de-prova não é perfeitamente acondicionado no porta-amostra, podem ocorrer erros nas medidas dos parâmetros S, devido à propagação da onda eletromagnética pelas imperfeições entre o corpo-de-prova e as dimensões internas do guia de ondas.

2) A espessura máxima do corpo-de-prova, dimensão c (Figura 2.15), é limitada pelo comprimento de onda que causa o cancelamento de fase da onda

eletromagnética em $\lambda_g/2$, ou seja, 180° da fase da onda eletromagnética. As medidas efetuadas com corpos-de-prova com espessura próxima de $\lambda_g/2$ provocam erros no cálculo dos valores de permissividade e permeabilidade complexa, devido ao cancelamento de fase da onda eletromagnética entre a onda refletida na superfície frontal do corpo-de-prova e a superfície traseira. Este cancelamento provoca uma diminuição nos valores do parâmetro S_{11} ou S_{22} , ou seja, o cancelamento de fase gera valores não intrínsecos ao material. Uma vez que, se exigem os parâmetros intrínsecos na rotina de cálculo para obtenção dos valores de permeabilidade e permissividade, o cancelamento de fase gera erros.

3) A espessura ótima do corpo-de-prova (dimensão c) é igual a $\lambda_g/4$, ou seja, 90° de fase do comprimento de onda guiado no interior do corpo-de-prova.

4) O modelo Nicolson-Ross é mais eficiente quando utilizado para caracterização eletromagnética de materiais magnéticos.

2.5.4.1 Medidas do Poli(difluoroetileno) - Teflon[®] utilizando Nicolson-Ross

A Figura 2.16 da literatura apresenta o gráfico da componente real da permissividade relativa do poli(difluoroetileno) com espessura igual a 0,1 polegada (Figura 2.16(a)) e 0,5 polegada (Figura 2.16(b)), na faixa de frequências entre 2 e 18 GHz [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006 AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a]. Nesse experimento foi utilizado guia coaxial e o *software* Agilent 85071E, baseado no algoritmo de Nicolson-Ross.

Pode-se observar pela Figura 2.16 (a) que os valores de permissividade complexa permanecem aproximadamente constantes na faixa de frequências compreendidas entre 2-18 GHz ($\epsilon_r' \sim 2$). Nesse caso, o valor de S_{11} não se aproxima de zero, isto é, não há efeito de cancelamento de fase da onda eletromagnética, como descrito anteriormente em “Critérios de medidas de permissividade e permeabilidade complexa utilizando o modelo Nicolson-Ross”, item 2. O gráfico da Figura 2.16 (b) mostra valores de permissividade complexa com erros no intervalo de 7 a 9 GHz e de 16 a 18 GHz. Estes erros devem-se aos valores de S_{11} que se aproximam de zero nesses intervalos de frequências.

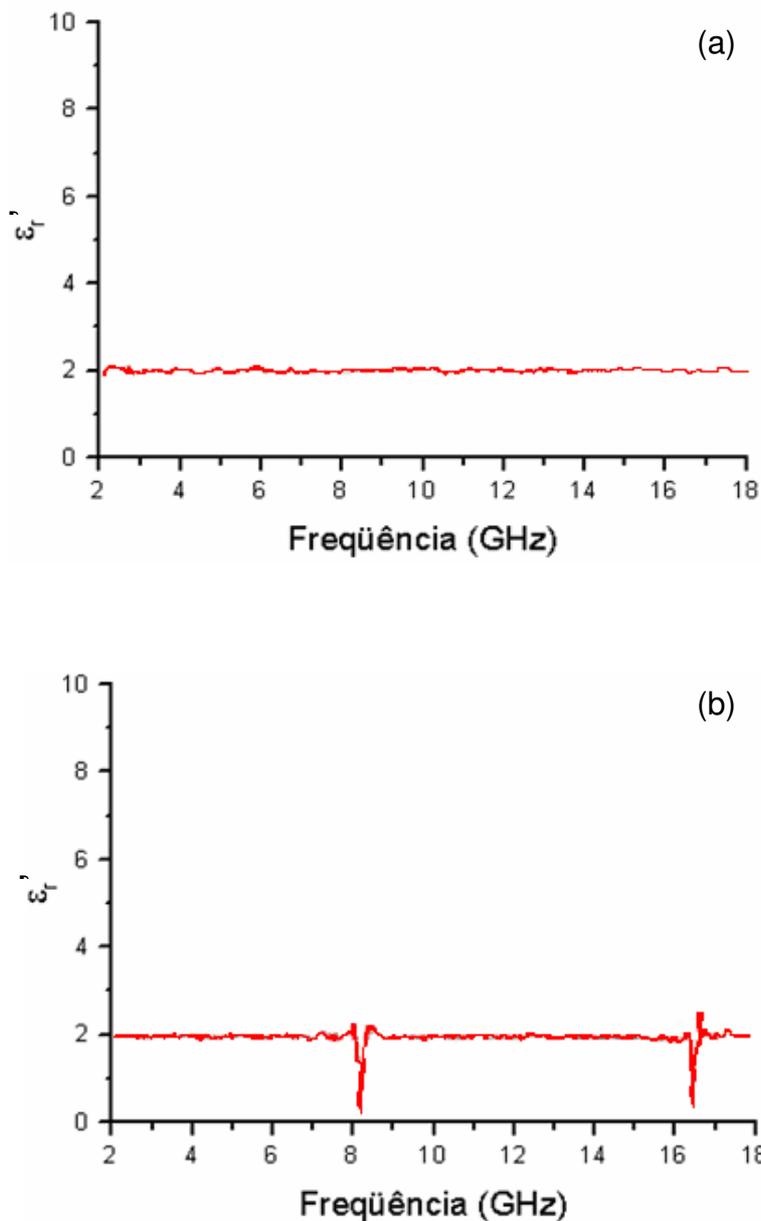


Figura 2.16 – Medida da componente real da permissividade complexa relativa de um corpo-de-prova de poli(tetrafluoretileno) na faixa de freqüências de 2 a 18 GHz, com espessuras iguais a (a) 0,1 polegada e (b) 0,5 polegada [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

O polímero poli(difluoroetileno) possui valores de $\epsilon_r' = 2,03$, $\epsilon_r'' = 0,0008$, $\mu_r' = 1,00$ e $\mu_r'' = 0,00$ para a freqüência de 10 GHz, sendo que a variação desses valores é da ordem de 1% para as outras freqüências na banda X [AGILENT

TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a; HIPPEL, 1954; NICOLSON; ROSS, 1970; WEIR, 1974].

2.6 MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

2.6.1 Introdução

Os MARE são baseados na combinação de compostos com características magnéticas e dielétricas particulares. Historicamente, seu desenvolvimento teve início na década de 30, como detalhado no Anexo 1. Esses podem ser divididos em absorvedores baseados em aditivos dielétricos e absorvedores baseados em aditivos magnéticos ou, ainda, pela combinação de ambos, denominados absorvedores híbridos [LEE, 1991; REZENDE; MARTIN; MIACCI; NOHARA, 2001].

Quando uma onda eletromagnética incide em um MARE, tanto dielétrico como magnético, as estruturas química e física do material possuem mecanismos internos que convertem a energia da onda eletromagnética em calor. Os mecanismos são distintos quando os materiais dielétricos e magnéticos são comparados, mas o resultado final dessa conversão é o mesmo para ambos os casos: calor [NOHARA; MIACCI; PEIXOTO; MARTIN; REZENDE, 2003b; REZENDE; MARTIN; MIACCI; NOHARA, 2001]. O Anexo 2, apresenta os principais mecanismos de atenuação da energia da onda eletromagnética.

2.6.2 MARE baseados em aditivos dielétricos

Os materiais dielétricos possuem cargas dominantes em seus átomos e moléculas, positivas e negativas, e são mantidas em posição fixa por forças atômicas e moleculares, impedindo assim, que as cargas fiquem livres. Entretanto, quando um campo elétrico é aplicado em um dielétrico ocorre a formação de vários dipolos, que se alinham conforme a orientação do campo elétrico aplicado [BALANIS, 1989; OLMEDO; HOURQUEBE; JOUSSE, 1977]. Quando um material é submetido a um campo elétrico, os dipolos resultantes da polarização interagem com o campo elétrico aplicado, em materiais dielétricos esta interação faz com que ocorra um armazenamento de energia potencial elétrica, que pode ser transformada em calor por efeito Joule, como ocorre com MARE [NOHARA; MIACCI; PEIXOTO; MARTIN; REZENDE, 2003b].

Dentre os aditivos disponíveis comercialmente na formulação de absorvedores de radiação eletromagnética dielétricos, o negro de fumo é um dos mais utilizados comercialmente por suas características físicas, como alta área superficial e condutividade elétrica. Essas características permitem a atenuação da radiação eletromagnética incidente transformando-a em calor [BOTELHO; TAKAHASHI; FAEZ; REZENDE, 2002; NOHARA; MIACCI; PEIXOTO; MARTIN; REZENDE, 2003b].

Os absorvedores baseados em aditivos dielétricos são obtidos com diferentes tipos de matrizes poliméricas, podendo essas ser polímeros rígidos ou flexíveis, nas formas de mantas ou espumas [LEE, 1991; SILVA, 2000]. O conhecimento da tecnologia de processamento de materiais, por meio da combinação dos componentes, aditivos e matrizes poliméricas, com adequados

valores de constantes dielétricas e de tangente de perdas, é decisivo na aplicação final do produto, fazendo com que a sua função varie de bons transmissores a bons absorvedores de radiação. Por exemplo, uma estrutura com espessura pré-definida pode ser projetada com características de transmissão máxima, pela seleção da constante dielétrica adequada dos materiais empregados na sua preparação, para uma determinada banda de frequências de utilização. Por exemplo, em projetos de antena de microfita, a eficiência de irradiação está diretamente ligada ao menor valor de tangente de perdas do substrato de microondas [NASCIMENTO; MORAES; SCHILDBERG; LACAIVA, 2006].

Em estudo recente, Biscaro apresenta [BISCARO, 2006] um revestimento eletricamente condutor à base de blendas de poliuretano (PU) e polianilina (PAni) dopada, para aplicação como MARE, baseado na variação de condutividade empregando diferentes condições de síntese e diferentes métodos de dopagem do polímero condutor.

2.6.3 MARE baseados em aditivos magnéticos

Os MARE baseados em aditivos magnéticos são obtidos, principalmente, a partir de óxidos cerâmicos (ferritas) e outros materiais magnéticos (por exemplo, ferro carbonila), pelo fato desses aditivos apresentarem absorção na faixa de microondas. O processamento dos absorvedores magnéticos é realizado pela adição de partículas magnéticas em uma matriz polimérica, de maneira similar aos MARE dielétricos, que utilizam cargas dielétricas [LEE, 1991; ROBERTS, 1960].

Os mecanismos de absorção das ondas eletromagnéticas pelos absorvedores magnéticos são mais complexos em relação aos materiais dielétricos, pois os materiais magnéticos interagem com os campos magnético e elétrico da

onda eletromagnética, resultando no fenômeno de polarização magnética (alinhamento dos dipolos magnéticos), desta forma esses materiais apresentam perdas dielétricas e magnéticas [BALANIS, 1989].

2.6.3.1 Ferrocarbonila

A ferrocarbonila ou ferrocarrbonilo, é constituída de ferro com pureza entre 97,0 e 99,5%, produzida pela decomposição térmica da ferro pentacarbonila ou ferro zero pentacarbonila $\text{Fe}(\text{CO})_5$. O composto ferro pentacarbonila é denominada em inglês *iron carbonyl* ou *iron pentacarbonyl*, com número 13462-40-6 registrado no *Chemical Abstracts Service - CAS* [BAHADOOR; WANG; AFSAR, 2005; WIKIPEDIA, 2007a]. O composto $\text{Fe}(\text{CO})_5$ é um líquido inflamável, tóxico, solúvel na maioria dos solventes orgânicos e se decompõe na presença de luz visível. É utilizado em aplicações no setor petrolífero e como fonte para produção de ferro de alta pureza [BOMBARD, 2005]. O modelo tridimensional barra e bola do composto $\text{Fe}(\text{CO})_5$ é apresentado na Figura 2.17.

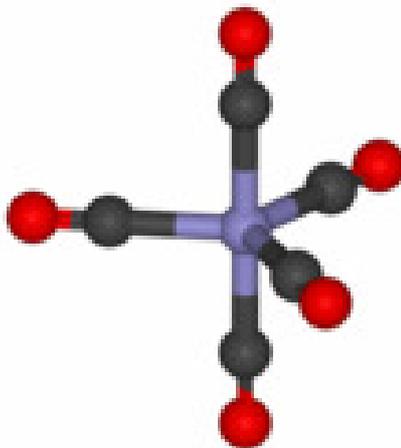


Figura 2.17 – Representação tridimensional do modelo barra e bola da ferrocarbonila $\text{Fe}(\text{CO})_5$ (vermelho - oxigênio, preto - carbono e roxo – ferro) [WIKIPEDIA, 2007a].

A ferrocarbonila ou ferrocarbonilo é denominada em inglês como *carbonyl iron powder* (CIP), *ferronyl iron* ou *carbonyl Fe powder* pelos fabricantes BASF Corporation, ISP Corporation, Reade Advanced Materials [BASF CORPORATION, 2007; READE, 2007; WU; DING; JIANG; CHEN; ONG, 2004; WIKIPEDIA, 2007b]. A empresa BASF no Brasil utiliza indistintamente os termos ferrocarbonila ou ferrocarbonilo para o produto da decomposição do ferro pentacarbonila [BASF CORPORATION, 2007]. Uma vez que, o precursor possui o grupo químico carbonila (CO), a utilização do termo ferrocarbonila foi consagrada na indústria. Por exemplo, o mesmo ocorre com o polímero poli(etileno), cujo nome estabelecido pelas regras da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) é poli(metileno). Uma vez que, o precursor do poli(etileno) é o etileno, consagrou-se a utilização do nome do precursor. O presente trabalho utiliza o termo “ferropentacarbonila” para denominar o precursor da “ferrocarbonila” ou “ferrocarbonilo”.

A ferrocarbonila possui registro CAS 7439-89-6, sendo o registro para o elemento químico ferro, com porcentagem em massa de ferro acima de 97%. A ferrocarbonila é vendida em forma de pó, com partículas na forma, aproximadamente, esférica e tamanho de partícula entre 3 – 20 μm , massa específica de 7,8 g/cm^3 e com presença dos elementos químicos nitrogênio (0,01% - 1% em massa) e oxigênio (0,2 – 0,7% em massa) na sua composição química [BASF CORPORATION, 2007; BAHADOOR; WANG; AFSAR, 2005; READE ADVANCED MATERIALS, 2006].

É um material magnético, com propriedades de absorção da energia da onda eletromagnética na faixa de frequências compreendidas entre 1 – 30 GHz [NOHARA, 2002]. Sua estrutura física é composta por uma arquitetura do tipo cebola, isto é, camadas sobrepostas (Figura 2.18 (a) – vista da seção transversal).

Sua estrutura química está esquematizada na Figura 2.18 (b), onde se pode observar a presença de regiões compostas de Fe- α (magnéticas e condutoras), e regiões dispostas radialmente compostas de Fe $_x$ N e Fe $_x$ C (não magnéticas e não condutoras) [NOHARA, 2002]. Os domínios magnéticos possuem tamanho médio em torno de 0,01 μ m, inferiores em relação às ferritas de microondas (em torno de 0,1 – 1,0 μ m) [NOHARA, 2002].

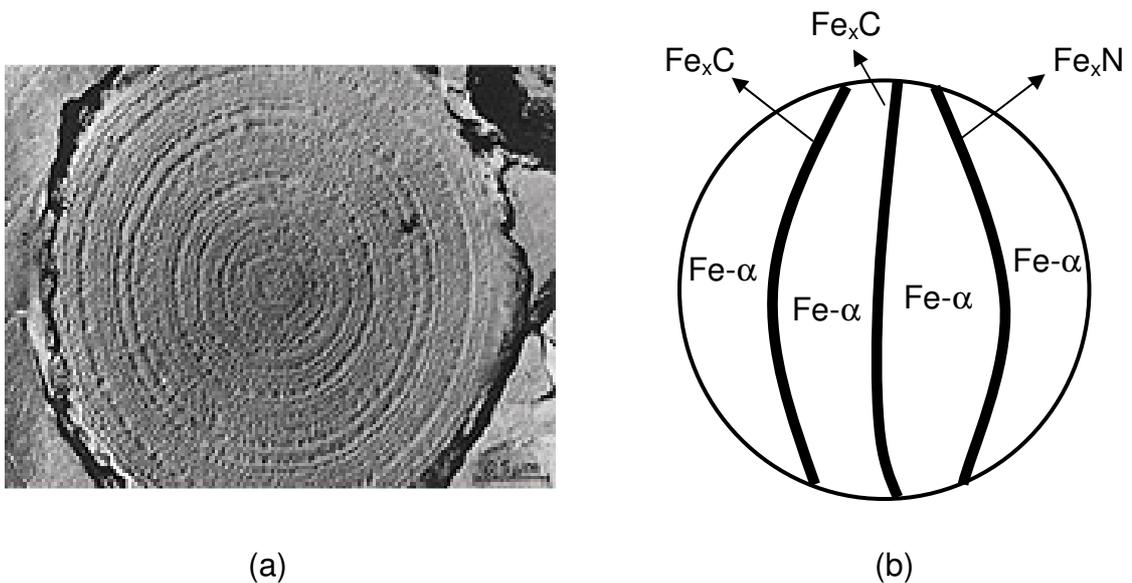


Figura 2.18 – Estrutura física (a) e química (b) da ferrocarbonila. (a) seção transversal mostrando a estrutura tipo cebola. (b) regiões compostas de Fe- α (magnéticas e condutoras) e regiões dispostas radialmente compostas de Fe $_x$ N e Fe $_x$ C (não magnéticas e não condutoras) [NOHARA, 2002].

O fluxograma da Figura 2.19 apresenta uma visão geral do processo de produção da ferrocarbonila a partir do ferro e monóxido de carbono [BASF CORPORATION, 2007].

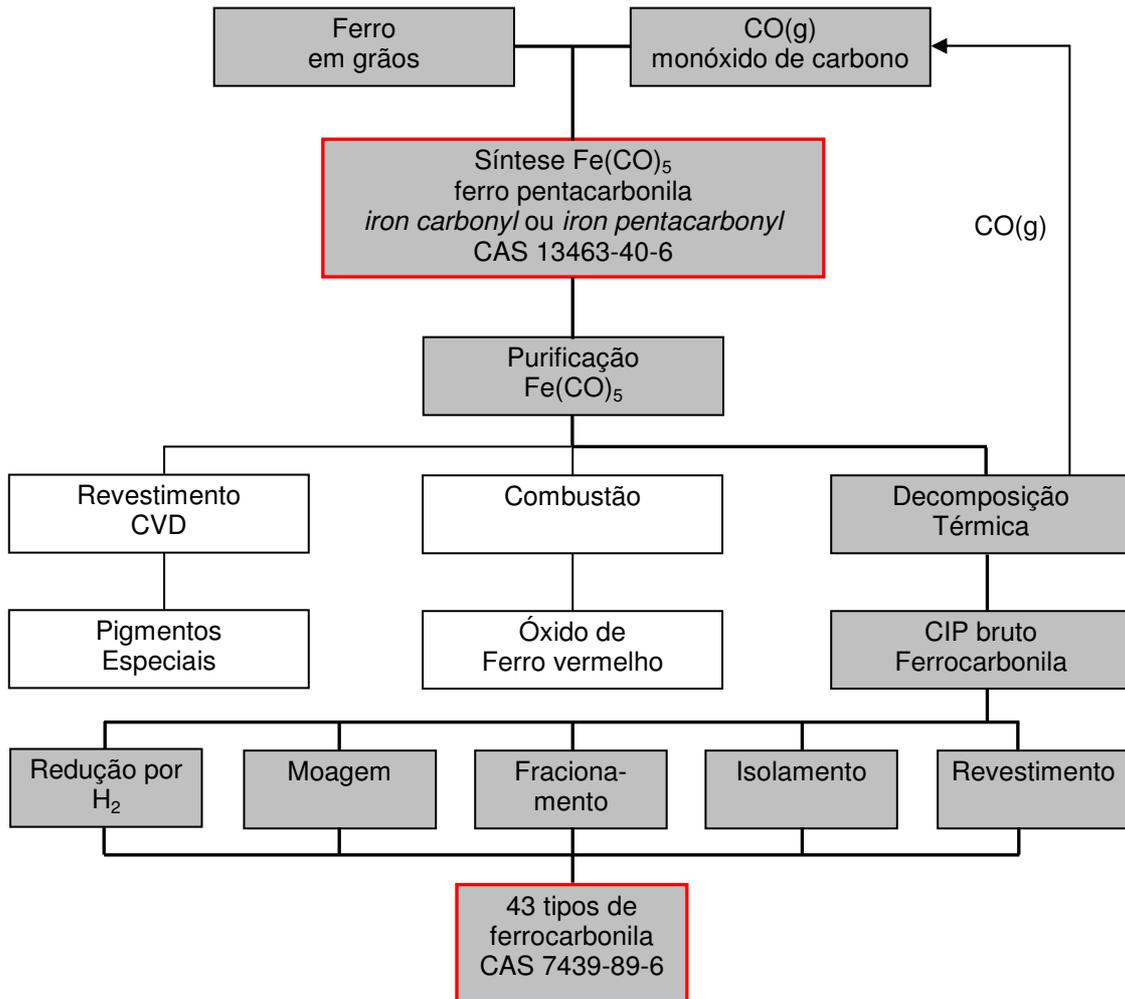


Figura 2.19 – Fluxograma do processo de produção do ferrocarbonila [BASF CORPORATION, 2007].

A empresa BASF Corporation é inventora e líder do mercado da ferrocarbonila, fabricando 43 tipos diferentes, apresentados na Tabela 2.3. A ferrocarbonila do tipo dura é assim denominada devido à maior dureza mecânica das partículas, sendo que a ferrocarbonila tipo mole, possui uma dureza inferior. Os diferentes tipos de especialidades da ferrocarbonila estão relacionados com diferentes tipos de tratamentos superficiais e recobrimento das partículas, com o objetivo de atender aplicações onde requerem melhores compatibilidades física e química da sua superfície com o meio de aplicação. Isto envolve, por exemplo,

melhor adesão física e química com matrizes poliméricas, melhor ancoramento mecânico com substratos metálicos, entre outros.

Tabela 2.3 – Tipos de ferrocabonila sintetizados e comercializados pela BASF [BASF CORPORATION, 2007].

Tipos	Tipos de ferrocabonila
Duro (<i>hard grades</i>)	EA, EL, EN, EQ, ES, EW, HF, HL, HM, HQ, HS, OF, OM, ON, OR, OS e OX
Mole (<i>soft grades</i>)	CC, CD, CF, CL, CM, CN, CS, SD, SL, SM, SQ e SU
Especialidades	<ul style="list-style-type: none"> • Ferrocabonila fosfatado (3, 5 ou 10% de fósforo); • Ferrocabonila com incrustações de cobre (15 ou 25 % de cobre); • Ferrocabonila em flocos (S); • Ferrocabonila E, H e S com isolamento a base de fosfato (ex: EN-I); • Ferrocabonila com camada de SiO₂ (EW).

O maior volume de vendas do ferrocabonila destina-se aos setores de ferramenta (recobrimento abrasivos utilizados juntamente com diamante) e componentes eletrônicos. Porém, há aplicações também na síntese de diamantes, magnetoreologia, moldes para injeção de metais fundidos, suplemento nutricional, impressos magnéticos e absorvedores magnéticos de microondas [BASF CORPORATION, 2007, WIKIPEDIA, 2007b].

2.6.3.2. Permissividade e permeabilidade da ferrocarbonila

Os autores Wang, Afsar, Grignon [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003] mediram a permissividade e a permeabilidade complexas de 4 tipos de ferrocarbonila, produzidos pela empresa *BASF Corporation*: EN, ES, EW e EW-I. As medidas foram realizadas em guia de ondas na banda X (8,2-12,4 GHz) e Ku (12,4-18 GHz). Os corpos-de-prova para as medidas foram confeccionados a partir da compactação e preenchimento da seção do guia de ondas com pó de ferrocarbonila sem a utilização de matriz para agregar as suas partículas [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003]. A Tabela 2.4 mostra as condições utilizadas na obtenção dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexas dos diferentes tipos de ferrocarbonila.

Tabela 2.4 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexa [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003].

Item	Características
Equipamento utilizado	Analisador de redes vetorial 8510C (Agilent), guia de ondas, <i>kits</i> Agilent WR90 (8,2 –12,4 GHz) e WR-62 (12,4 -18 GHz)
Método de cálculo de ε e μ	Método Transmissão-reflexão Nicolson-Ross
Dimensão do corpo-de-prova	Não é mencionado
Matriz polimérica	Não foi utilizada
Faixa de frequências	8,2 – 18 GHz

A Figura 2.20 apresenta as curvas obtidas dos parâmetros ε' , ε'' , μ' e μ'' dos corpos-de-prova constituídos de ferrocarbonila pura, na faixa de frequências compreendidas entre 8,2 e 18 GHz. A permeabilidade complexa é similar entre estes tipos de ferrocarbonilas (EN, ES, EW, e EW-I) com seu alto conteúdo de ferro,

enquanto que a permissividade complexa difere para cada tipo de ferrocarbonila [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003].

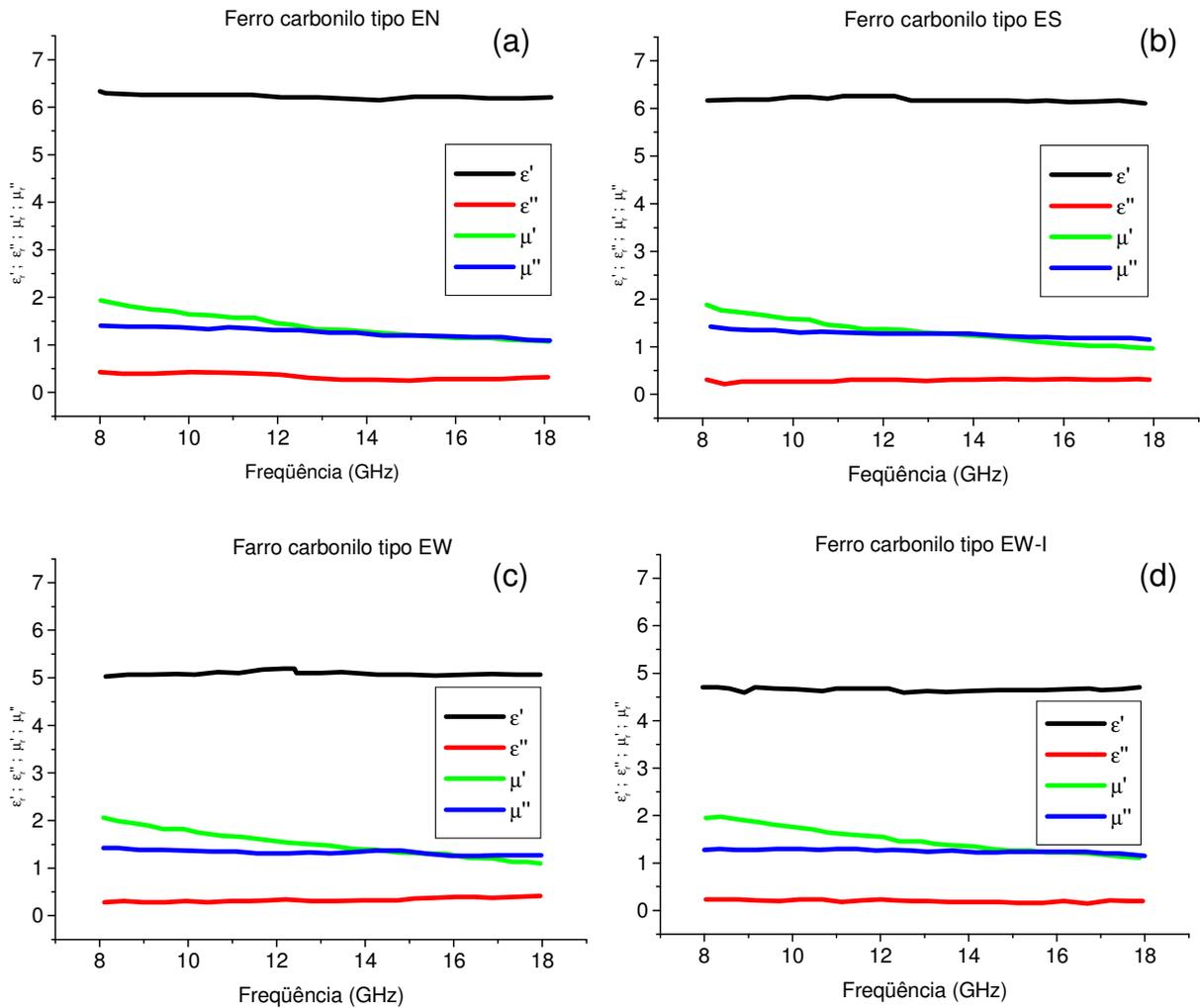


Figura 2.20 – Permissividade e permeabilidade complexas da ferrocarbonila pura na faixa de frequências de 8 a 18 GHz [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003], tipo: (a) EN, (b) ES, (c) EW e (d) EW-I

Os autores Wang, Afsar e Bahadoor [WANG; AFSAR; BAHADOOR, 2005] também publicaram um outro trabalho com os valores de permissividade e permeabilidade complexas de 3 tipos de ferrocarbonila da empresa BASF Corporation: EN, EW e ES. As medidas foram realizadas em guia de ondas entre 8 e

40 GHz. A Tabela 2.5 mostra as condições utilizadas na obtenção dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexas.

Tabela 2.5 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexas [WANG; AFSAR; BAHADOOR, 2005].

Item	Características
Equipamento utilizado	Analisador de redes vetorial 8510C (Agilent) e guia de ondas
Método de cálculo de ϵ e μ	Método Transmissão-reflexão Nicolson-Ross
Dimensão do corpo-de-prova	Não é mencionado, apenas massa específica de $2,900 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$
Matriz polimérica	Não é mencionada
Faixa de frequências	8,2 – 40 GHz

A Figura 2.21 apresenta as curvas obtidas dos parâmetros ϵ' , ϵ'' , μ' e μ'' dos corpos-de-prova constituídos de ferrocarbonila, na faixa de frequências compreendidas entre 8 a 40 GHz. A ferrocarbonila é bom absorvedor magnético principalmente na faixa de frequências da banda X (8,2 – 12,4 GHz) onde a componente real da permeabilidade complexa é maior que 1,0. A componente imaginária da permissividade e da permeabilidade são reduzidos a valores próximos de zero na banda Ka (26,5 – 40 GHz) [WANG; AFSAR; BAHADOOR, 2005].

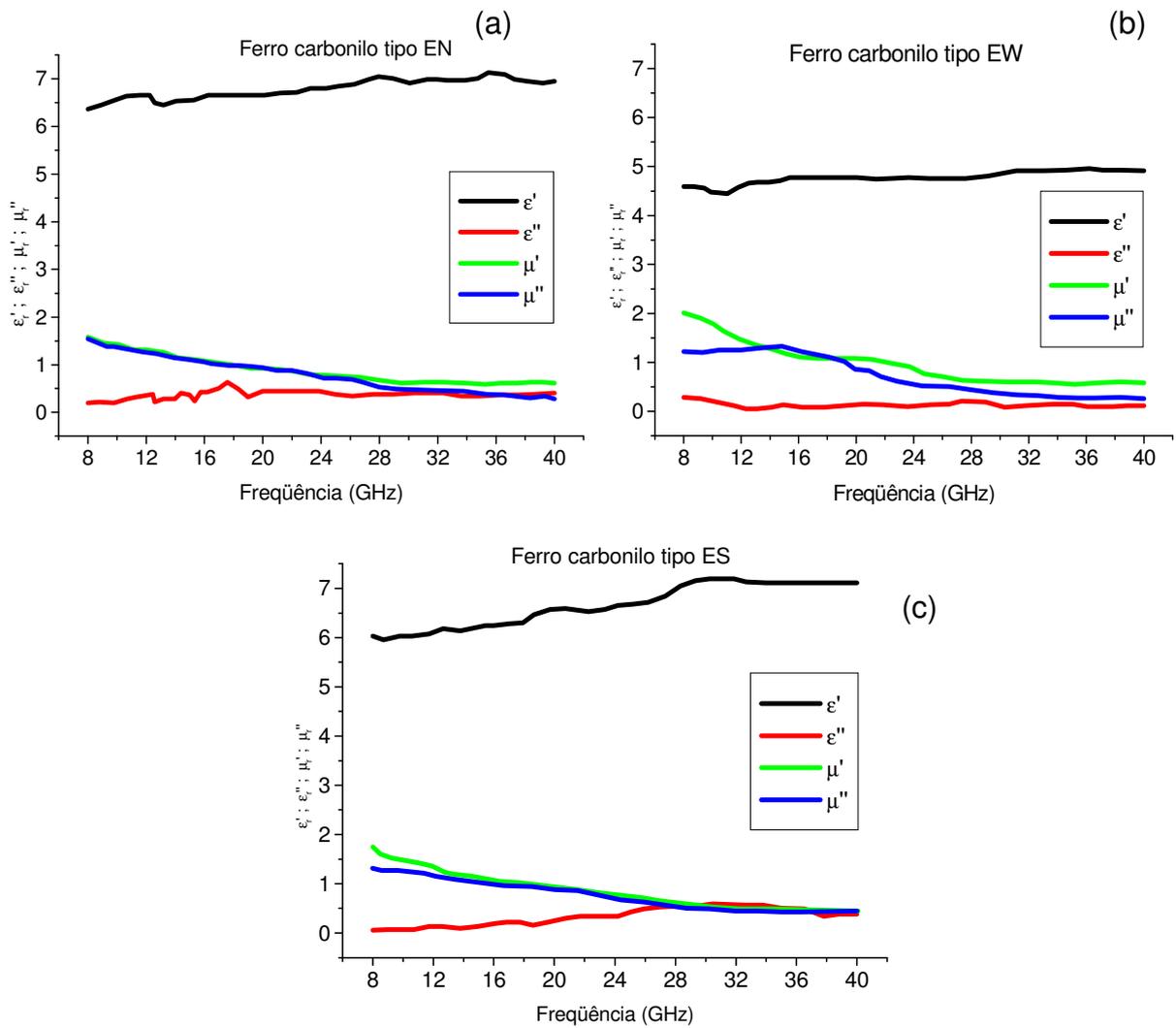


Figura 2.21 – Permissividade e permeabilidade complexas da ferrocementila na faixa de frequências de 8 a 40 GHz [WANG; AFSAR; BAHADOOR, 2005], tipo (a) EN, (b) EW e (c) ES.

O artigo publicado pelos autores Chen, Wu, Zhao, Yang e Xiao [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005] apresenta os valores de permissividade e permeabilidade complexas da ferrocementila na frequência igual a 10 GHz, variando a fração volumétrica de 5 em 5% até 60%, utilizando matriz polimérica tipo epóxi. A Tabela 2.6 mostra as condições utilizadas na obtenção dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexas.

Tabela 2.6 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexas [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005].

Item	Características
Equipamento utilizado	Analisador de redes vetorial E8363A (Agilent) e guia de ondas
Método de cálculo de ε e μ	Não é mencionado
Dimensão do corpo-de-prova	Não é mencionado
Matriz polimérica	Epóxi ($\varepsilon = 3,09-j0,07$ e $\mu = 1,02-j0,01$ a 10 GHz.)
Faixa de frequências	10 GHz

A Figura 2.22 apresenta as curvas obtidas dos parâmetros ε' , ε'' , μ' e μ'' dos corpos-de-prova constituídos de ferrocarbonila, em 10 GHz [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005].

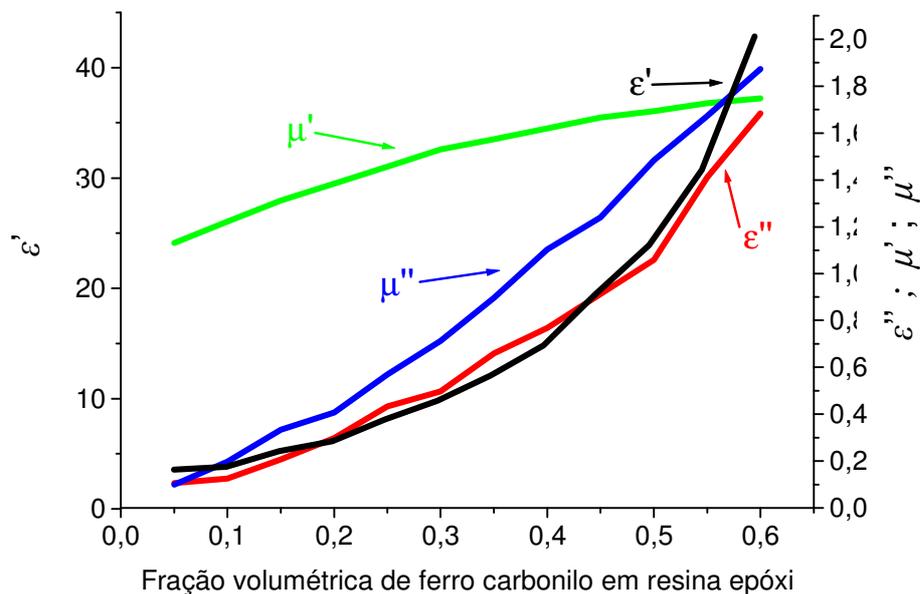


Figura 2.22 – Permissividade e permeabilidade complexas em 10 GHz do ferrocarbonila com matriz epóxi em função da fração volumétrica [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005].

A Figura 2.22 mostra que os parâmetros ε' , ε'' e μ'' aumentam à medida que se aumenta a concentração em volume da ferrocarbonila de 5 a 60%, enquanto que

o parâmetro μ' apresenta um aumento menor em relação aos outros parâmetros, com valores entre 1,1 a 1,7 para o mesmo aumento da concentração em volume da ferrocarbonila, na frequência de 10 GHz [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005].

Os autores Feng, Qiu, Shen e Li [FENG; QIU; SHEN; LI, 2006] publicaram um trabalho com os valores de permissividade e permeabilidade complexas de corpos-de-prova variando a fração volumétrica de ferrocarbonila em matriz polimérica de EPDM. A ferrocarbonila foi produzida por uma companhia chinesa: *Jiangsu Xuyi Tianyi Ultrafine Powder Co. Ltd*, com massa específica igual a 7,8 g/cm³. As medidas foram realizadas em guia de ondas entre 2,6 e 18 GHz. A Tabela 2.7 mostra as condições utilizadas na obtenção dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexa e a Figura 2.22, apresenta os valores de permissividade e permeabilidade em função da fração volumétrica.

Tabela 2.7 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexas utilizado na literatura [FENG; QIU; SHEN; LI, 2006].

Item	Características
Equipamento utilizado	Analisador de redes vetorial HP8722ET (Agilent) e linha de transmissão coaxial APC-7
Método de cálculo de ϵ e μ	Não é mencionado
Dimensão do corpo-de-prova	Toroidal ($d_i = 3,04$ mm, $d_e = 7,0$ mm)
Matriz polimérica	EPDM ($\rho = 0,86$ g/cm ³), variando fração volumétrica de ferrocarbonila em 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,45.
Faixa de frequências	2,6 - 18 GHz

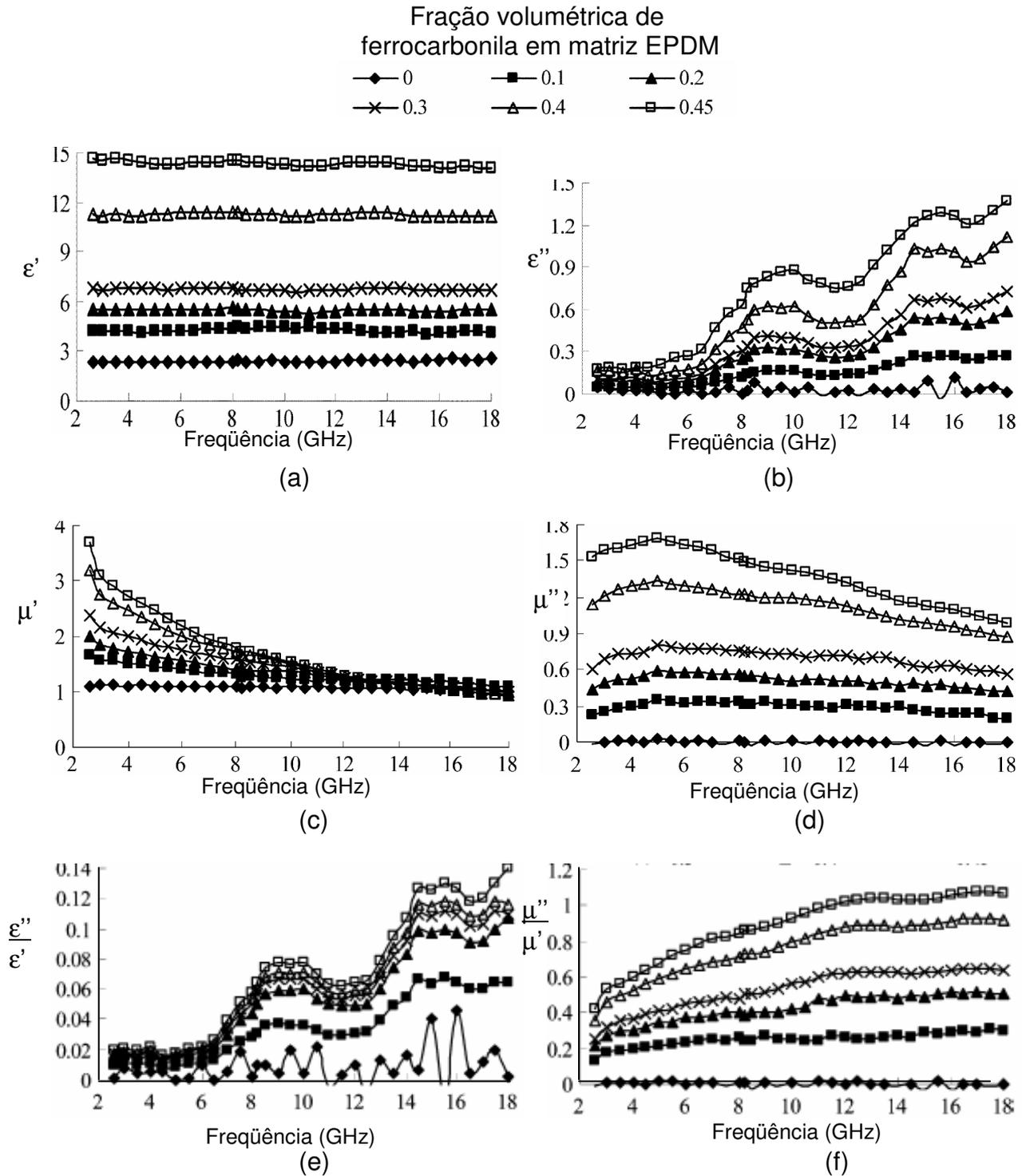


Figura 2.23 – Permissividade e permeabilidade complexas de ferrocarbonila incorporada em EPDM: (a) componente real da permissividade complexa, (b) componente imaginária da permissividade complexa, (c) componente real da permeabilidade complexa, (d) componente imaginária da permeabilidade complexa, (e) perdas dielétricas e (f) perdas magnéticas [FENG; QIU; SHEN; LI, 2006].

De acordo com as curvas da Figura 2.23, o efeito de permissividade e permeabilidade complexa em materiais absorvedores da radiação eletromagnética de borracha EPDM aditada com ferrocarbonila é dependente da frequência. A alta fração volumétrica de ferrocarbonila favorece o aumento da permissividade e da permeabilidade complexa relativa, sendo que as perdas magnéticas e dielétricas aumentam com o aumento da frequência [FENG; QIU; SHEN; LI, 2006].

Os autores Park, Choi e Kim [PARK; CHOI; KIM, 2000] publicaram um trabalho com os valores de permissividade e permeabilidade complexa de ferrocarbonila com 80% em massa em silicone (não há menção sobre o tipo de ferrocarbonila). A Tabela 2.8 mostra as condições utilizadas na obtenção dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexa e a Figura 2.24 apresenta os valores de permissividade e permeabilidade em função da frequência.

Tabela 2.8 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexa da referência [PARK; CHOI; KIM, 2000].

Item	Características
Equipamento utilizado	Analisador de redes vetorial HP 8722D (Agilent), linha de transmissão coaxial
Método de cálculo de ε e μ	Não é mencionado
Dimensão do corpo-de-prova	Toroidal ($d_i = 3,00$ mm, $d_e = 7,0$ mm)
Matriz polimérica	Silicone
Faixa de frequências	0,5 - 18 GHz

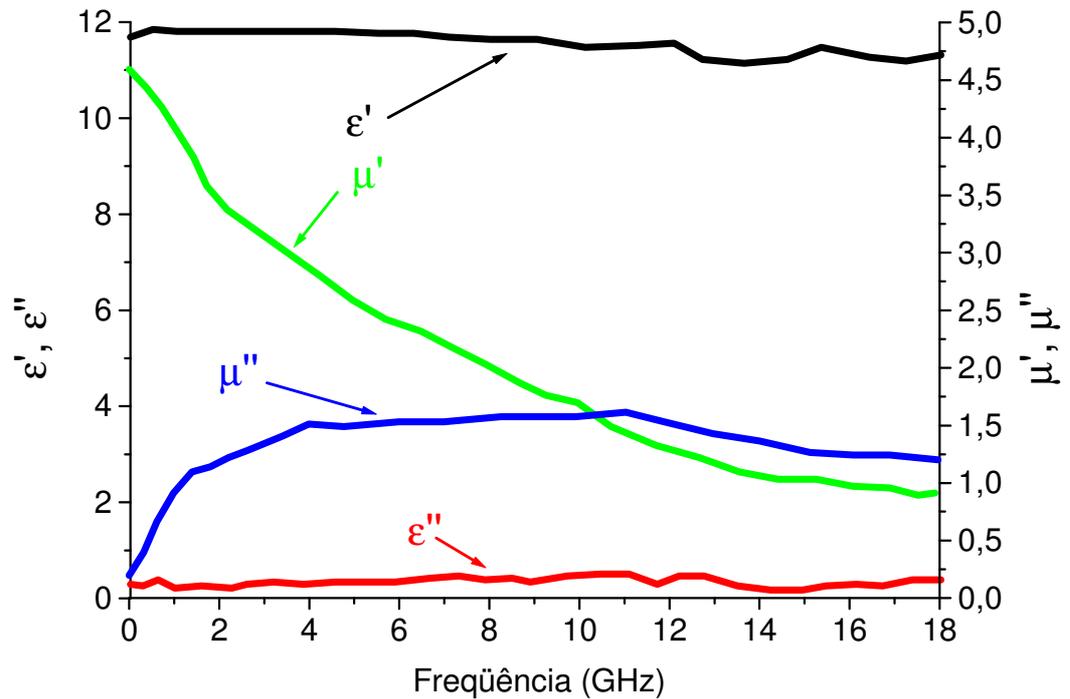


Figura 2.24 – Permissividade e permeabilidade complexas de partículas de ferrocarbonila incorporadas em borracha de silicone [PARK; CHOI; KIM, 2000].

Nas curvas da Figura 2.24, na faixa de frequência de 50 MHz a 18 GHz a ferrocarbonila apresenta perdas magnéticas (μ''). Observa-se um espectro largo de frequências com perdas magnéticas, até em frequências mais alta (18 GHz), apresentando valor de μ'' próximo a 1,3. Porém, em frequências menores baixas (próximo de 1 GHz), os valores de perdas magnéticas aproximam de zero. Nota-se, também, valor alto para a componente real da permissividade complexa, próximo de 12 em toda a faixa de frequências (50 MHz – 18 GHz); e valores muito próximos de zero, para a componente imaginária da permissividade complexa [PARK; CHOI; KIM, 2000].

Os autores Komori e Fellow [KOMORI; FELOW, 1994] publicaram um trabalho com os valores de permissividade e permeabilidade complexas de

ferrocarbonila com 85% em massa em epóxi (não há menção sobre o tipo de ferrocarbonila). A Tabela 2.9 apresenta as condições utilizadas na obtenção dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexas, e a Figura 2.25, os valores de permissividade e permeabilidade em função da frequência.

Tabela 2.9 – Descrição do sistema de medidas de permeabilidade e permissividade complexa apresentado na literatura [KOMORI; FELOW, 1994].

Item	Características
Equipamento utilizado	Não é mencionado
Método de cálculo de ε e μ	Parâmetros S
Dimensão do corpo-de-prova	Não é mencionado
Matriz polimérica	Epóxi
Faixa de frequências	0,1 - 20 GHz

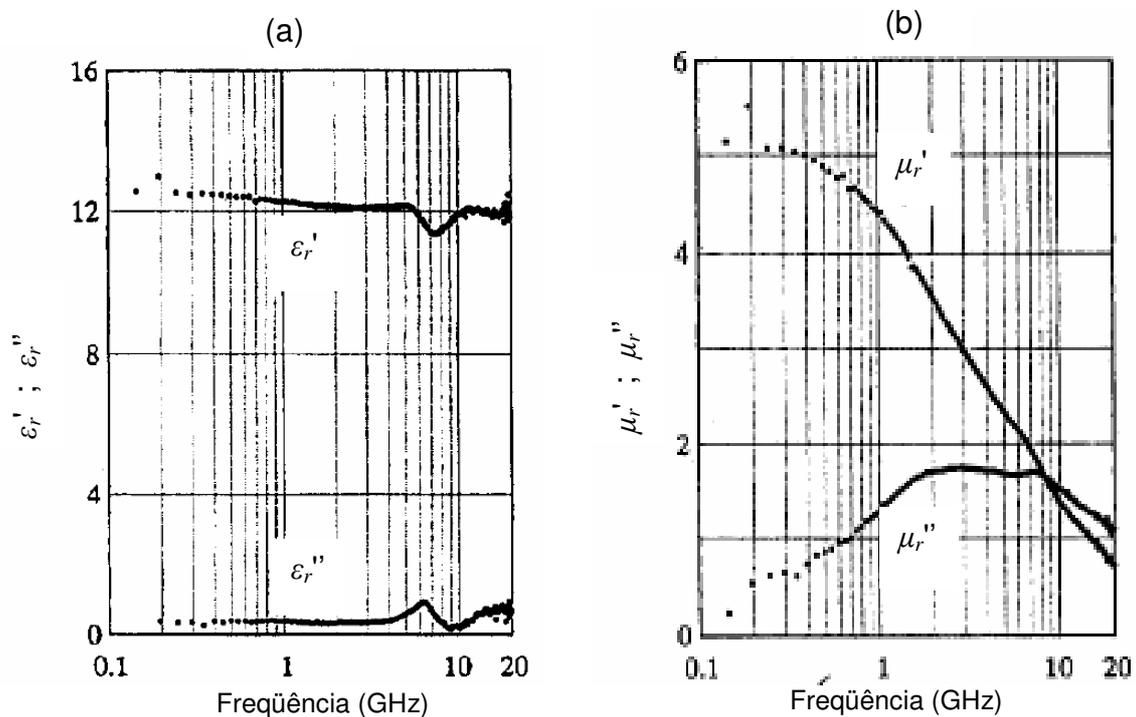


Figura 2.25 – (a) Permissividade e (b) permeabilidade complexas de ferrocarbonila incorporada em borracha de silicone [KOMORI; FELOW, 1994].

Nas curvas da Figura 2.25 observa-se que os valores da permissividade complexa, mantém aproximadamente constante em toda a faixa de frequências (0,1 – 20 GHz), com uma pequena variação próximo de 10 GHz, com ϵ' próximo de 12 e ϵ'' próximo de zero. A permeabilidade complexa diminui em frequências acima de 10 GHz, mas mantém com bons valores de perdas (em torno de 1,0), levando a concluir que este material é bom para utilização como material absorvedor de radiação eletromagnética [KOMORI; FELOW, 1994].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados os materiais e os equipamentos utilizados neste trabalho. Os procedimentos relativos à preparação dos corpos-de-prova, a técnica utilizada para calibração do analisador de redes vetorial, a técnica utilizada nas medidas dos parâmetros S (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}), a técnica utilizada nas medidas de refletividade com placa metálica e o procedimento utilizado nas medidas dos valores de permissividade e permeabilidade complexas. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma com as etapas executadas neste trabalho.

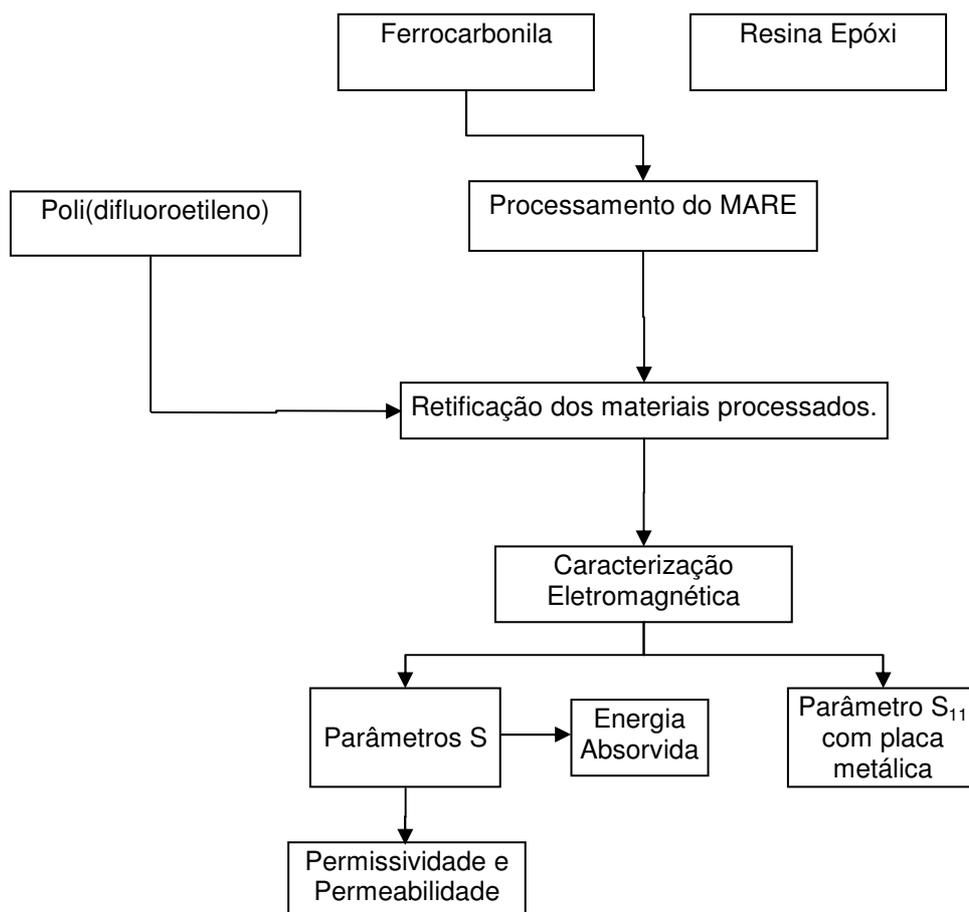


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.

3.1 MATERIAIS

Os equipamentos, acessórios e materiais utilizados para confeccionar os corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) e resina epóxi aditada com ferrocbonila, bem como os equipamentos e acessórios utilizados para a caracterização eletromagnética desses materiais.

3.1.1 Poli(difluoroetileno)

- a) Placa de poli(difluoroetileno) medindo aproximadamente (300 x 300 x 20) mm;
- b) Retífica com disco diamantado.

3.1.2 Ferrocbonila

- a) Ferrocbonila tipo EN do fornecedor BASF;
- b) Resina Epóxi tipo Araldite[®] do fornecedor Brascola;
- c) Agente desmoldante QZ 5100 marca Vantico;
- d) Plástico desmoldante;
- e) Bastão de madeira descartável;
- f) Balança semi-analítica monobloco modelo PB 3002-5, com precisão de 1,0 mg;
- g) Béquer de 100 ml;
- h) Bastão de nylon de 20 cm;
- i) Espátula de alumínio;

- j) Placa de alumínio de (200 x 200) mm;
- k) Molde para guia de ondas na banda X com as dimensões de (23 x 11 x 10) mm.

3.1.3 Caracterização Eletromagnética

- a) Analisador de redes vetorial tipo 8510C, marca Agilent Technologies;
- b) Cabo Coaxial flexível tipo 85132F, marca Agilent Technologies com conectores de 7mm (APC-7) e 3,5 mm;
- c) Conjunto de Calibração para a banda X tipo WR 90 marca Agilent Technologies, contendo: adaptadores, cargas, trecho de guia de onda, placa metálica, porta-amostra, parafusos-guia e parafusos convencionais;
- d) Computador PC com placa GPIB;
- e) *Software* para cálculo de permissividade e permeabilidade 85071E, da Agilent Technologies.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Calibração do analisador de redes vetorial

A calibração do sistema tem importância fundamental nas medidas dos parâmetros, uma calibração bem sucedida previne possíveis erros de funcionamento do equipamento, minimiza o ruído e maximiza a sensibilidade de retorno, aumentando a faixa dinâmica. É enfatizado pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) que: “A calibração de equipamentos é um conjunto de operações que

estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição, e os valores estabelecidos por padrões” [INMETRO, 2005].

Existem diversas metodologias de caracterização eletromagnética de materiais, como descrito no item em 2.4.2 da Revisão Bibliográfica. Para cada método de caracterização é requerido um sistema de calibração diferente, e para cada modelo matemático do *software* 85071E, é requerido um ou mais tipos de calibração. Para medidas de permissividade e permeabilidade complexas faz-se necessária a utilização dos parâmetros S com os dados de amplitude e fase, fornecidos somente por um analisador de redes vetorial.

Para a calibração do analisador de redes, os valores estabelecidos por padrões, devem estar armazenados em sua memória, para que ao executar os procedimentos de calibração os valores medidos e os valores de referência sejam comparados, de forma a obter precisão e exatidão das medidas efetuadas [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005c]. Para isso, são utilizados conjuntos de calibração de acordo com a banda de frequências. A Figura 3.2 apresenta o conjunto de calibração para a banda X utilizado nesta dissertação.



Figura 3.2 – Conjunto de calibração em guia de ondas para a banda X, composto de: (a) parafusos com porcas e parafusos guia, (b) trechos de guia de ondas com atenuador de impedância fixa, (c) trecho de guia de ondas com extremidades abertas, (d) acopladores para conexão do guia de ondas ao cabo coaxial de 3,5mm, (e) placa metálica e (f) porta-amostras ou item usado como atraso, em conjunto da placa metálica [AGILENT TECHNOLOGIES, 2002].

A calibração do analisador de redes vetorial é dividida em três etapas principais [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005c]:

1) Calibração somente da porta 1 (S_{11})

O cabo coaxial flexível é conectado uma de sua extremidade à porta 1 e a outra extremidade no adaptador, com isso se faz a calibração da porta 1 do equipamento, nas situações: curto (placa metálica), curto com atraso (placa metálica em conjunto com o porta-amostra vazio) e impedância fixa (trecho de guia de ondas com atenuador de impedância fixa). Para cada situação descrita é posicionado um acessório correspondente de cada vez na extremidade do adaptador, como apresentado na Figura 3.3.

2) Calibração somente da porta 2 (S_{22})

O cabo coaxial flexível, uma extremidade é conectada à porta 2 e a outra extremidade no adaptador. O adaptador por sua vez, é conectado ao trecho em guia

de ondas com extremidades abertas. A calibração da porta 2 é feita analogamente ao descrito para a porta 1. Neste caso, os acessórios correspondentes a cada situação, são posicionados na outra extremidade do trecho em guia de ondas, com extremidades abertas, na porta 2.

3) Calibração completa das duas portas completas (S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22})

Na calibração completa das duas portas são corrigidos 12 possíveis erros (diretividade, fonte, reflexão, carga, transmissão e isolamento), da porta 1 para a porta 2 e vice-versa [AGILENT TECHNOLOGIES, 2000].

Nesta técnica são calibradas as duas portas do equipamento (porta 1 e porta 2), analisando-se as reflexão e transmissão da porta 1 para a porta 2 e vice-versa, em situações análogas à calibração de somente a porta 1, e à calibração de somente a porta 2. Em seguida, o sistema é calibrado com configuração de transmissão de energia da porta 1 para a porta 2 e vice e versa.

O modelo Nicolson-Ross requer a calibração de duas portas completa, por este motivo foi adotada esta técnica de calibração para as medidas efetuadas nesta dissertação.

3.2.2 Técnica de Medidas dos Parâmetros S

Para as medidas dos Parâmetros S (S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22}), necessárias para gerar os valores de permissividade e permeabilidade complexas, é adotado a configuração de medida apresentada na Figura 3.3 (a), onde o sistema é fechado com o porta-amostra entre o adaptador e a extremidade do trecho de guia de ondas.

Ao inserir um corpo-de-prova com espessura menor que a espessura do porta-amostra, ou seja, espessura inferior a 9,77 mm, este é posicionado a partir do

plano de referência, ou seja, com uma das superfícies junto ao adaptador da porta 1, como apresenta a Figura 3.3 (b).

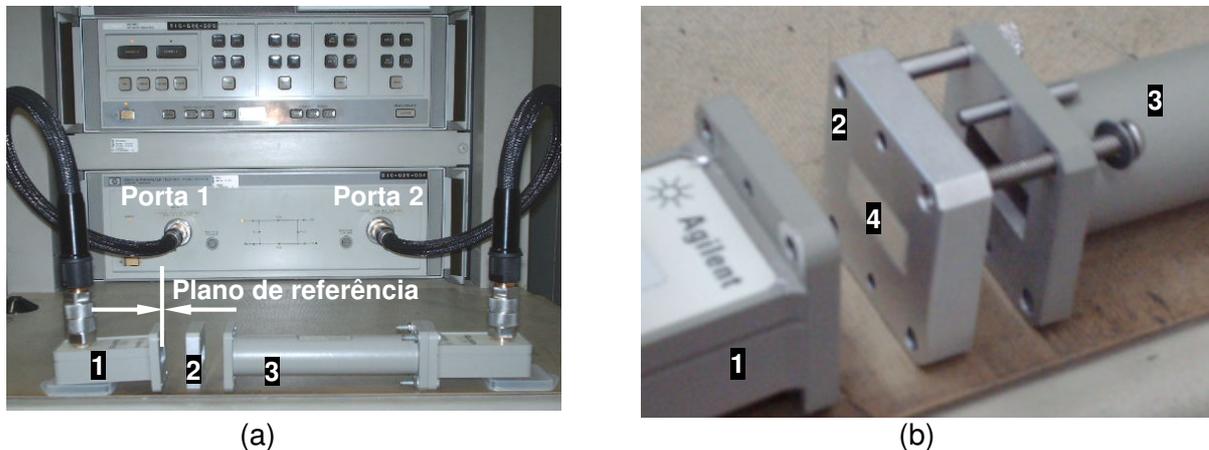


Figura 3.3 – Configuração para medidas dos parâmetros S. (a) Vista geral do sistema montado. (b) Vista ampliada do porta-amostra com corpo-de-prova. (1) acoplador da porta 1, (2) porta-amostra, (3) trecho de guia de ondas da porta 2 e (4) corpo-de-prova [AGILENT TECHNOLOGIES, 2000; PEREIRA; REZENDE; NOHARA, 2006c].

3.2.3 Técnica de Medidas de Refletividade com Placa Metálica

Para medidas de reflexão com placa metálica (E_{RP}) é adotada a configuração de medidas apresentada na Figura 3.4 (a). Neste caso, o sistema é fechado com o porta-amostra entre o adaptador e a placa metálica. Ao inserir um corpo-de-prova com espessura inferior à espessura do porta-amostra, ou seja, espessura inferior a 9,77 mm, este é posicionado com uma das superfícies junto à placa metálica, como apresenta a Figura 3.4 (b).

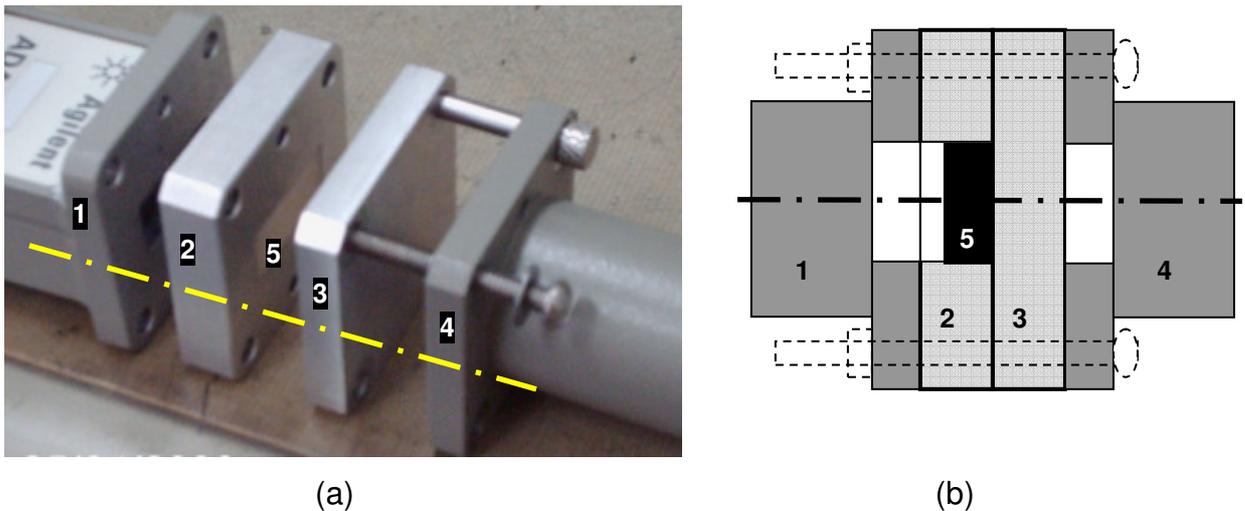


Figura 3.4 – Configuração de medida de refletividade com placa metálica: (a) vista ampliada do porta-amostra com corpo-de-prova e placa metálica. (b) esquema do posicionamento do corpo-de-prova no porta-amostra. (1) acoplador da porta 1, (2) porta-amostra, (3) placa metálica, (4) trecho de guia de ondas da porta 2 e (5) corpo-de-prova dentro do porta-amostra. [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005c, PEREIRA; REZENDE; NOHARA, 2006a].

3.2.4 Software de cálculo da permissividade e permeabilidade complexa

O *software* utilizado na parte experimental desta dissertação (Agilent 85071E) possui algumas opções de métodos de medidas, utilizando guia de ondas, cabo coaxial, espaço livre e Arco NRL e de modelos de cálculo de permissividade e permeabilidade complexa (*Nicolson/Ross Model*, *NIST Precision Model*, *Fast Model*, *Short Backed Model*, *Arbitrary Backed Model* e *Single/Double Model*) [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

O método de medida a ser escolhido (guia de ondas, cabo coaxial, espaço livre ou Arco NRL) depende do tipo de material a ser medido, se é rígido, flexível, líquido, filme fino, entre outros. Assim, a definição do modelo de cálculo a ser

utilizado depende das propriedades eletromagnéticas (dielétrico ou magnético), estado físico e nível de precisão requerido, descrito na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Modelos de cálculo de permissividade e permeabilidade complexa do *software* Agilent Techonologies 85071E [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

Modelo	Parâmetro S requerido	Espessura ótima	Resultados fornecidos	Recomendações
<i>Nicolson-Ross</i>	S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22} ; ou S_{11} e S_{21}	$\lambda_g/4$	ϵ_r^* e μ_r^*	Apresenta descontinuidade dos valores de ϵ_r^* e μ_r^* para corpos-de-prova com espessura $n\lambda_g/2$. Bom para materiais magnéticos com perdas e espessuras pequenas.
<i>NIST Precision</i>	S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22} ;	$n\lambda_g/2$	ϵ_r^*	Não apresenta descontinuidade dos valores. Bom para materiais com espessura grande e de baixas perdas.
<i>Fast</i>	S_{21} e S_{12} ; ou S_{21}	$n\lambda_g/2$	ϵ_r^*	Similar ao modelo Precision, mais rápido, bom para materiais com baixas e altas perdas.
<i>Short-backed</i>	S_{11}	$\lambda_g/2$	ϵ_r^*	Adequado para materiais na forma líquida e em pó.
<i>Arbitrary-backed</i>	S_{11}	$\lambda_g/2$	ϵ_r^*	Adequado para filmes finos
<i>Single / Double</i>	S_{11}	$\lambda_g/4$ ou $\lambda_g/2^1$	ϵ_r^* e μ_r^*	Adequado para materiais líquidos e em pó.

1. $\lambda_g/2$ para materiais de baixas perdas.

Pela utilização do *software* se obtém os valores dos Parâmetros S (S_{11} e S_{21}) e a fase da onda eletromagnética medidos pelo Analisador de Redes Vetorial e realiza cálculos baseados em modelos matemáticos de modo a obter os valores de permissividade e permeabilidade complexas relativas, bem como a tangente de perdas dielétricas ($tg \delta = \epsilon''/\epsilon'$), tangente de perdas magnéticas ($tg \delta_m = \mu''/\mu'$) e o

diagrama de Cole-Cole, em que a curva é apresentado na de ϵ'' em função de ϵ' . Os resultados de ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , $tg\delta$ e $tg\delta_m$ são apresentados em função da frequência, com precisão entre 1 e 3% para medidas em guia de ondas com ϵ_r' entre 3 e 10. A faixa de frequências de medidas pode ser de 100 MHz - 325 GHz, de acordo com o analisador de redes vetorial e acessórios utilizados, [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

O material em estudo é rígido e produzido a partir de matriz polimérica tipo epóxi aditada com ferrocarbonila, ou seja, com características magnéticas, por este motivo foi adotado o Modelo Nicolson-Ross para a caracterização eletromagnética via medidas de permissividade e permeabilidade complexas, conforme recomendação do fabricante do *software* apresentado na Tabela 3.1 [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a]. Para a avaliação do modelo Nicolson-Ross também foi realizado avaliações de permissividade e permeabilidade complexas em corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) em diferentes espessuras, por se tratar de um material com propriedades eletromagnéticas (ϵ_r^* e μ_r^*) conhecidas.

3.2.5 Preparação dos corpos-de-prova para medidas de permissividade e permeabilidade complexas

3.2.5.1 Dimensionamento do porta-amostra do *kit* WR-90 (banda X)

Para o cálculo da espessura do porta-amostra do *kit* WR-90 na banda X são utilizadas as Equações 2.24, 2.26, 2.27, 2.28, os valores da Tabela 2.2 e os dados de permissividade e permeabilidade complexas do ar atmosférico ($\epsilon_r' = 1,000649$ e

$\mu_r' = 1,0$) [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005b; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a; HIPPEL, 1954], conforme demonstrado abaixo:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{2,998.10^8 \text{ m/s}}{6,557.10^9 \text{ s}^{-1}} = 45,72 \text{ mm},$$

$$f_o = \sqrt{f_i f_f} = \sqrt{8,2000 \text{ GHz} \cdot 12,400 \text{ GHz}} = 10,084 \text{ GHz},$$

$$\lambda_o = \frac{c}{f_o} = \frac{2,998.10^8 \text{ m/s}}{10,084.10^9 \text{ s}^{-1}} = 29,73 \text{ mm},$$

$$\lambda_g = \frac{29,73.10^{-3} \text{ m}}{\sqrt{1,000649.1,0 - \left(\frac{29,73.10^{-3} \text{ m}}{45,72.10^{-3} \text{ m}}\right)^2}} = 39,1 \text{ mm},$$

$$\lambda_g / 4 = \frac{39,1.10^{-3} \text{ m}}{4} = 9,777 \text{ mm}$$

A partir deste cálculo se obtém a a dimensão c do porta-amostra, utilizando o ar atmosférico como referência, e apresentado na Figura 3.5.

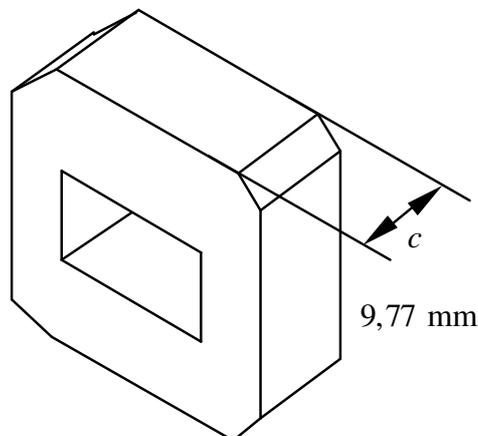


Figura 3.5 – Dimensão c do porta-amostra para medidas de permissividade e permeabilidade complexas.

3.2.5.2 Preparação e definição das espessuras dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno)

Conforme apresentado no item 2.5.4, a espessura do corpo-de-prova para medidas de permissividade e permeabilidade complexas, utilizando o modelo Nicolson-Ross [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a], deve estar no intervalo do comprimento de onda da onda guiada (λ_g) entre $\lambda_g/18$ e $\lambda_g/2$, sendo a espessura ótima igual $\lambda_g/4$ (Equação 2.24). Para o cálculo de λ_g foram adotados os seguintes critérios para obtenção dos valores de λ_c , λ_x , ϵ_r' e μ_r' :

A) λ_c

A partir da Equação 2.26 é calculado o comprimento de onda de corte (λ_c), utilizando-se o valor da frequência de corte (f_c) igual a 6,557 GHz (Tabela 2.2), para o guia de ondas na banda X (8,2 a 12,4 GHz). Substituindo-se os valores na Equação 2.26, obtém-se:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{6,557 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}} = 45,721 \text{ mm},$$

B) λ_x

O valor de λ_g é calculado para apenas uma frequência, por esse motivo pode-se utilizar qualquer frequência na faixa de interesse para se obter o valor de λ_x .

C) ϵ_r' e μ_r'

O modelo de Nicolson-Ross exige para o cálculo de λ_g os valores de ϵ_r' e μ_r' do material em estudo. Isto à primeira vista é uma contradição, uma vez que é exigido o conhecimento dos valores dos parâmetros que serão medidos. Por esse

motivo é necessário estimar os valores de ε_r' e μ_r' do material na freqüência de interesse para calcular λ_g .

D) λ_g

De acordo com a Equação 2.24, para um material com valores de ε_r' e μ_r' constantes em um intervalo de freqüências, o limite inferior de espessura é determinado pela maior freqüência (menor λ_x) e o limite superior é determinado pela menor freqüência (maior λ_x). Assim, na banda X, a maior espessura do corpo-de-prova será determinada pela freqüência igual a 8,2 GHz e a menor espessura pela freqüência igual a 12,4 GHz. A partir das Equações 2.24 e 2.25, foi calculado para o poli(difluoroetileno) as espessura mínimas e máximas nas freqüências 8,2 GHz e 12,4 GHz:

8,2 GHz

$$\lambda_x = \frac{c}{f_x} = \frac{2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8,20 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}} = 36,5 \text{ mm},$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_x}{\sqrt{\varepsilon_r' \mu_r' - \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_c}\right)^2}} = \frac{3,6561 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{\sqrt{2,03 \cdot 1,00 - \left(\frac{3,6561 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{4,5721 \cdot 10^{-2} \text{ m}}\right)^2}} = 31,0 \text{ mm},$$

12,4 GHz

$$\lambda_x = \frac{c}{f_x} = \frac{2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{12,4 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}} = 24,1 \text{ mm},$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_x}{\sqrt{\varepsilon_r' \mu_r' - \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_c}\right)^2}} = \frac{2,4177 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{\sqrt{2,03 \cdot 1,00 - \left(\frac{2,4177 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{4,5721 \cdot 10^{-2} \text{ m}}\right)^2}} = 18,2 \text{ mm}$$

Dessa forma, com os cálculos demonstrados anteriormente é possível determinar a faixa de espessuras (d) do material no intervalo $\lambda_g/18$ e $\lambda_g/2$. A Tabela 3.2 mostra os valores de $\lambda_g/18$, $\lambda_g/2$ e λ_g para as frequências 8,2 e 12,4 GHz. Para o poli(difluoroetileno), este intervalo é entre 1,72 mm e 9,13 mm, permitindo, assim, a determinação dos valores de permeabilidade e permissividade para a faixa de frequências compreendida entre 8,2 a 12,4 GHz.

Tabela 3.2 – Valores de $\lambda_g/18$, $\lambda_g/2$ e λ_g do poli(difluoroetileno) para as frequências 8,2GHz e 12,4 GHz.

Frequência (GHz)	$\lambda_g/18$ (mm)	$\lambda_g/2$ (mm)	λ_g (mm)
8,2	1,72	15,5	31,0
12,4	1,01	9,13	18,2

Baseado no intervalo de espessuras entre 1,72 mm e 9,13 mm, foram confeccionados corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com quatorze diferentes espessuras: $0,88 \pm 0,02$ mm, $1,30 \pm 0,02$ mm, $1,36 \pm 0,02$ mm, $1,72 \pm 0,02$ mm, $2,35 \pm 0,02$ mm, $3,45 \pm 0,02$ mm, $4,10 \pm 0,02$ mm, $4,60 \pm 0,02$ mm, $5,75 \pm 0,02$ mm, $7,72 \pm 0,02$ mm, $9,77 \pm 0,02$ mm, $11,73 \pm 0,02$ mm, $15,65 \pm 0,02$ mm e $23,50 \pm 0,02$ mm. Foram preparados corpos-de-prova com medidas dentro e fora do intervalo entre 1,72 mm e 9,13 mm. Para garantir o paralelismo das superfícies dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno), as amostras foram retificadas com disco diamantado.

3.2.5.3 Preparação e definição das espessuras dos corpos-de-prova de ferrocarbonila

Preparação dos corpos-de-prova

O MARE à base de resina epóxi [BRASCOLA, 2006] foi preparado em um béquer de 100 ml com o auxílio de um bastão de *nylon* para a agitação manual, em temperatura ambiente ($\sim 26^{\circ}\text{C}$) por 15 min. A proporção base/endurecedor utilizada foi de 2:1 e as composições em ferrocarbonila/resina foram 40, 45, 50, 55, 60 e 65 (% em massa), obtidos a partir da Equação 3.1. A proporção base/endurecedor e as composições em ferrocarbonila/resina foram definidas como as formulações de melhor desempenho deste compósito como MARE, a partir de trabalhos realizados e já disponibilizados em literatura [NOHARA, 2003a; NOHARA; MARTIN; REZENDE, 2001]. Um corpo-de-prova de resina epóxi pura foi também preparado, ou seja, sem a adição de ferrocarbonila. As misturas foram vazadas em moldes previamente preparados com desmoldante, e a mistura foi curada em temperatura ambiente por 24 h.

$$MF = \frac{(\%MF)MR}{1 - (\%MF)} \quad (3.1)$$

onde:

MF = massa de ferrocarbonila, em gramas;

$\%MF$ = concentração de ferrocarbonila em porcentagem;

MR = massa da resina, em gramas.

As massas específicas da ferrocarbonila e da resina epóxi são iguais a 7,80 g/cm³ e 0,90 g/cm³, respectivamente. Com esses valores pode-se converter a porcentagem em massa de ferrocarbonila em epóxi para fração volumétrica. Para os corpos-de-prova com porcentagem em massa de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% a fração volumétrica é igual a 0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17 e 0,20, respectivamente. Ou seja, para o corpo-de-prova com fração volumétrica igual a 0,20, significa que há 2 partes em volume de ferrocarbonila em 8 partes em resina epóxi.

Para garantir o paralelismo da espessura e o acabamento superficial em todos os corpos-de-prova analisados, esses foram retificados com um disco diamantado, com uma precisão de 0,005 mm na espessura. Os compósitos resina epóxi/ferrocarbonila foram processados em doze diferentes espessuras físicas: 2,50±0,02 mm, 2,70±0,02 mm, 2,80±0,02 mm, 2,90±0,02 mm, 3,10±0,02 mm, 3,20±0,02 mm, 3,30±0,02 mm, 3,40±0,02 mm, 3,50± 0,02 mm, 6,05±0,02 mm, 9,15±0,02 mm e 9,77±0,02 mm. As espessuras no intervalo de 2,50 a 3,50 mm, são definidas como as de melhor desempenho deste compósito como MARE em trabalhos realizados anteriormente [NOHARA, 2003a; NOHARA; MARTIN; REZENDE, 2001] e as espessuras 6,05; 9,15 e 9,77 mm foram escolhidas para avaliação do método e do *software* utilizados neste trabalho.

Cálculo de λ_g

Assim, como apresentado no item 3.2.5.2 para o poli(difluoroetileno), no cálculo de λ_g dos corpos-de-prova de ferrocarbonila foram adotados os seguintes critérios para obtenção dos valores de λ_c , λ_x , ϵ_r' e μ_r' :

A) λ_c

Pela Equação 2.26 é calculado o comprimento de onda de corte (λ_c) utilizando-se o valor da frequência de corte (f_c), igual a 6,557 GHz (Tabela 2.2), para o guia de ondas na banda X (8,2 a 12,4 GHz). Substituindo-se os valores na Equação 2.26, obtém-se:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{2,998.10^8 \text{ m/s}}{6,557.10^9 \text{ s}^{-1}} = 45,721 \text{ mm}$$

B) λ_x

O valor de λ_g é calculado para apenas uma frequência, por esse motivo pode-se utilizar qualquer frequência na faixa de interesse para obter o valor de λ_x .

C) ε_r' e μ_r'

Para o cálculo de λ_g dos corpos-de-prova de ferrocbonila foram utilizados os valores de ε_r' e μ_r' experimentais publicados por Chen, Wu, Zhao, Yang, e Xiao (Tabela 3.3) [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005]. Nesse trabalho, tem-se a caracterização de amostras com a variação da fração volumétrica de ferrocbonila em resina epóxi obtidos a 10 GHz, em guia de ondas na banda X. Os valores da Tabela 3.3 podem ser utilizados como estimadores dos valores de permeabilidade e permissividade para toda a banda X, pois MARE baseados em ferrocbonila, como por exemplo, MARE em matriz de silicone, a variação desses parâmetros ao longo da banda X é da ordem de menos de 2% [WANG; AFSAR; GRIGNON, 2003; WANG; AFSAR; BAHADOOR, 2005; FENG; QIU; SHEN; LI, 2006; NOHARA, 2003a].

Tabela 3.3 – Dados experimentais de ϵ_r' , ϵ_r'' , μ_r' e μ_r'' de corpos-de-prova em fração volumétrica de ferrocarbonila em resina epóxi, em 10 GHz [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005].

Fração volumétrica FC	Porcentagem em massa FC (%)	ϵ_r'	ϵ_r''	μ_r'	μ_r''
0,08	40	3,80	0,10	1,18	0,17
0,10	45	3,90	0,12	1,22	0,20
0,12	50	4,80	0,15	1,25	0,22
0,15	55	5,50	0,20	1,28	0,32
0,17	60	6,00	0,25	1,34	0,35
0,20	65	6,10	0,30	1,37	0,38

D) λ_g

Para definir as faixas de espessura dos corpos-de-prova de ferrocarbonila com fração volumétrica entre 0,08 a 0,2 que atendem aos critérios do modelo Nicolson-Ross, foram calculados para as frequências de 8,2 GHz e 12,4 GHz as espessuras mínimas ($\lambda_g/18$) e máximas ($\lambda_g/2$) a partir dos dados da Tabela 3.3 e Equação 2.24, e apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores de $\lambda_g/18$ e $\lambda_g/2$ dos corpos-de-prova de ferrocarbonila para banda X.

Fração volumétrica de ferrocarbonila	Porcentagem em massa de ferrocarbonila (%)	$\lambda_g/18$ (mm)	$\lambda_g/18$ (mm)	$\lambda_g/2$ (mm)	$\lambda_g/2$ (mm)
		em 8,2 GHz	em 12,4 GHz	em 8,2 GHz	em 12,4 GHz
0,08	40	1,14	0,71	10,28	6,43
0,10	45	1,00	0,63	9,00	5,71
0,12	50	0,88	0,56	7,89	5,05
0,15	55	0,80	0,52	7,22	4,65
0,17	60	0,75	0,48	6,72	4,34
0,20	65	0,73	0,47	6,58	4,25

Os valores de λ_g , $\lambda_g/2$, $\lambda_g/4$ e $\lambda_g/18$ da ferrocarbonila em resina epóxi variando a fração volumétrica também foram calculados a partir dos dados da Tabela 3.3 e a Equação 2.24, apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores calculados de λ_g , $\lambda_g/2$, $\lambda_g/4$ e $\lambda_g/18$ dos corpos-de-prova de ferrocarbonila em resina epóxi na frequência principal da banda X ($f_o = 10,084$ GHz).

Fração volumétrica de ferrocarbonila	Porcentagem em massa de ferrocarbonila (%)	λ_g (mm)	$\lambda_g/2$ (mm)	$\lambda_g/4$ (mm)	$\lambda_g/18$ (mm)
0,08	40	14,75	7,38	3,69	0,82
0,10	45	14,28	7,14	3,57	0,79
0,12	50	12,60	6,30	3,15	0,70
0,15	55	11,56	5,78	2,89	0,64
0,17	60	10,77	5,38	2,69	0,59
0,20	65	10,55	5,28	2,64	0,58

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PARÂMETROS S

O gráfico da Figura 4.1 apresenta as medidas dos parâmetros S_{11} , S_{21} , S_{22} , e S_{12} na faixa de frequências compreendida entre 8,2 e 12,4 GHz, referentes à calibração do analisador de redes vetorial. Neste caso, o porta-amostra está sem o corpo-de-prova, ou seja, toda a calibração foi realizada considerando o ar atmosférico do porta-amostra como referência.

As curvas dos parâmetros S_{12} e S_{21} do gráfico da Figura 4.1 se sobrepõem no valor igual a 0 dB, não sendo possível observar diferenças entre as curvas na escala utilizada. A diferença entre o maior e o menor valor dos parâmetros S_{12} e S_{21} na faixa de frequências compreendida entre 8,2 e 12,4 GHz é igual a 0,004 dB. As curvas dos parâmetros S_{11} e S_{22} no gráfico da Figura 4.1 estão dentro de um intervalo compreendido entre -65 dB e -75 dB (retas tracejadas). Estes valores estão relacionados com a faixa dinâmica de medição dos parâmetros S_{11} e S_{22} , que neste caso deve ser utilizado até -65 dB para maior precisão das medidas.

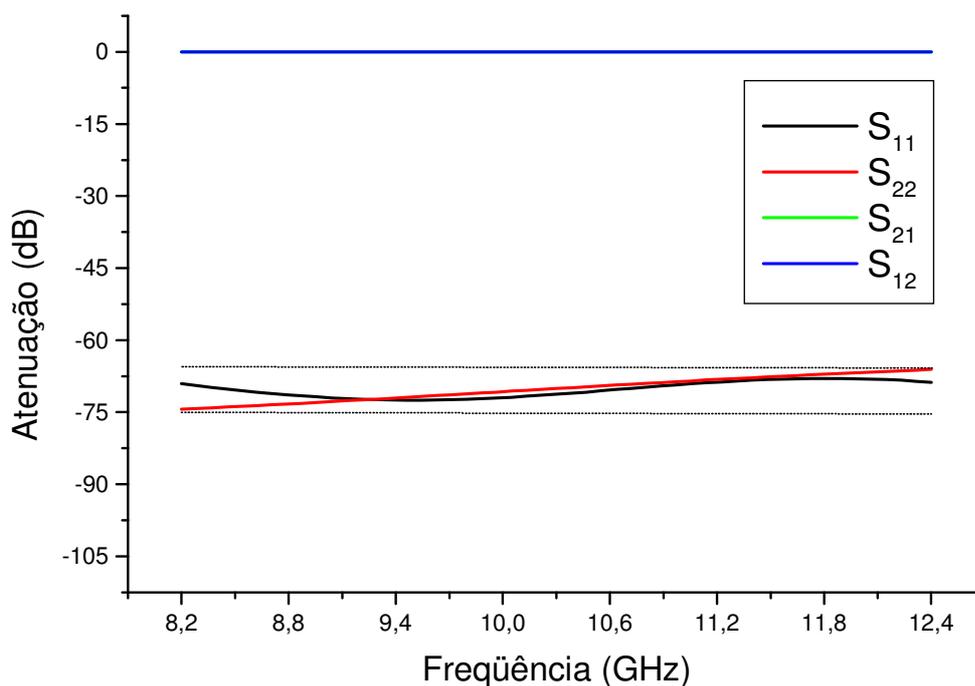


Figura 4.1 – Medidas experimentais dos parâmetros S_{11} , S_{21} , S_{22} , e S_{12} do ar atmosférico.

4.1.1 Ferrocarronila

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o estudo da influência da concentração da ferrocarronila e da espessura do corpo-de-prova nos parâmetros S_{11} e S_{22} (Energia refletida – E_r), S_{12} e S_{21} (Energia transmitida - E_t) e Energia absorvida (E_a).

4.1.1.1 Energia refletida (E_r)

As curvas de energia refletida (E_r) obtidas na caracterização dos corpos-de-prova de ferrocarronila estão apresentadas com o eixo das ordenadas a atenuação, em decibel (dB), e o eixo das abscissas em frequência, em gigahertz (GHz). Uma placa plana de alumínio foi utilizada como referência de material 100% refletor da

energia da onda eletromagnética, representada no gráfico da Figura 4.2 como a reta horizontal com valor de 0 dB (cor preta), identificada pela sigla “REF”. Assim, se o valor medido da energia refletida de um material estiver próximo da referência, maior é o seu caráter refletor. Para uma melhor visualização das curvas referentes às espessuras dos corpos-de-prova, são apresentados as curvas de parâmetro S_{11} para a energia refletida e as curvas do parâmetro S_{21} para energia transmitida, isto porque a diferença dos valores entre os parâmetros S_{11} e S_{22} e entre os parâmetros S_{12} e S_{21} é de no máximo 0,02 dB.

A Figura 4.2 apresenta as curvas de refletividade dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocarbonila, 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%, variando a espessura entre 2,50 mm e 3,50 mm, na faixa de frequências compreendidas entre 8,2 e 12,4 GHz. Pode-se observar para a concentração de 40% em massa (Figura 4.2 (a)) que quanto menor a espessura, menor é o valor de S_{11} . Esse comportamento não é observado somente para a espessura de 3,5 mm, pois a partir de 10 GHz o seu coeficiente de reflexão é menor em relação às espessuras de 3,1 mm a 3,4 mm. A concentração em massa de 45%, decresce o S_{11} com a diminuição da espessura, até a frequência de 11,3 GHz. A partir dessa frequência ocorre o inverso, isto é, a diminuição da espessura faz com que haja o acréscimo de S_{11} .

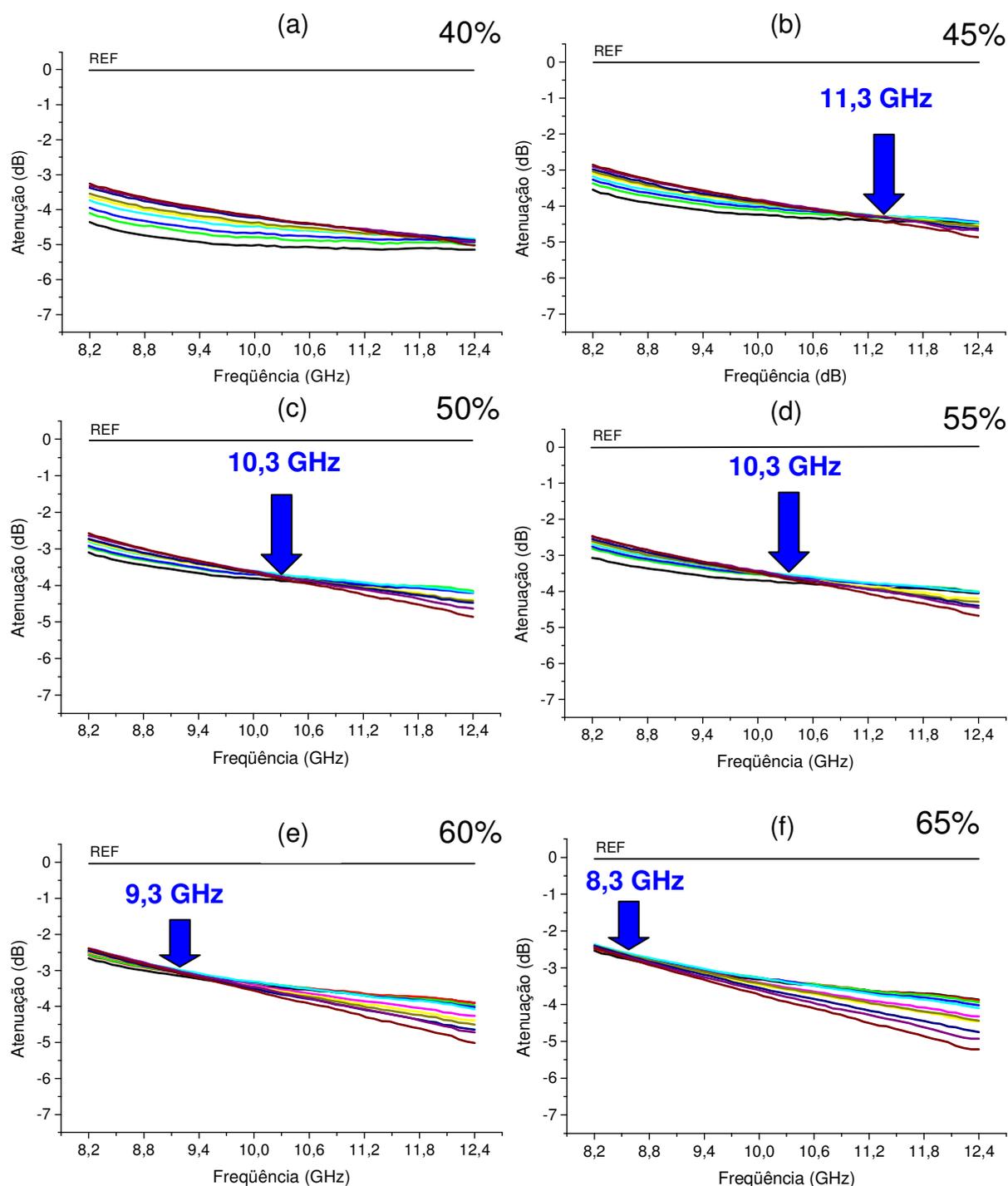


Figura 4.2 – Medidas da energia refletida (S11) dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocarbonila: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm; (■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5mm.

Um comportamento semelhante é observado para as concentrações de 50%, 55%, 60% e 65% em massa de ferrocarbonila, isto é, em frequências menores o decréscimo da espessura provoca uma diminuição no valor de S_{11} e a partir de uma determinada frequência há uma inversão do valor de S_{11} , isto é, o decréscimo da espessura faz com que o valor de S_{11} aumente, nas frequências de 10,3 GHz, 10,3 GHz, 9,3 GHz e 8,3 GHz, (indicados pelas setas azuis nos gráficos da Figura 4.2). Geralmente, a tendência para os MARE é que a diminuição da espessura para uma mesma concentração de aditivos promove a diminuição do valor de S_{11} , ou seja, uma variação linear, mas pode-se observar que em determinadas frequências, no intervalo de espessuras analisado, ocorre uma inversão nesse comportamento. Isto mostra que os valores de S_{11} no material em estudo variam de forma não linear.

4.1.1.2 Energia Transmitida (E_t)

As curvas de energia transmitida (S_{21}), obtidas na caracterização dos corpos-de-prova de ferrocarbonila, no eixo da ordenada em atenuação, em decibel (dB), e o eixo da abscissa em frequência, em gigahertz (GHz). O ar atmosférico é considerado como referência, isto é, 0 dB, apresentado pela curva na cor preta, identificada pela sigla "REF". Assim, se o valor medido da energia transmitida de um material estiver próximo da referência, maior será a sua transmissão. A onda eletromagnética propagando-se em um meio sempre é atenuada, isto é função da distância, independente desta ser transmitida em espaço livre, guia de onda ou meio coaxial [BALANIS, 1989a]. Uma vez que, o sinal de referência (transmissão do sinal do ar) foi normalizado para todas as medidas da energia transmitida, o efeito da

atenuação da onda eletromagnética no guia de ondas não é considerado nas medidas das formulações e nos cálculos.

A Figura 4.3 apresenta as curvas de energia transmitida dos corpos-de-prova em diferentes concentrações de ferrocarbonila, 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%, variando a espessura entre 2,50 mm e 3,50 mm, na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz. Pode-se observar nas curvas da Figura 4.3, dois fenômenos comuns em todas as formulações: 1) os valores de S_{21} entre as frequências 8,2 e 8,8 GHz são menores em relação aos obtidos em frequências maiores, 2) os valores de atenuação da energia transmitida são maiores no corpo-de-prova de maior espessura (3,5 mm) e diminui gradativamente à medida que diminui a espessura do corpo-de-prova até 2,5 mm. Os valores médios de atenuação da energia transmitida, obtidos para as formulações em estudo, encontram-se entre: -2,5 e -3,5 dB para 40%, -3,5 e -4,5 dB para 45%, -4,0 e -5,0 dB para 50%, -4,0 e -5,5 dB para 55%, -5,0 e 6,0 dB para 60% e -5,5 e -6,5 dB para 65%, na Figura 4.3 (a), (b), (c), (d), (e) e (f), respectivamente.

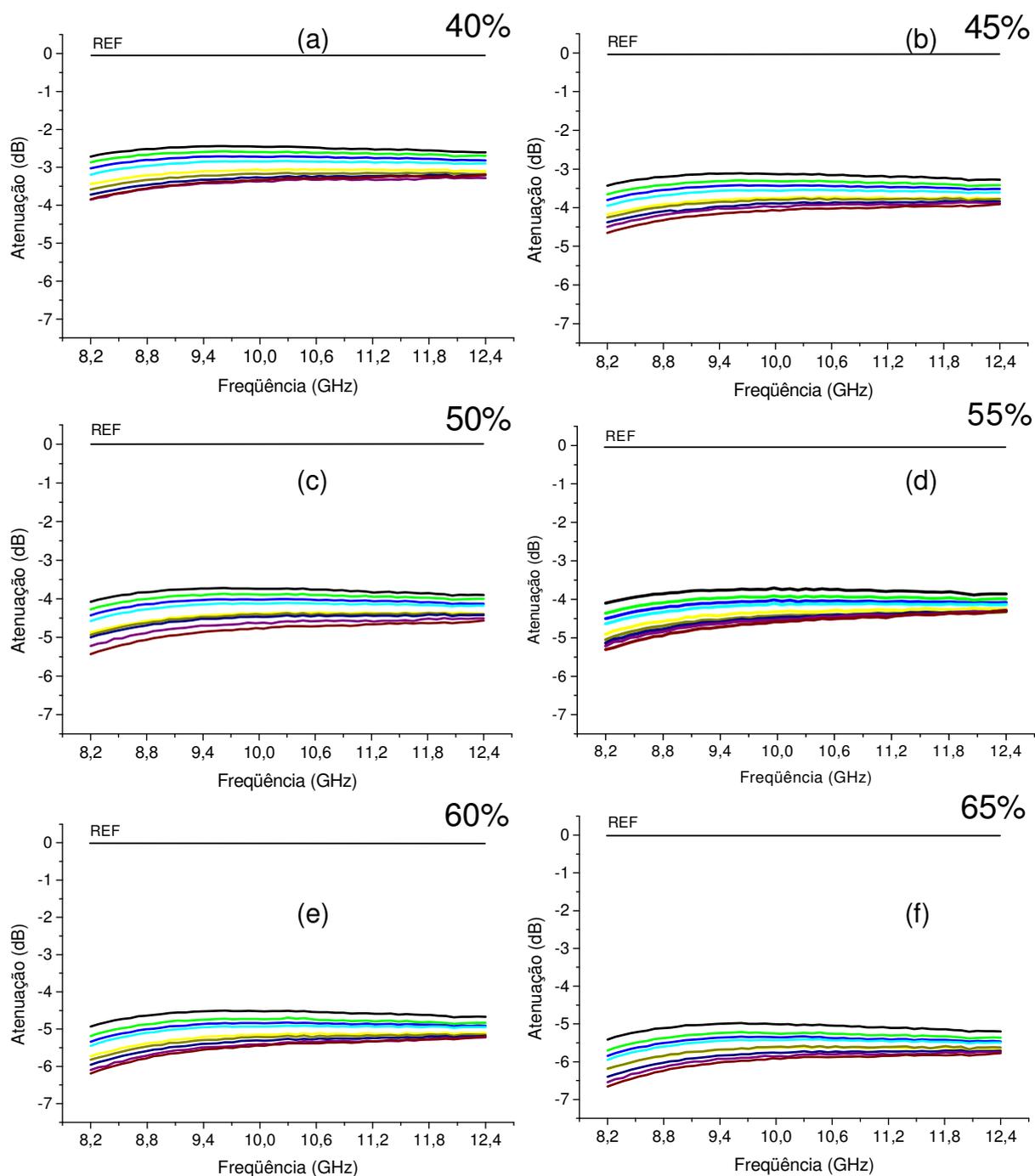


Figura 4.3 – Medidas da energia transmitida (S_{21}) dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocementa: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm; (■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5 mm.

4.1.1.3 Energia Absorvida (E_a)

Os gráficos de energia absorvida estão representados na Figura 4.4, com o eixo da ordenada representando os valores de energia absorvida em porcentagem e o eixo da abscissa representa as frequências em GHz. As curvas nos gráficos referem-se às espessuras dos corpos-de-prova variando de 2,5 mm a 3,5 mm para todas as formulações preparadas.

Na Figura 4.4 (a), que apresenta a ferrocarbonila com 40% em massa de ferrocarbonila observa-se que o acréscimo de espessura do corpo-de-prova promove um maior aumento da energia absorvida, em uma relação quase linear com o aumento da frequência. Para a espessura de 2,5 mm, a energia absorvida está em torno de 9% em 8,2 GHz e em torno de 15% em 12,4 GHz. Já para a espessura de 3,5 mm, a energia absorvida está em torno de 12% em 8,2 GHz e de aproximadamente 20% em 12,4 GHz. O comportamento quase linear é devido à homogeneidade da distribuição das partículas nos corpos-de-prova, e são também observados nas outras concentrações processadas (45%, 50%, 55%, 60% e 65%).

Nas curvas da Figura 4.4 (e) e (f), pode-se observar maiores valores de energia absorvida, principalmente o gráfico referente à formulação com 65% em massa, que chega até 44% de absorção na espessura de 3,5 mm. A interação dos centros absorvedores (ferrocarbonila) com a onda eletromagnética está diretamente relacionada com a concentração destas partículas, ou seja, à medida que se aumenta a concentração de ferrocarbonila observa-se um aumento de energia absorvida pelo material.

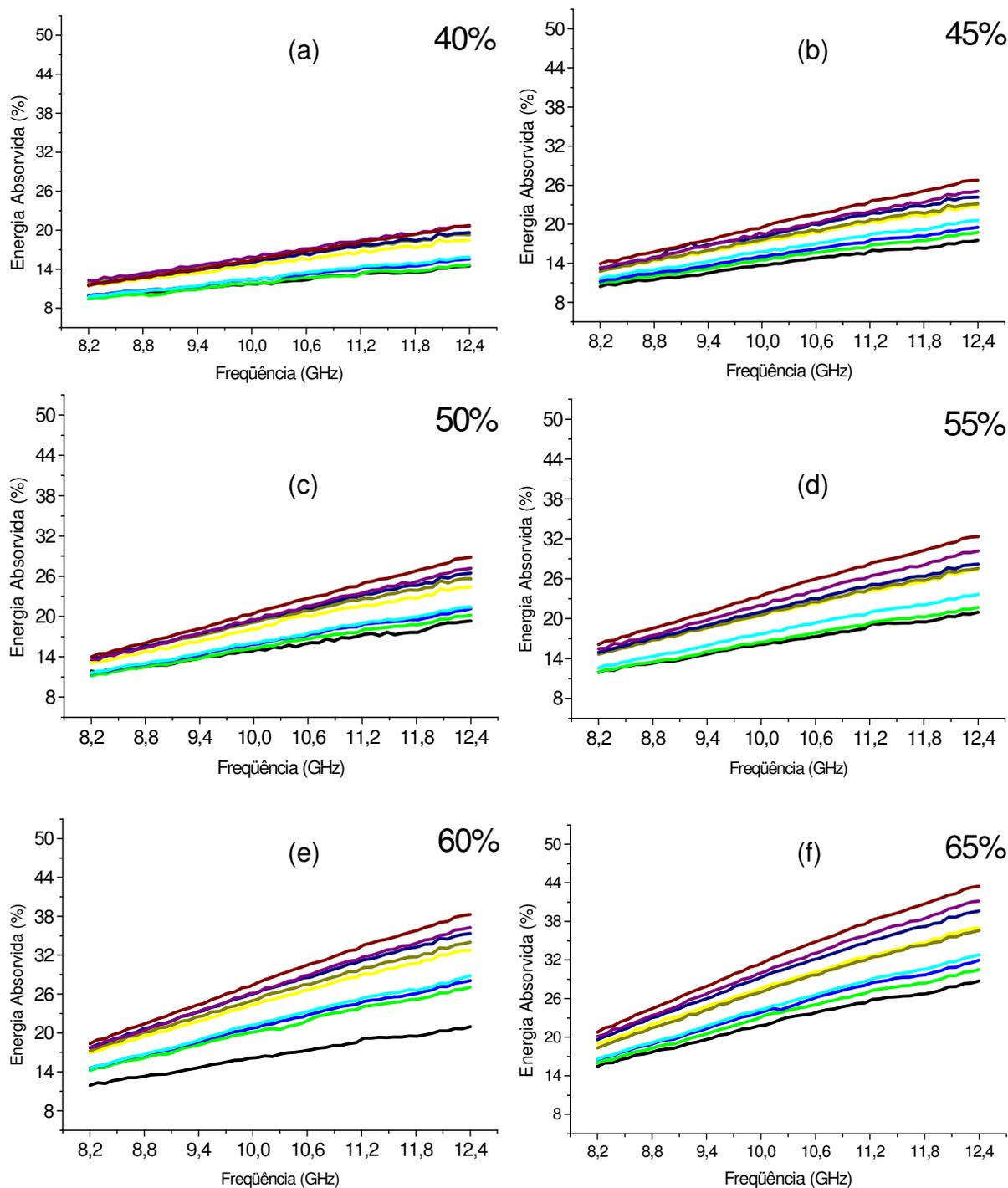


Figura 4.4 – Medidas da energia absorvida (E_a) dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocementa: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm; (■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5mm.

Estes resultados mostram que concentrações maiores favorecem a atenuação da radiação incidente. Porém, há um compromisso em definir a faixa de atenuação de interesse, pois em trabalhos publicados por Nohara e Rezende [NOHARA, 2001; NOHARA, 2003a; REZENDE, 2001], é mencionado que há limites para o fenômeno de energia absorvida, de forma que para concentrações maiores que 65%, a impedância na superfície do material pode tornar o material cada vez mais refletor, dificultando a penetração da onda eletromagnética na superfície do corpo-de-prova, diminuindo desta forma a energia absorvida no material.

4.1.1.4 Refletividade com placa metálica (E_{rp})

As curvas de refletividade do MARE sobre uma placa metálica são apresentadas na Figura 4.5, para a concentração de ferrocarbonila (40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%, em massa) e espessuras de 2,5 mm a 3,5 mm. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.5, que o aumento da espessura desloca o máximo da atenuação para frequências menores (indicado pela seta azul), bem como há um aumento da atenuação da energia da onda eletromagnética com o aumento da concentração, de -5,4 dB para a concentração de 40% em massa na frequência de 11,5 GHz (Figura 4.4 (a)), -7,7 dB em 45% em massa na frequência de 10,6 GHz (Figura 4.4 (b)), -8,7 dB para 50% em massa na frequência de 9,8 GHz (Figura 4.4 (c)), -9,8 dB para 55% em massa na frequência de 9,6 GHz (Figura 4.4 (d)), -13,7 dB para 60% em massa na frequência de 9,1 GHz (Figura 4.4 (e)) e -19,1 dB para 65% em massa na frequência de 8,6 GHz (Figura 4.4 (f)). O mesmo comportamento é observado para todas as espessuras, isto é, o aumento da concentração de ferrocarbonila para uma espessura fixa desloca o máximo da atenuação para frequências menores.

Pode-se observar na Figura 4.5 que todas as curvas apresentam um formato em V. À medida que a concentração aumenta, o máximo da ressonância das curvas vai se deslocando para a parte central da faixa de frequências, compreendida entre 8,2 – 12,4 GHz, e depois vai se deslocando para a esquerda. Este comportamento das curvas de atenuação em V é típico de predominância do cancelamento de fase da onda eletromagnética, no mecanismo de atenuação da energia da onda eletromagnética. Quando a onda eletromagnética atravessa um material com espessura de um quarto de comprimento elétrico da onda eletromagnética ($\lambda/4$) e encontra uma placa metálica (material condutor) sob o MARE, a onda refletida na placa sofre cancelamento com a onda eletromagnética refletida na superfície externa do material. A sobreposição da onda incidente com a onda refletida na placa causa o cancelamento de fase da onda [SIMÕES, 2005].

Soma-se a esse efeito a absorção intrínseca da energia da onda eletromagnética pelas partículas de ferrocenona e multireflexões internas. As multireflexões internas ocorrem proporcionalmente ao aumento da concentração de ferrocenona, ou seja, a energia eletromagnética ao incidir nas partículas de ferrocenona sofre reflexão e absorção sucessivas, de forma que a cada reflexão e absorção da onda pelas partículas, o sinal é atenuado.

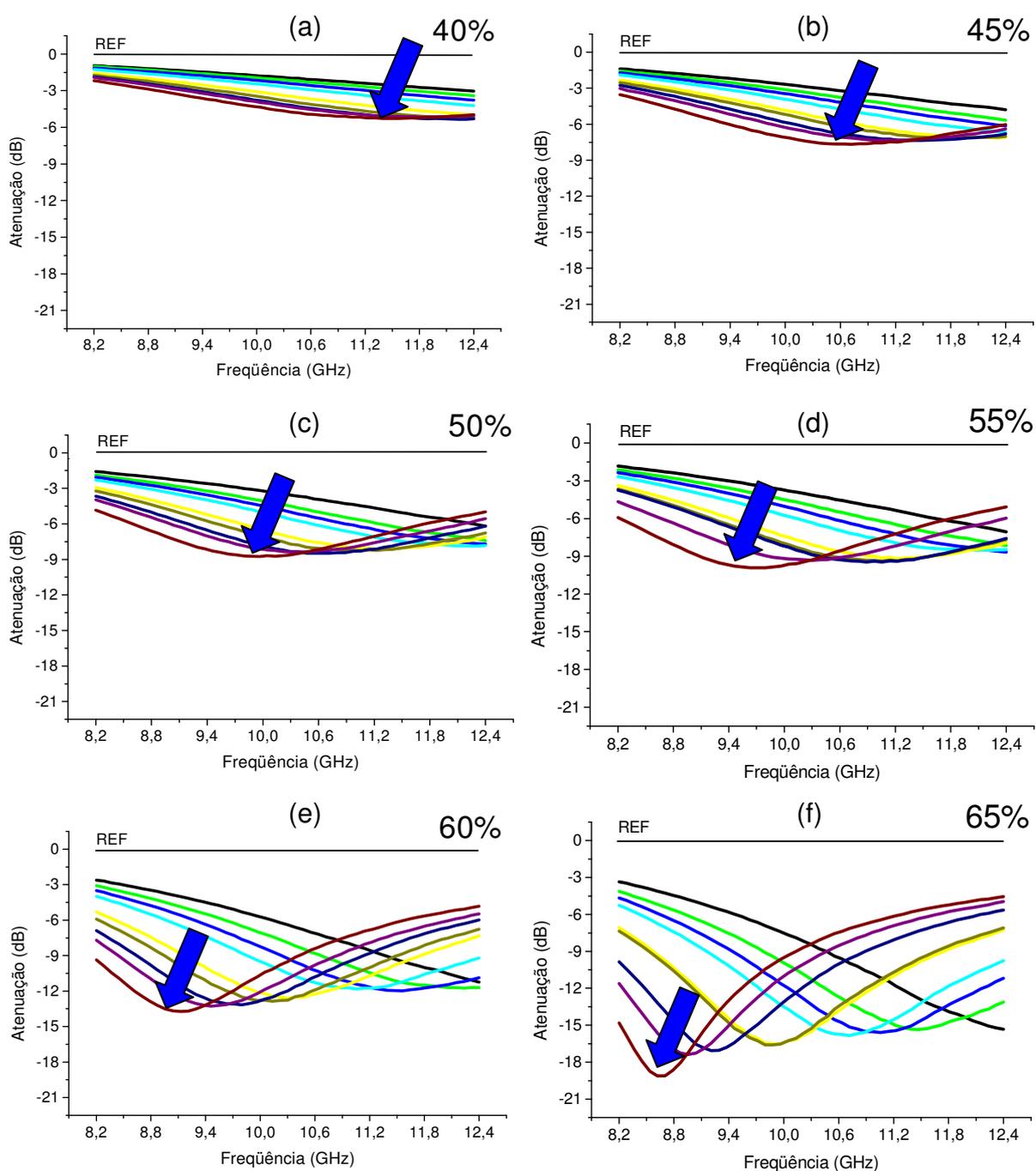


Figura 4.5 – Medidas de refletividade com placa metálica dos corpos-de-prova em diferentes concentrações em massa de ferrocarbonila: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65%. As curvas são as espessuras medidas, representadas pelas cores: (■) 2,5 mm; (■) 2,7 mm; (■) 2,8 mm; (■) 2,9 mm; (■) 3,1 mm; (■) 3,2 mm; (■) 3,3 mm; (■) 3,4 mm e (■) 3,5mm.

4.2 PERMISSIVIDADE E PERMEABILIDADE COMPLEXAS

A seguir são apresentados os resultados de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) e de resina epóxi aditada com ferrocarbonila, na faixa de freqüências compreendida entre 8,2 e 12,4 GHz.

4.2.1 Poli(difluoroetileno)

A Tabela 4.1 mostra os valores calculados de λ_g para a freqüência de 10 GHz para todas as espessuras de poli(difluoroetileno), a escolha desta freqüência, foi baseada por ser aproximadamente a freqüência central na banda X (média aritmética entre 8,2 e 12,4). A Tabela 4.1 também mostra a relação da espessura com os graus da fase de um comprimento de onda (1 comprimento de onda guiado λ_g possui 360° da fase da onda eletromagnética). Dessa forma, foi escolhido um intervalo de espessuras (d) que abrange o intervalo $\lambda_g/18 < d < \lambda_g/2$, que corresponde em termos de valores de graus da fase da onda eletromagnética (φ) igual a $20^\circ < \varphi < 180^\circ$, bem como valores abaixo do limite inferior, igual a $\lambda_g/27$ ($13,3^\circ$) e acima do limite superior, igual a $\lambda_g/1,5$ (240°) e $\lambda_g/1,0$ (360°).

Tabela 4.1 – Valores de espessura dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) em milímetros (mm) e λ_g em 10 GHz.

Espessura (mm)	Espessura Elétrica (λ_g)	Graus da fase de um comprimento de onda (φ)
0,88	$\lambda_g / 27$	13,3°
1,30	$\lambda_g / 18$	20,0°
1,36	$\lambda_g / 17$	21,2°
1,72	$\lambda_g / 14$	25,7°
2,35	$\lambda_g / 10$	36,0°
3,45	$\lambda_g / 7$	51,4°
4,10	$\lambda_g / 6$	60,0°
4,60	$\lambda_g / 5$	72,0°
5,75	$\lambda_g / 4$	90,0°
7,72	$\lambda_g / 3$	120°
9,77	$\lambda_g / 2,4$	150°
11,73	$\lambda_g / 2$	180°
15,65	$\lambda_g / 1,5$	240°
23,50	$\lambda_g / 1,0$	360°

Na Figura 4.6 estão apresentados as curvas dos parâmetros S dos corpos-de-prova com as espessuras 0,88 mm; 1,30 mm; 1,36 mm; 1,72 mm e 2,35 mm, correspondendo a $\lambda_g/27$, $\lambda_g/18$, $\lambda_g/17$, $\lambda_g/14$ e $\lambda_g/10$ (calculados para 10 GHz), respectivamente, na faixa de freqüências compreendida entre 8,2 e 12,4 GHz.

Pode-se observar que os valores de S_{21} (transmissão) para todas as espessuras estão próximos de zero. Para as espessuras de 0,88; 1,30; 1,36; 1,72 e 2,35 mm, os valores médios de S_{21} na banda X são iguais a -0,08 dB, -0,14 dB, -0,15 dB, -0,23 dB e -0,42 dB, respectivamente; isto é, quanto maior a espessura menor a quantidade de energia da onda eletromagnética que atravessa o material. Os valores obtidos demonstram que o poli(difluoroetileno) é um material relativamente transparente a microondas.

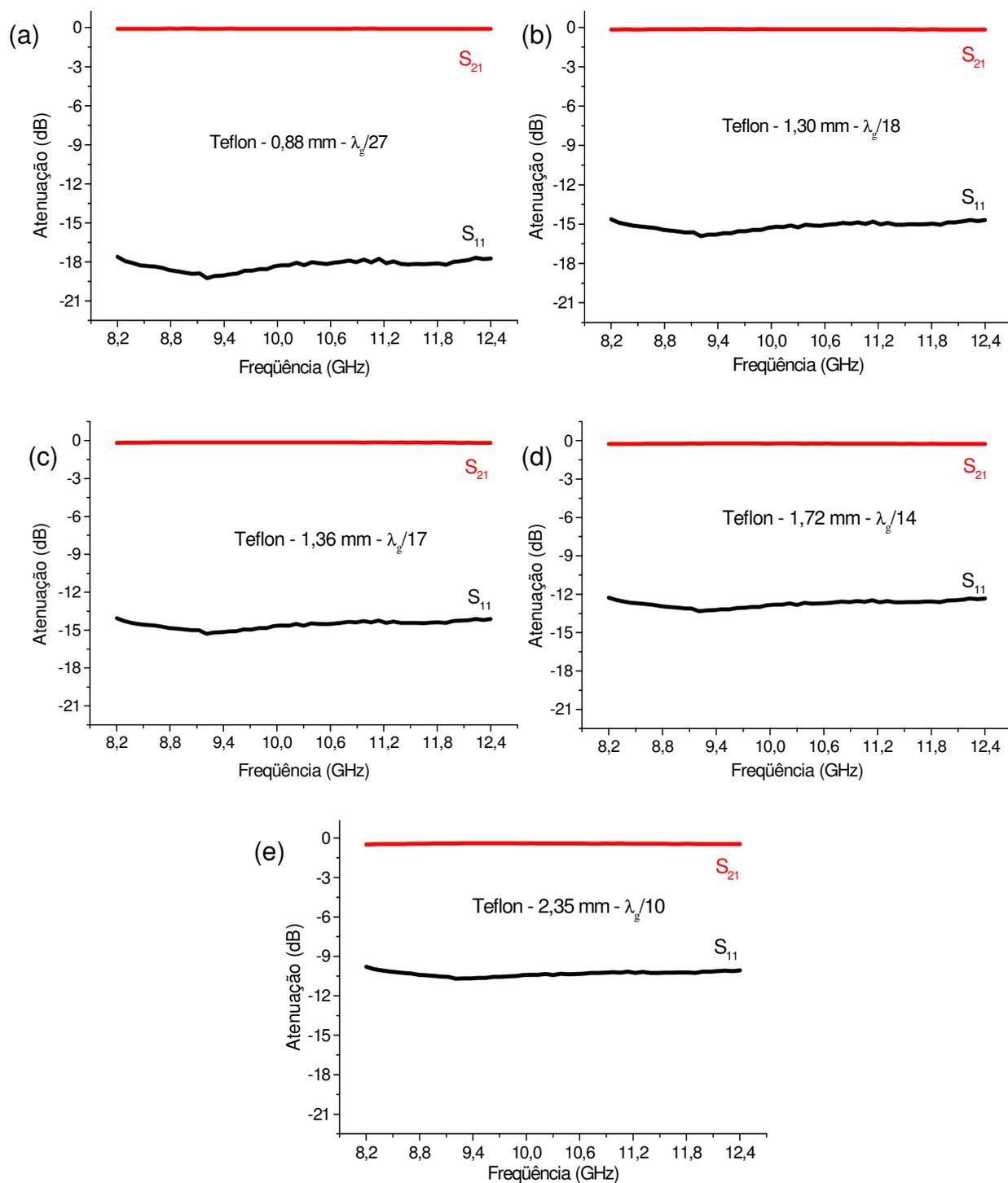


Figura 4.6 – Valores de parâmetros S_{21} e S_{11} dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: (a) 0,88 mm; (b) 1,30 mm; (c) 1,36 mm; (d) 1,72 mm e (e) 2,35 mm.

Pode-se observar nas curvas da Figura 4.6 que o aumento da espessura faz com que o valor de S_{11} (reflexão) se aproxime da referência em 0 dB. Para as espessuras de 0,88; 1,30; 1,36; 1,72 e 2,35 mm, os valores médios de S_{11} na banda X são iguais a -18 dB, -15 dB, -14 dB, -13 dB e -11 dB, respectivamente; isto é, quanto maior a espessura, maior o caráter refletor do material.

Na Figura 4.7 estão apresentados as curvas de permissividade e permeabilidade complexa na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz, dos corpos-de-prova com espessuras de 0,88 mm; 1,30 mm; 1,36 mm; 1,72 mm e 2,35 mm, calculados pelo *software* Agilent 85071E. Como apresentado no item 2.5.4.1, o polímero poli(difluoroetileno) possui valores de $\epsilon_r' = 2,03$, $\epsilon_r'' = 0,0008$, $\mu_r' = 1,00$ e $\mu_r'' = 0,00$ para a frequência de 10 GHz, sendo que a variação desses valores é da ordem de 1% para as outras frequências na banda X [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a; HIPPEL, 1954; NICOLSON; ROSS, 1970; WEIR, 1974]. Observa-se que os valores de ϵ_r' e μ_r' para todas as espessuras estão relativamente próximos dos valores divulgados pela literatura.

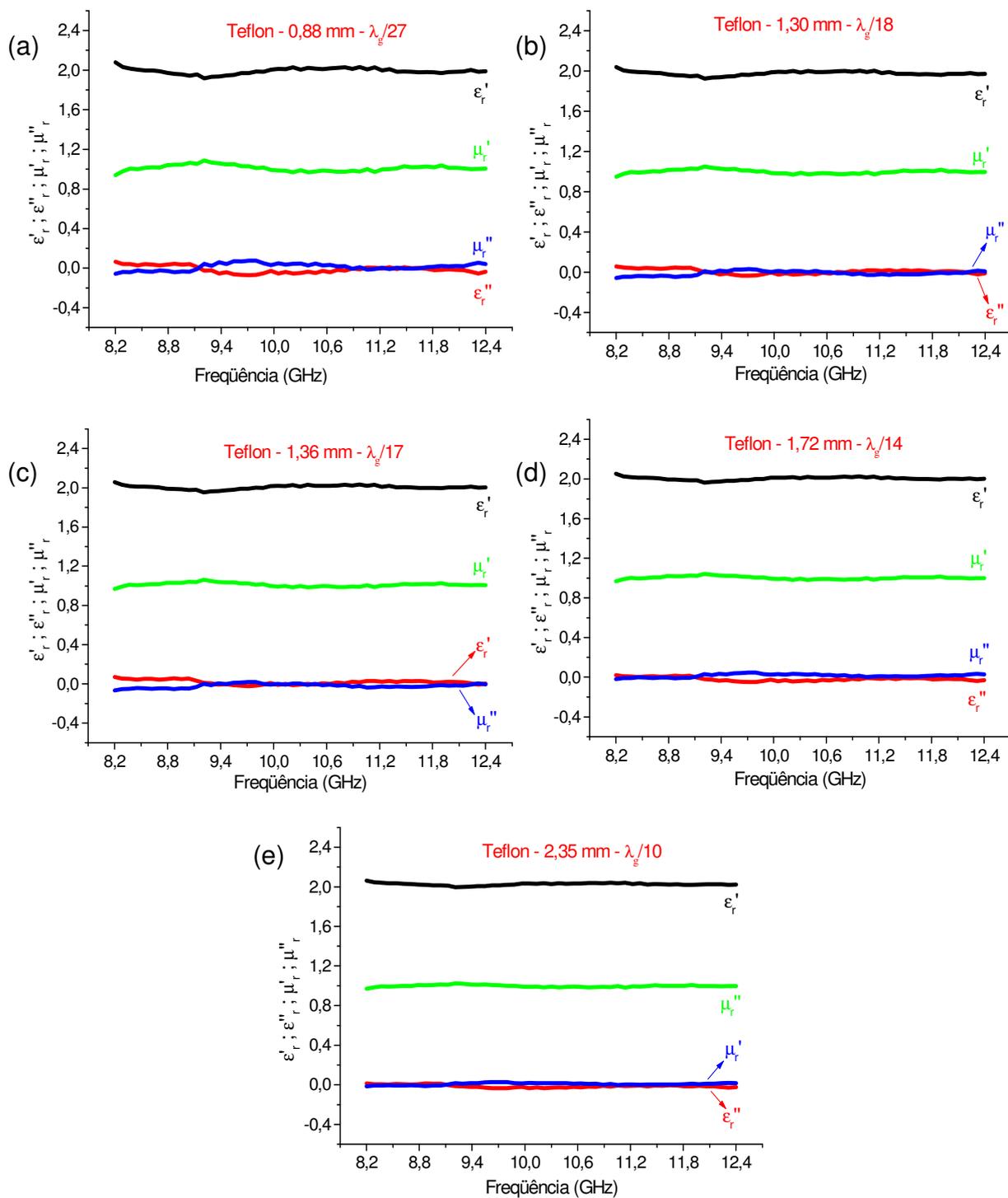


Figura 4.7 – Valores de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: (a) 0,88 mm; (b) 1,30 mm; (c) 1,36 mm; (d) 1,72 mm e (e) 2,35 mm.

Entretanto, pode-se observar pelas curvas dos parâmetros de permeabilidade e permissividade complexas que seus valores possuem uma variação menor dentro do intervalo de frequências, conforme a espessura aumenta. Para uma melhor análise dessa variação, a Tabela 4.2 apresenta alguns cálculos para a faixa de frequências compreendidas entre 8,2 e 12,4 GHz: valores médios de permissividade e permeabilidade complexas (média aritmética), sua diferença entre o maior e o menor valor (Δ) e porcentagem (%), esta última definida como o valor percentual da diferença (Δ) em relação ao valor médio da propriedade.

Tabela 4.2 – Valores médios de permissividade e permeabilidade complexas, diferença entre o maior e o menor valor (Δ) e o valor percentual da diferença (Δ) em relação ao valor médio da propriedade (%) entre 8,2 e 12,4 GHz para os corpos-de-prova com espessuras 0,88 mm ($\lambda_g/27$), 1,30 mm ($\lambda_g/18$), 1,36 mm ($\lambda_g/17$), 1,72 mm ($\lambda_g/14$) e 2,35 mm ($\lambda_g/10$).

Espessura (mm) / λ_g	ϵ_r' (média)	$\Delta\epsilon_r'$ (%)	ϵ_r'' (média)	$\Delta\epsilon_r''$	μ_r' (média)	$\Delta\mu_r'$ (%)	μ_r'' (média)	$\Delta\mu_r''$
0,88 ($\lambda_g/27$)	1,99	0,16 (8,04)	-0,01	0,13	1,01	0,15 (14,8)	0,01	0,13
1,30 ($\lambda_g/18$)	1,97	0,11 (5,58)	0,01	0,09	0,99	0,10 (9,90)	-0,01	0,09
1,36 ($\lambda_g/17$)	2,00	0,10 (5,00)	0,02	0,09	1,01	0,09 (8,91)	-0,02	0,09
1,72 ($\lambda_g/14$)	2,00	0,09 (4,50)	-0,02	0,07	1,00	0,07 (7,00)	0,02	0,06
2,35 ($\lambda_g/10$)	2,03	0,07 (3,44)	-0,01	0,05	0,99	0,05 (5,05)	0,01	0,04

Pode-se observar pela Tabela 4.2 que o aumento da espessura provoca uma diminuição nos valores de $\Delta\epsilon_r'$, $\Delta\epsilon_r''$, $\Delta\mu_r'$ e $\Delta\mu_r''$. Esta diminuição está relacionada com o aumento da fase da onda eletromagnética que interage com o material, de $13,3^\circ$ (0,88 mm) até 36° (2,35 mm), o que aumenta a precisão e a

exatidão do algoritmo de Nicolson-Ross. Os valores de ε_r' e μ_r' se aproximam dos valores de literatura $\varepsilon_r' = 2,03$ e $\mu_r' = 1,00$ conforme a espessura aumenta, bem como a diferença percentual entre $\Delta\varepsilon_r'$ e ε_r' diminui, passando de 8,04% (0,88 mm) para 3,44% (2,35 mm). O mesmo ocorre entre $\Delta\mu_r'$ e μ_r' , passando de 14,8% (0,88 mm) para 5,05% (2,35 mm). Pode-se observar também que, os parâmetros ε_r'' e μ_r'' apresentam valores negativos, indicando falta de exatidão no cálculo, provocado por uma quantidade insuficiente de fase da onda eletromagnética que interage com o material, o que repercute nos valores calculados pelo algoritmo Nicolson-Ross.

A Figura 4.8 mostra as curvas dos parâmetros S_{11} e S_{21} dos corpos-de-prova com espessuras 3,45 mm; 4,10 mm; 4,60 mm; 5,75 mm e 7,72 mm, que correspondem a $\lambda_g/7$, $\lambda_g/6$, $\lambda_g/5$, $\lambda_g/4$ e $\lambda_g/3$, respectivamente. Pode-se observar que as curvas do parâmetro S_{21} , apresentadas na Figura 4.8 (a), (b) e (c) estão com os valores próximos de zero. Para as espessuras de 3,45 mm, 4,10 mm e 4,60 mm o valor médio de S_{21} é igual a -0,72 dB, -0,87 dB e -1,00 dB, respectivamente. Pode-se observar que a curva de S_{21} a partir da espessura de 4,60 mm até a espessura de 7,72 mm inicia progressivamente uma inclinação com coeficiente angular positivo.

Diferentemente do que foi observado no gráfico da Figura 4.6, os parâmetros S_{11} das curvas da Figura 4.8 não exibem um comportamento aproximadamente linear e horizontal em função da frequência. A partir da espessura igual a 4,60 mm até a espessura de 7,72 mm a curva progressivamente apresenta um perfil em V, ou seja, típico de uma ressonância. Para o poli(difluoroetileno) esta ressonância não está relacionada com absorção intrínseca, uma vez que o poli(difluoroetileno) é relativamente muito transparente às ondas eletromagnéticas, mas este comportamento está relacionado com cancelamento de fase que ocorre entre as ondas eletromagnéticas refletidas nas faces anterior e posterior do corpo-de-prova.

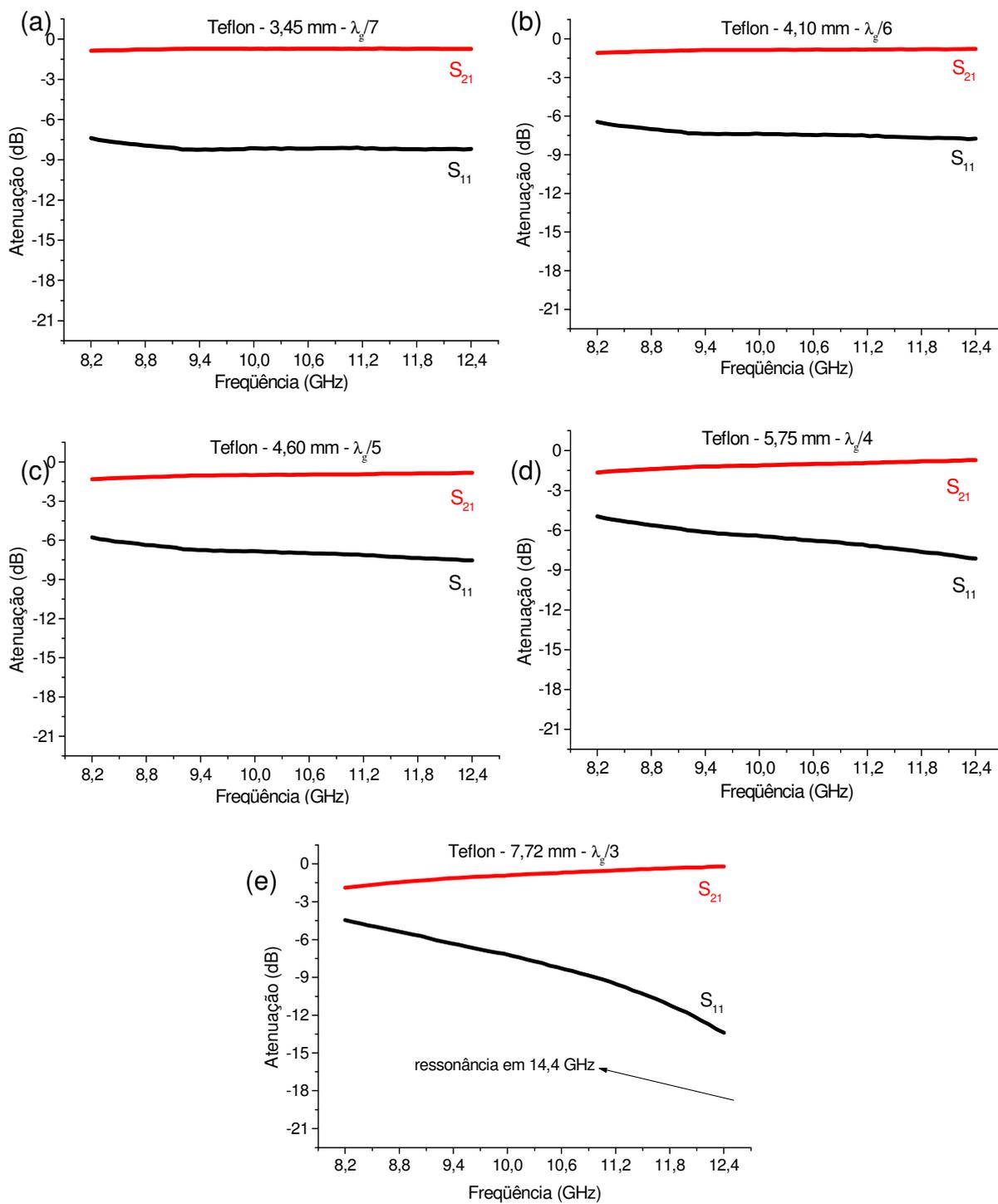


Figura 4.8 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: (a) 3,45 mm; (b) 4,10 mm; (c) 4,60 mm; (d) 5,75 mm e (e) 7,72 mm.

Na Figura 4.9 estão apresentados os gráficos de permissividade e permeabilidade complexas na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz, dos corpos-de-prova com as espessuras 3,45; 4,10; 4,60; 5,75 e 7,72 mm, calculados pelo *software* Agilent 85071E. Comparando as curvas da Figura 4.9 com as curvas da Figura 4.7, observa-se que o aumento da espessura dos corpos-de-prova resultou em valores de permeabilidade e permissividade mais constantes em função da frequência, isto é, uma menor variação dos valores ao longo da banda X. Para uma melhor análise dessa variação, a Tabela 4.3 apresenta alguns cálculos para a faixa de frequências compreendidas entre 8,2 e 12,4 GHz: valores médios de permissividade e permeabilidade complexas (média aritmética), sua diferença entre o maior e o menor valor (Δ) e porcentagem (%), esta última definida como o valor percentual da diferença (Δ) em relação ao valor médio da propriedade.

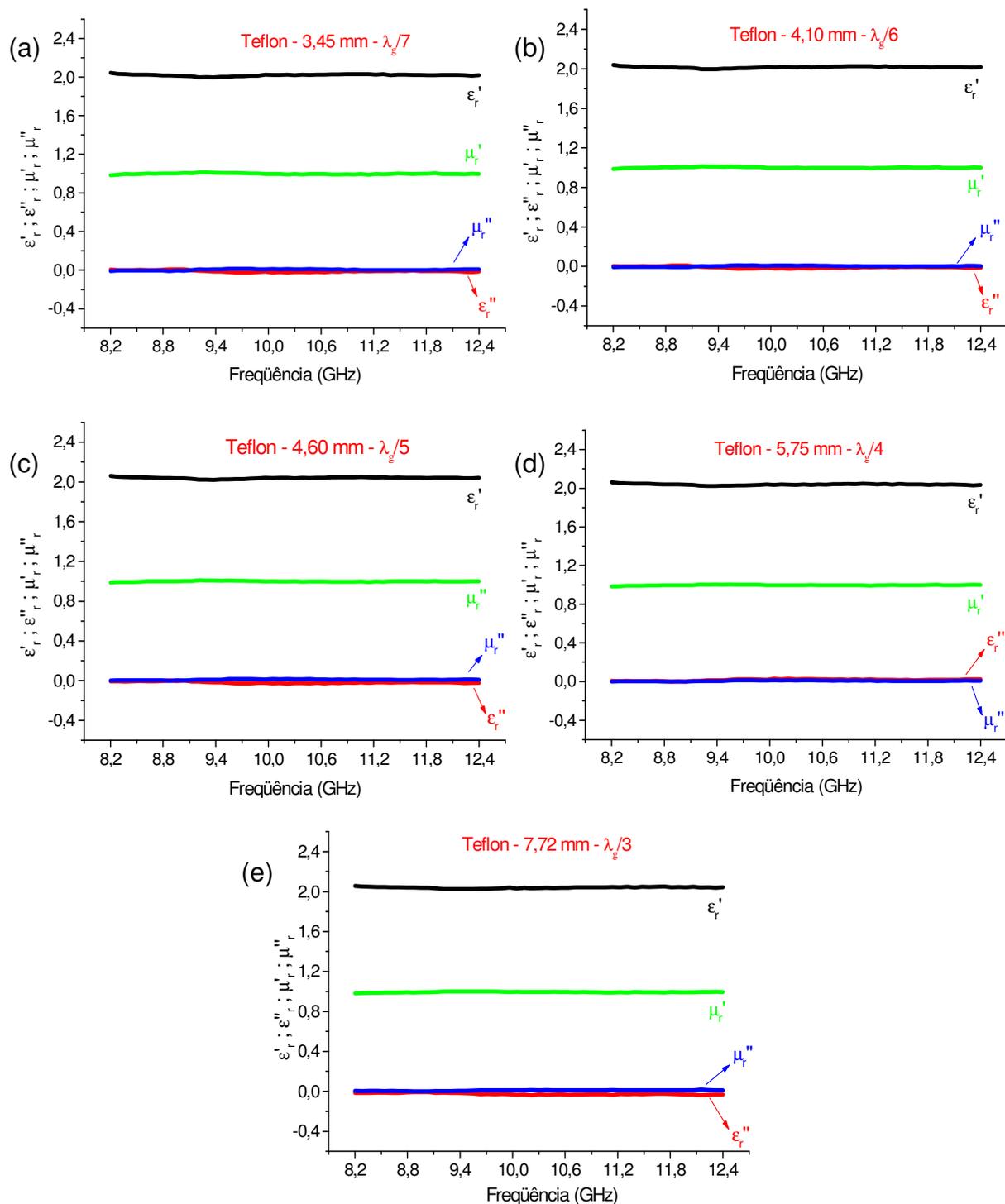


Figura 4.9 – Valores de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras: (a) 3,45 mm; (b) 4,10 mm; (c) 4,60 mm; (d) 5,75 mm e (e) 7,72 mm.

Pode-se observar pelos dados da Tabela 4.3 que os valores da permeabilidade e permissividade, para todas as espessuras, estão em torno do mesmo valor, diferindo somente na terceira casa decimal. Uma vez que, há uma quantidade maior da fase da onda eletromagnética interagindo com o material nas espessuras de 3,45 mm ($51,4^\circ$) a 7,72 mm (120°), o algoritmo de Nicolson-Ross possui maior precisão e exatidão. Nota-se, ainda, que os valores obtidos do corpo-de-prova com espessura 5,75 mm ($\lambda_g/4$) são justamente os valores mais próximos e com menor variação percentual da permissividade e permeabilidade complexas do poli(difluoroetileno), comprovando um dos critérios adotado pelo modelo Nicolson-Ross, o qual recomenda como espessura ótima o valor equivalente ao comprimento de onda $\lambda_g/4$ [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

Tabela 4.3 – Valores médios de permissividade e permeabilidade complexas, diferenças entre o maior e o menor valor (Δ) e valor percentual da diferença (Δ) em relação ao valor médio da propriedade (%) entre 8,2 e 12,4 GHz para os corpos-de-prova com espessuras 3,45 mm ($\lambda_g/7$), 4,10 mm ($\lambda_g/6$), 4,60 mm ($\lambda_g/5$), 5,75 mm ($\lambda_g/4$) e 7,72 mm ($\lambda_g/3$).

Espessura (mm) / λ_g	ϵ_r' (média)	$\Delta\epsilon_r'$ (%)	ϵ_r'' (média)	$\Delta\epsilon_r''$	μ_r' (média)	$\Delta\mu_r'$ (%)	μ_r'' (média)	$\Delta\mu_r''$
3,45 ($\lambda_g/7$)	2,02	0,05 (2,47)	0,01	0,03	1,00	0,02 (2,00)	0,00	0,02
4,10 ($\lambda_g/6$)	2,01	0,04 (1,99)	0,01	0,03	1,00	0,03 (3,00)	0,00	0,02
4,60 ($\lambda_g/5$)	2,03	0,04 (1,97)	0,01	0,03	1,00	0,02 (2,00)	0,00	0,02
5,75 ($\lambda_g/4$)	2,03	0,03 (1,47)	0,01	0,03	1,00	0,02 (2,00)	0,00	0,01
7,72 ($\lambda_g/3$)	2,04	0,03 (1,47)	0,02	0,03	0,99	0,02 (2,02)	0,01	0,02

A Figura 4.10 mostra as curvas dos parâmetros S_{11} e S_{21} dos corpos-de-prova com espessuras 9,77 mm; 11,73 mm; 15,65 mm e 23,50 equivalentes a $\lambda_g/2,4$; $\lambda_g/2$; $\lambda_g/1,5$ e $\lambda_g/1$, respectivamente. Todas as espessuras apresentam a curva do parâmetro S_{11} com uma ressonância intensa, com valores de -30 dB a -49 dB, ou seja, uma atenuação no valor de S_{11} de até 99,999%.

Como citado anteriormente, esta ressonância está relacionada com o cancelamento de fase que ocorre entre as ondas eletromagnéticas refletidas nas faces anterior e posterior do corpo-de-prova. As Figuras 4.10 (b) e (d) apresentam o pico de ressonância na mesma frequência (10,048 GHz), desta forma observa-se que o cálculo efetuado para $\lambda_g/2$ para uma determinada frequência pode ser extrapolado para os seus múltiplos, ou seja, de $n.\lambda_g/2$ a $n \geq 1$.

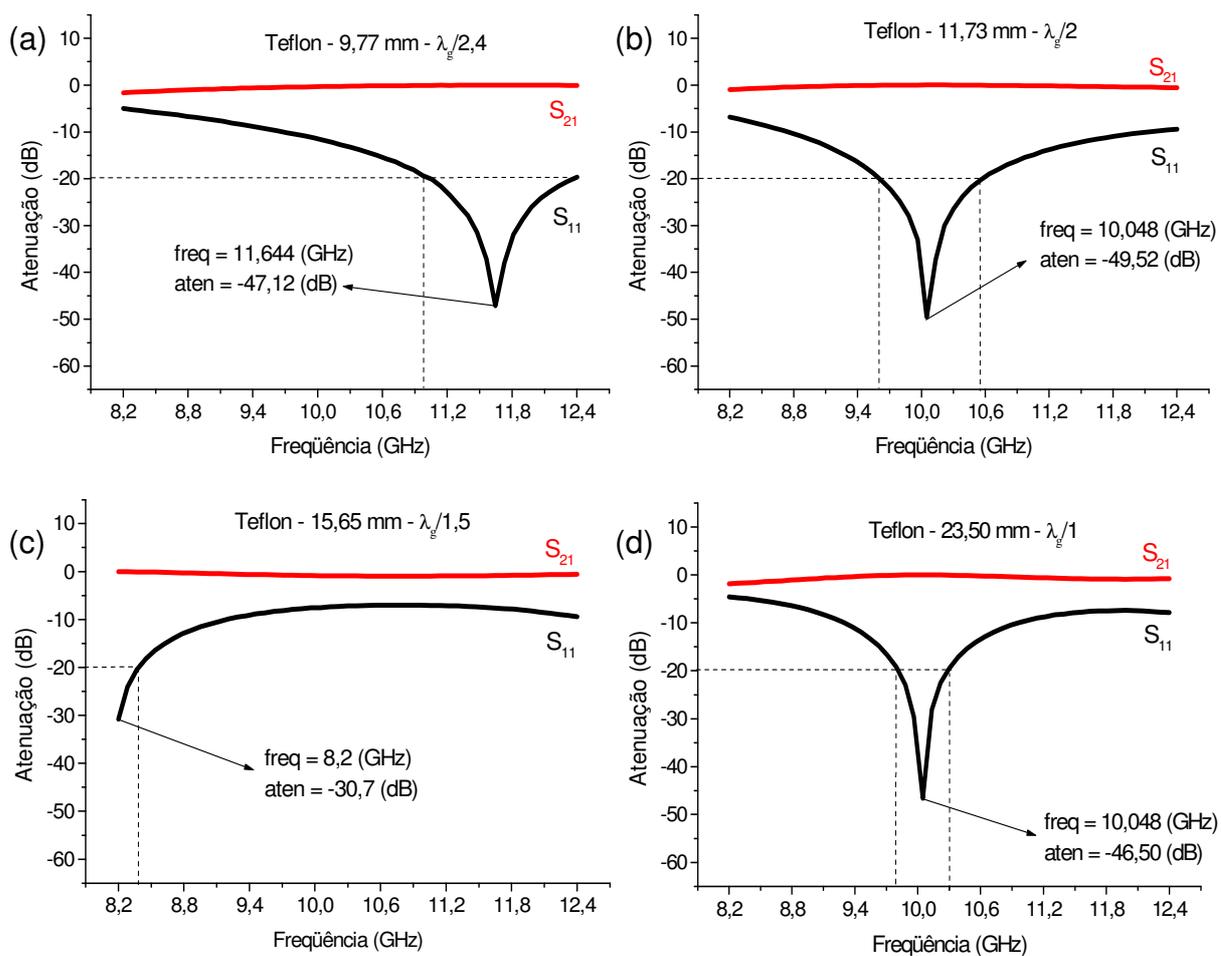


Figura 4.10 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com as espessuras (a) 9,77 mm; (b) 11,73 mm; (c) 15,65 mm e (d) 23,50 mm.

As ressonâncias observadas na Figura 4.10 estão correlacionadas com os comportamentos verificados nas curvas de permeabilidade e permissividade, obtidas pelo uso do algoritmo de Nicolson-Ross (Figura 4.11). Todas as curvas da Figura 4.11 apresentam uma oscilação nos valores de permeabilidade e permissividade em função da frequência, com seu máximo na frequência de ressonância dos gráficos da Figura 4.10. Por exemplo, a curva da Figura 4.11(a) apresenta um pico em 11,664 GHz (9,77 mm) e a curva de S_{11} do gráfico da Figura 4.10(a) apresenta o máximo da ressonância em 11,664 GHz (9,77 mm). O mesmo ocorre para as outras espessuras. Isto demonstra que espessuras do poli(difluoroetileno) próximas de $\lambda_g/2$, tanto maiores quanto menores, não são adequadas para fornecer dados para o algoritmo de Nicolson-Ross, contradizendo a informação da literatura [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a, NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2003], que menciona como uma faixa de espessuras adequadas (d) o intervalo de $\lambda_g/18 < d < \lambda_g/2$.

Observa-se, ainda, que a faixa de frequências com atenuação do sinal maior que -20 dB, destacado na Figura 4.10, causa a descontinuidade dos valores de permissividade e permeabilidade complexas, como mostra a Figura 4.11. E que, os picos com os maiores valores de atenuação de atenuação em relação à frequência, destacados na Figura 4.10, causam os maiores valores de erro na mesma frequência, como mostra a Figura 4.11.

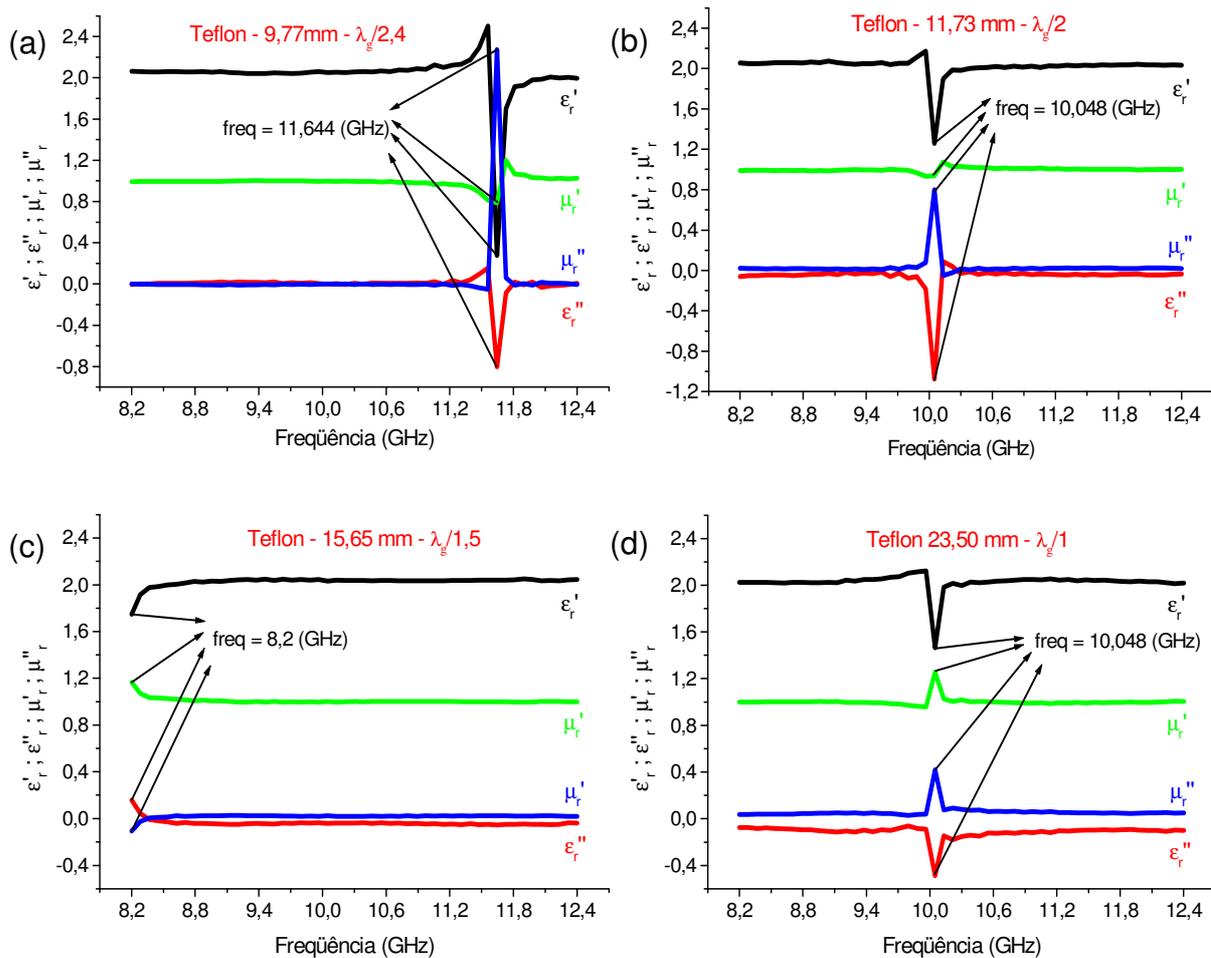


Figura 4.11 – Valores de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessuras de: (a) 9,77 mm; (b) 11,73 mm; (c) 15,65 mm e (d) 23,50 mm.

4.2.2. Permissividade e permeabilidade da Ferrocarbonila

Primeiramente, foram analisados os corpos-de-prova com espessura igual a 2,50 mm e concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila). Para 40% em massa de ferrocarbonila o λ_g é igual a 14,75 mm (Tabela 3.5). Assim, a espessura física de 2,50 mm corresponde a uma espessura de $\lambda_g / 5,9$, obtida da relação: $\lambda_g / (14,75 \text{ mm} / 2,5 \text{ mm})$. A Tabela 4.4 apresenta os valores de λ_g para as outras concentrações. O aumento da concentração de ferrocarbonila diminui a espessura λ_g , devido ao aumento dos valores de ϵ_r' e μ_r' (Tabela 3.3). Porém, em todas as concentrações, a espessura λ_g permanece no intervalo entre $\lambda_g/18$ (0,82 mm) e $\lambda_g/2$ (7,38 mm) (Tabela 3.4), o que atende aos critérios do modelo Nicolson-Ross [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a].

Tabela 4.4 – Relação entre concentração de ferrocarbonila (% em massa) e espessura λ_g para os corpos-de-prova com espessura igual a 2,50 mm.

Concentração (% em massa de ferrocarbonila)	λ_g (mm)*	Espessura λ_g
40	14,75	$\lambda_g / 5,9$
45	14,28	$\lambda_g / 5,7$
50	12,60	$\lambda_g / 5,0$
55	11,56	$\lambda_g / 4,6$
60	10,77	$\lambda_g / 4,3$
65	10,55	$\lambda_g / 4,2$

* Dados da Tabela 3.5.

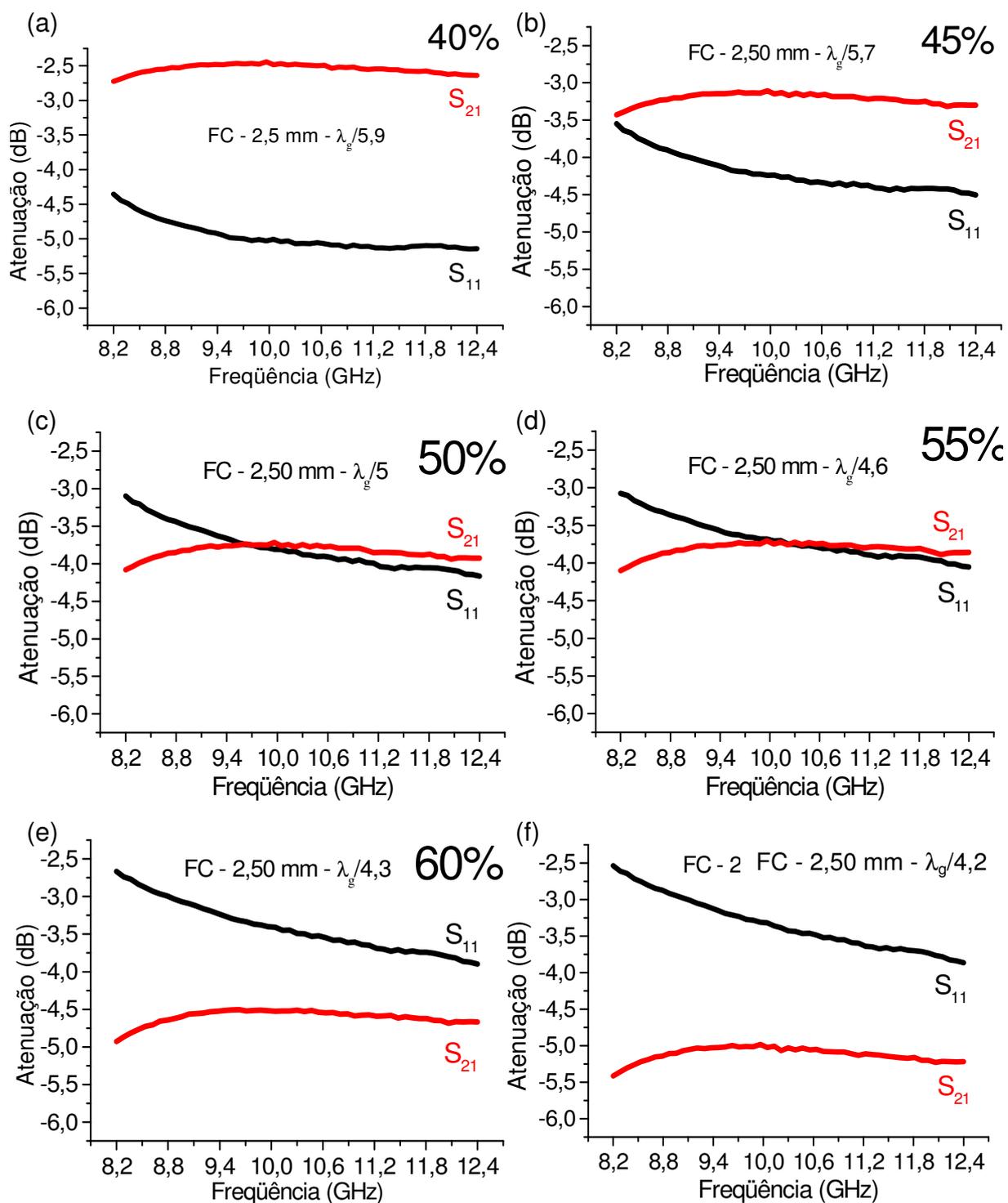


Figura 4.12 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova com espessura igual a 2,50 mm e concentrações: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65% (% em massa de ferrocementa).

Na Figura 4.12 estão apresentados os gráficos dos parâmetros S_{11} e S_{22} dos corpos-de-prova com espessura igual a 2,50 mm, variando a concentração em 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocaraonila). Pode-se observar que o aumento da concentração de ferrocaraonila provoca uma diminuição no parâmetro S_{21} (transmissão) e um aumento no parâmetro S_{11} (reflexão). Este comportamento é típico para materiais onde se aumenta a concentração do aditivo [NOHARA, 2003a].

Na Figura 4.13 estão apresentados as curvas de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova com espessura de 2,50 mm, calculados pelo *software* Agilent 85071E. Pode-se observar pelos gráficos da Figura 4.13 que todas as curvas dos parâmetros ϵ_r' , ϵ_r'' , μ_r' e μ_r'' são praticamente constantes em toda a faixa de freqüências, isto é, com pouca variação. Para uma melhor análise dessa variação, a Tabela 4.5 apresenta alguns cálculos para a faixa de freqüências compreendidas entre 8,2 e 12,4 GHz: valores médios e desvio padrão da permissividade e permeabilidade complexas.

Na discussão dos resultados para o poli(difluoroetileno) foi realizado um cálculo da diferença entre o maior e o menor valor de ϵ_r'' e μ_r'' (Tabelas 4.2 e 4.3), com o objetivo de comparar a variação desses parâmetros para as espessuras distantes do valor recomendado de $\lambda_g/4$ do modelo Nicolson-Ross. Uma vez que, as espessuras dos corpos-de-prova de ferrocaraonila da Tabela 4.4 estão próximas de $\lambda_g/4$, o critério de utilização do desvio padrão é mais conveniente em relação ao critério utilizado nas Tabelas 4.2 e 4.3.

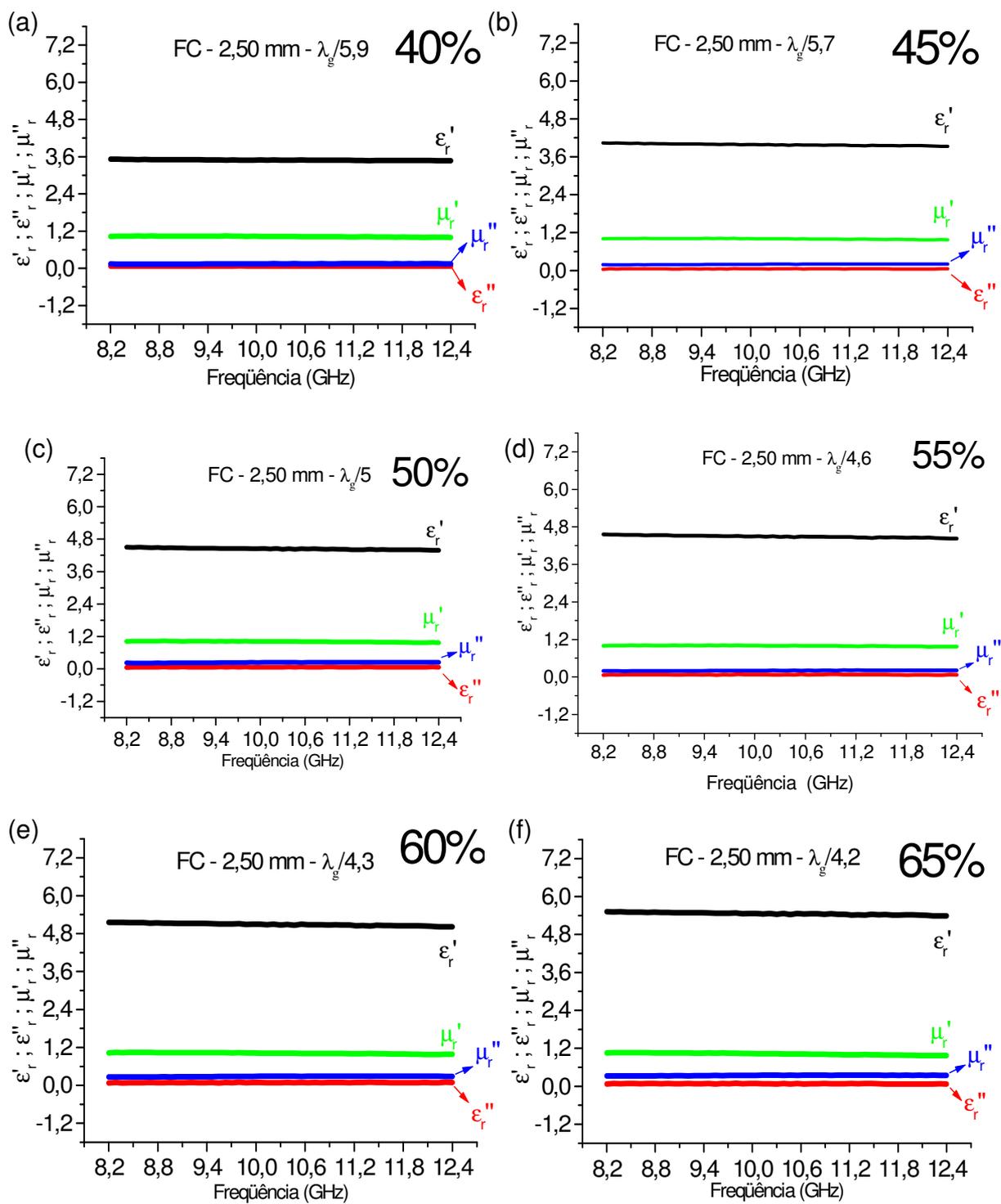


Figura 4.13 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65% (% em massa de ferrocementila), espessura de 2,50 mm.

Tabela 4.5 – Valores médios e desvio padrão da permissividade e permeabilidade complexas, entre 8,2 e 12,4 GHz, para os corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65%.

Concentração (%)	ϵ_r' (média)	$\sigma_{\epsilon_r'}$	ϵ_r'' (média)	$\sigma_{\epsilon_r''}$	μ_r' (média)	$\sigma_{\mu_r'}$	μ_r'' (média)	$\sigma_{\mu_r''}$
40	3,49	0,012	0,07	0,003	1,03	0,001	0,15	0,005
45	3,98	0,028	0,05	0,004	1,00	0,014	0,19	0,007
50	4,44	0,030	0,06	0,004	1,01	0,018	0,24	0,001
55	4,49	0,035	0,07	0,005	1,00	0,001	0,20	0,007
60	5,09	0,038	0,08	0,005	1,02	0,003	0,28	0,001
65	5,46	0,035	0,08	0,006	1,02	0,004	0,34	0,001

Pode-se observar pelos dados da Tabela 4.5 que os desvios padrão calculados para ϵ_r' e μ_r' estão em torno de 0,2 a 0,7% em relação aos seus valores médios. Para o parâmetro μ_r'' o valor do desvio padrão está entre 0,3% a 3,0% em relação ao seu valor médio. A maior diferença é observada somente para o parâmetro ϵ_r'' (4,0 – 8,0%), o que demonstra que é o parâmetro com maior variação em função da frequência. Pode-se observar pelos dados da Tabela 4.5 que há um aumento dos valores de ϵ_r' com o aumento da concentração, enquanto que os valores de ϵ_r'' e μ_r' apresentam pouca variação em função do aumento de concentração de ferrocarbonila. Os valores de μ_r'' apresentaram um ligeiro aumento função da concentração de ferrocarbonila, indicando que o aumento da concentração de ferrocarbonila tem influência maior nos parâmetros de ϵ_r' e μ_r'' para as condições estudadas nesta dissertação, em relação aos parâmetros banda de frequências, matriz polimérica, tipo de ferrocarbonila e formulação dos corpos-de-prova.

Os valores obtidos de ϵ_r' , ϵ_r'' , μ_r' e μ_r'' dos corpos-de-prova de ferrocarbonila com resina epóxi (Tabela 4.5) estão próximos dos valores publicados em literatura

para o mesmo tipo de ferrocarbonila com resina epóxi [CHEN; WU; ZHAO; YANG, XIAO, 2005]. Entretanto, os valores não são idênticos, pois há uma grande dependência dos valores de permissividade e permeabilidade complexas do material absorvedor de radiação eletromagnética com o tipo de matriz utilizada.

Como pode ser observado pelos dados da Figura 2.20 (ferrocarbonila pura), Figura 2.21 (ferrocarbonila pura), Figura 2.22 (ferrocarbonila em epóxi), Figura 2.23 (ferrocarbonila em EPDM), Figura 2.24 (ferrocarbonila em silicone), e Figura 2.25 (ferrocarbonila em silicone), há uma grande dependência dos valores de ϵ_r' , ϵ_r'' , μ_r' e μ_r'' do MARE com a matriz polimérica utilizada. Adicionalmente, um mesmo tipo de matriz polimérica pode exibir valores diferentes de ϵ_r' , ϵ_r'' , dependentes da sua constituição química, bem como das variáveis utilizadas no seu processamento. Por exemplo, no caso de borrachas, os valores finais dos parâmetros ϵ_r' e ϵ_r'' são dependentes das variáveis do processo de sua fabricação, como tempo e temperatura de processamento, entre outros. Assim, para um mesmo tipo de matriz polimérica, pode haver diferentes valores dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexas.

Os valores obtidos dos corpos-de-prova variando a concentração de ferrocarbonila de 40 a 65% e variando a espessura entre 2,50 e 3,50 mm, apresentaram valores semelhantes entre si, uma vez que esta faixa de espessuras atende aos critérios do modelo Nicolson-Ross [AGILENT TECHNOLOGIES, 2006; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a], por este optou-se por apresentar nesta discussão apenas o corpo-de-prova com espessura de 2,50 mm, sendo que as outras espessuras estão apresentadas no Anexo 3.

Após a análise dos corpos-de-prova com a espessura de 2,50 mm foi efetuada a preparação de um novo corpo-de-prova para cada concentração de

ferrocarbonila com espessura igual a $\lambda_g/4$, calculado pela Equação 2.24 com os dados da Tabela 3.3. Desta forma, obtém-se a espessura ótima para as medidas de permeabilidade e permissividade complexas, de acordo com o modelo Nicolson-Ross [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a]. As espessuras calculadas encontram-se apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Espessuras que correspondem a $\lambda_g/4$ dos corpos-de-prova de ferrocarbonila para cada concentração.

Concentração (% em massa de ferrocarbonila)	λ_g calculado (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)
40	14,75	3,50
45	14,28	3,50
50	12,60	3,10
55	11,56	2,90
60	10,77	2,70
65	10,55	2,70

Na Figura 4.14 estão apresentados as curvas dos parâmetros S dos corpos-de-prova com espessuras que correspondem a $\lambda_g/4$ para cada formulação. Na Figura 4.12 estão apresentados os gráficos dos parâmetros S_{11} e S_{22} dos corpos-de-prova com espessura igual a 2,50 mm, variando a concentração em 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila). Como observado no gráfico da Figura 4.12, pode-se observar que o aumento da concentração de ferrocarbonila provoca uma diminuição no parâmetro S_{21} (transmissão) e um aumento no parâmetro S_{11} (reflexão). Na Figura 4.15 estão apresentados os gráficos de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova com espessuras que correspondem a $\lambda_g/4$ de cada formulação.

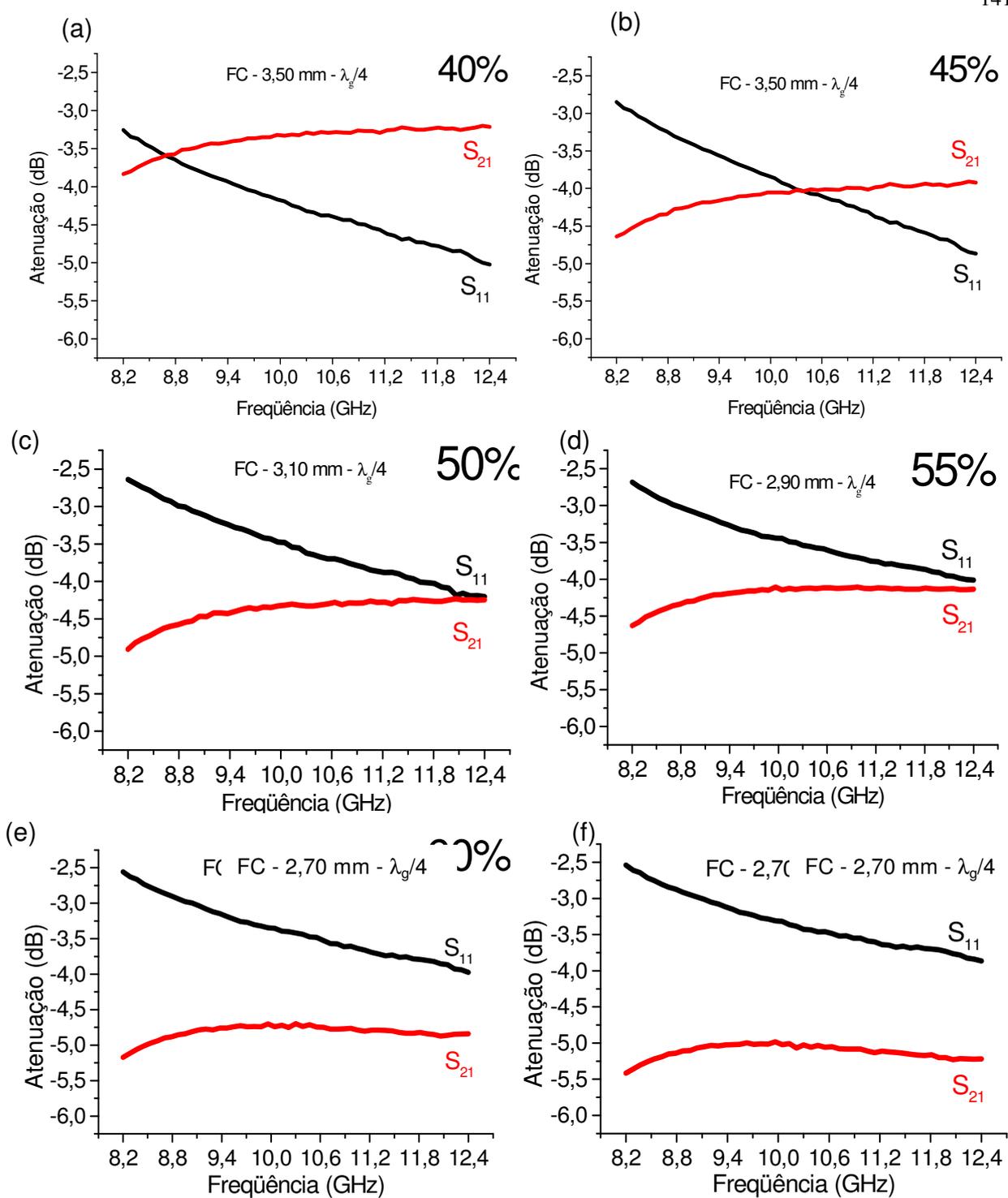


Figura 4.14 – Valores de parâmetros S dos corpos-de-prova com concentrações: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65% (% em massa de ferrocarbonila) com espessuras iguais a $\lambda_g/4$.

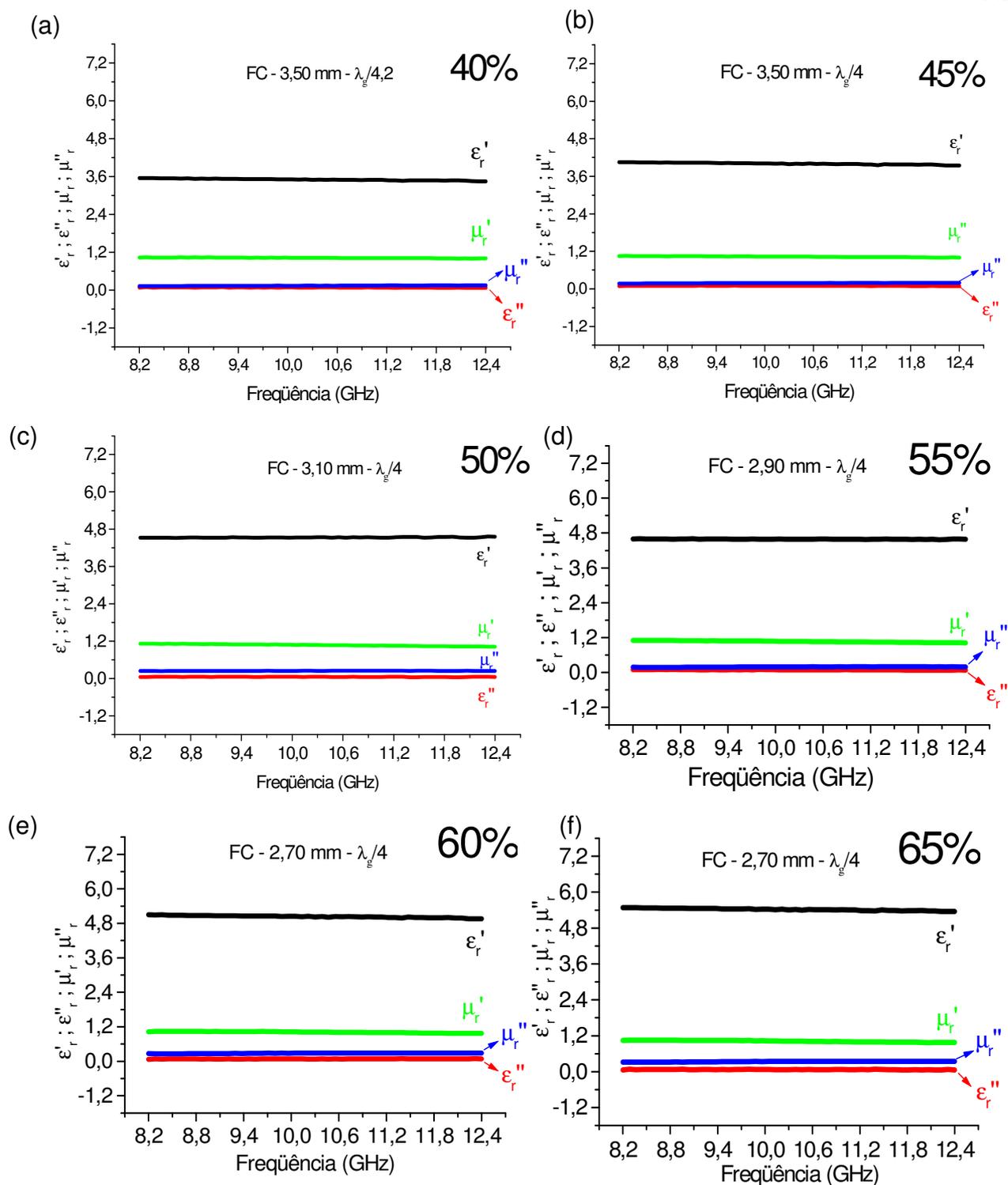


Figura 4.15 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65% (% em massa de ferrocianila), com espessuras iguais a $\lambda_g/4$.

Pode-se observar pelos gráficos da Figura 4.15 que todas as curvas dos parâmetros ε_r' , ε_r'' , μ_r' e μ_r'' são praticamente constantes em toda a faixa de frequências, isto é, com pouca variação. Para uma melhor análise dessa variação, a Tabela 4.7 apresenta alguns cálculos para a faixa de frequências compreendidas entre 8,2 e 12,4 GHz: valores médios e desvio padrão da permissividade e permeabilidade complexas.

Tabela 4.7 – Valores médios e desvio padrão da permissividade e permeabilidade complexas entre 8,2 e 12,4 GHz para os corpos-de-prova com concentrações de 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% e espessura igual a $\lambda_g/4$.

Concentração (%)	ε_r' (média)	$\sigma_{\varepsilon_r'}$	ε_r'' (média)	$\sigma_{\varepsilon_r''}$	μ_r' (média)	$\sigma_{\mu_r'}$	μ_r'' (média)	$\sigma_{\mu_r''}$
40	3,51	0,028	0,08	0,004	1,02	0,009	0,14	0,007
45	4,00	0,028	0,09	0,004	1,03	0,015	0,19	0,001
50	4,54	0,009	0,05	0,004	1,07	0,030	0,24	0,003
55	4,59	0,005	0,09	0,006	1,07	0,025	0,19	0,007
60	5,04	0,036	0,08	0,006	1,01	0,022	0,28	0,008
65	5,42	0,037	0,07	0,006	1,02	0,029	0,33	0,009

Pode-se observar pelos dados da Tabela 4.7 que seus valores não diferem significativamente dos dados da Tabela 4.5, sendo que os desvios padrão de ε_r' e μ_r' estão em torno de 0,2 a 0,8%, em relação aos seus valores médios. Para o parâmetro μ_r'' o valor do desvio padrão está entre 0,3% a 3,6% em relação ao seu valor médio. Novamente, a maior diferença é observada somente para o parâmetro ε_r'' (4,0 – 8,6%), o que demonstra que é o parâmetro com maior variação em função da frequência.

Como observado na Tabela 4.6, pode-se também observar pelos dados da Tabela 4.7 que há um aumento dos valores de ε_r' com o aumento da concentração, enquanto que os valores de ε_r'' e μ_r' apresentam pouca variação em função do aumento na concentração de ferrocarbonila. Os valores de μ_r'' apresentam um ligeiro aumento em função da concentração de ferrocarbonila, indicando que o aumento da concentração de ferrocarbonila tem influência mais significativa nos parâmetros de ε_r' e μ_r'' .

Em seguida, foi realizada a preparação de corpos-de-prova com espessuras acima de $\lambda_g/2$ para cada concentração, calculadas pela Equação 2.24 utilizando os dados da Tabela 3.3, apresentadas na Tabela 4.8. Esta espessura $\lambda_g/2$ é crítica no modelo Nicolson-Ross, uma vez que é o limite superior do intervalo recomendado [AGILENT TECHNOLOGIES, 2005a; AGILENT TECHNOLOGIES, 2007a]. Na Figura 4.16 estão apresentados os gráficos dos parâmetros S dos corpos-de-prova com espessuras superiores a $\lambda_g/2$ para cada concentração de ferrocarbonila.

Tabela 4.8 – Espessuras superiores a $\lambda_g/2$ dos corpos-de-prova de ferrocarbonila para cada concentração.

Concentração (% em massa de ferrocarbonila)	λ_g (mm)	Espessura do corpo-de- prova (mm)	Espessura λ_g
40	14,75	9,77	$\lambda_g/1,5$
45	14,28	9,77	$\lambda_g/1,4$
50	12,60	9,15	$\lambda_g/1,4$
55	11,56	6,05	$\lambda_g/1,9$
60	10,77	6,05	$\lambda_g/1,8$
65	10,55	6,05	$\lambda_g/1,7$

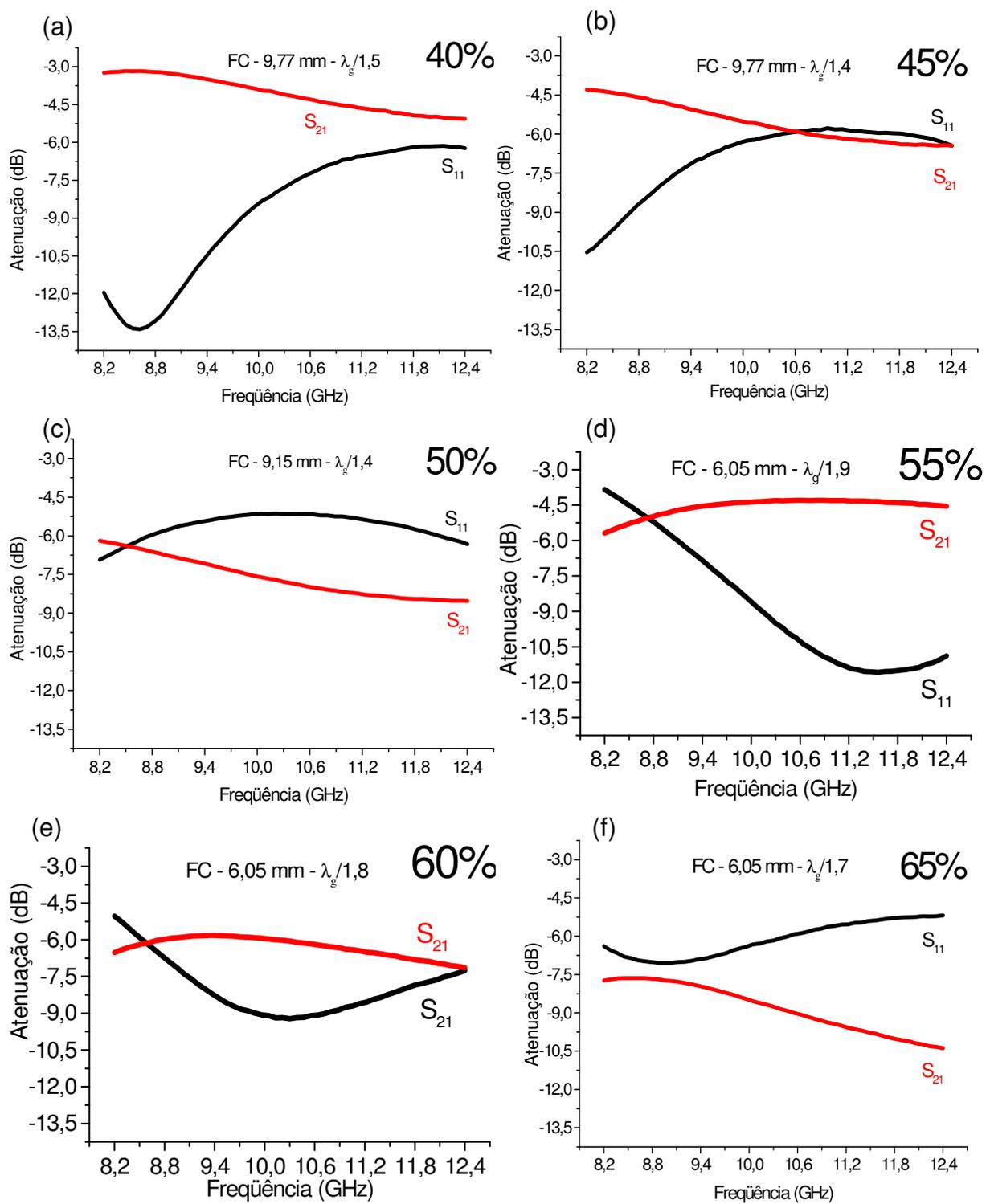


Figura 4.16 – Valores de parâmetros S de corpos-de-prova com concentrações: (a) 40%, (b) 45%, (c) 50%, (d) 55%, (e) 60% e (f) 65% (% em massa de ferrocenona), com espessuras que não atendem à condição máxima de $\lambda_g/2$.

Pode-se observar pelos gráficos da Figura 4.16 que somente as concentrações de 45% e 50% em massa de ferrocarbonila não apresentam um máximo de ressonância do parâmetro S_{11} entre 8,2 GHz a 12,4 GHz, mas observa-se que a curva de S_{11} possui um comportamento ressonante. Todas as outras concentrações apresentam um máximo da ressonância do parâmetro S_{11} . O mesmo fenômeno da presença de ressonâncias para a espessura igual a $\lambda_g/2$ foi observado para o poli(difluoroetileno) (Figura 4.16), ligado ao fenômeno de cancelamento de fase da onda eletromagnética. O comportamento ressonante do parâmetro S_{11} é indesejável para o cálculo dos parâmetros permeabilidade e permissividade complexa do algoritmo Nicolson-Ross, como pode ser observado pelos gráficos da Figura 4.17, que apresentam uma variação maior dos parâmetros ϵ_r' , ϵ_r'' , μ_r' e μ_r'' em função da frequência, quando comparados com os gráficos das Figuras 4.13 e 4.15.

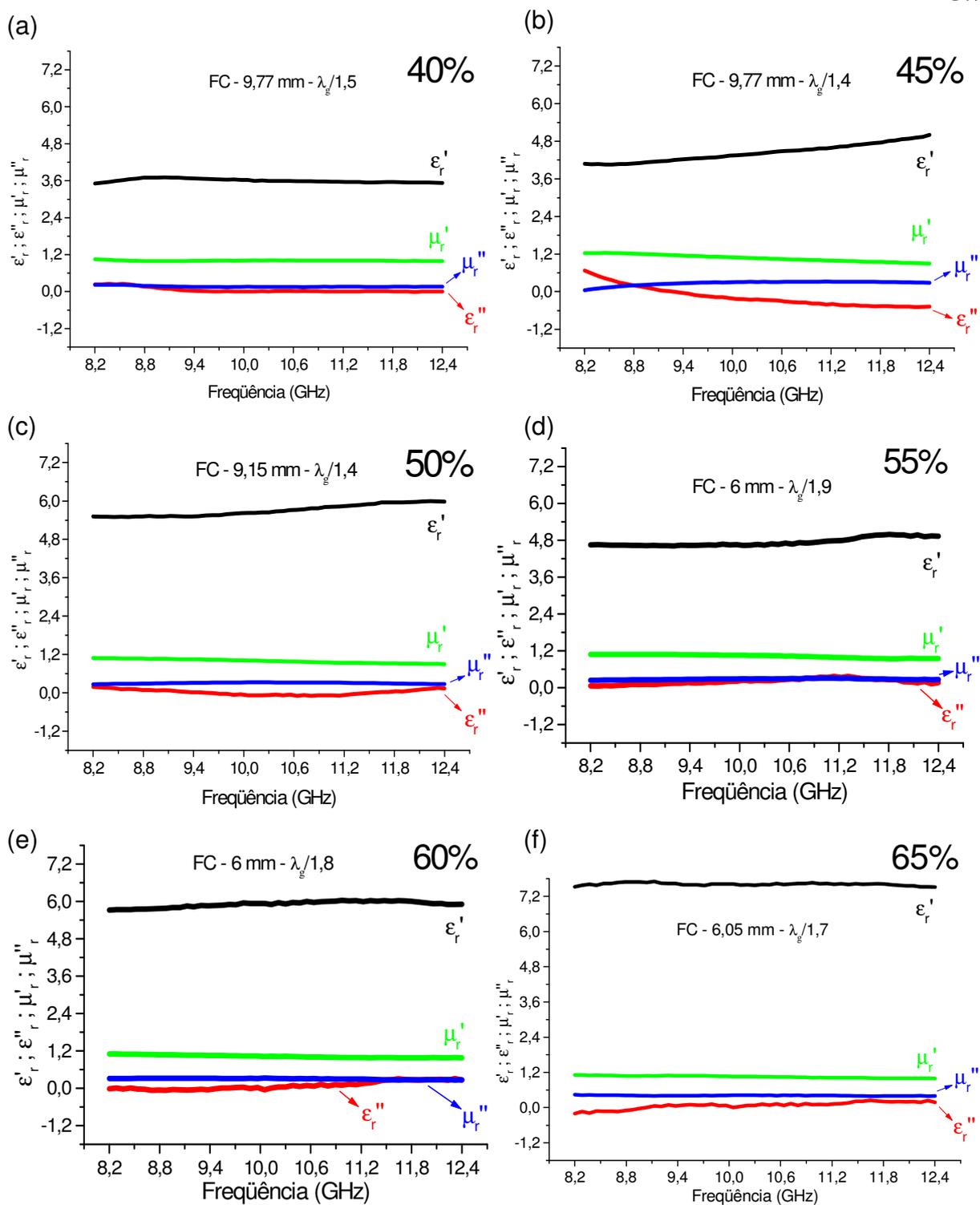


Figura 4.17 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações: (a) 40, (b) 45, (c) 50, (d) 55, (e) 60 e (f) 65 (% em massa de ferrocenona), espessuras que não atendem à condição máxima de $\lambda_g/2$.

Como já apresentado, os valores de permissividade e permeabilidade complexas obtidos a partir dos corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) com espessura de 9,77 mm, causam ressonância em S_{11} (Figura 4.16 (a)). Nota-se que com essa espessura a ressonância alcança valores de -47 dB de atenuação, que corresponde a 99,998% de perda do sinal. Este fenômeno origina a descontinuidade dos valores calculados de permeabilidade e permissividade complexas, como observado nas curvas da Figura 4.17. Para os corpos-de-prova de ferrocarbonila e epóxi, a ressonância do parâmetro S_{11} provoca uma oscilação nos valores de permeabilidade e permissividade em menor escala (Figura 4.17), quando comparada aos valores para o poli(difluoroetileno). Estas diferenças são atribuídas ao fato do poli(difluoroetileno) ser um material dielétrico e ao corpo-de-prova de ferrocarbonila caracterizar-se como material magnético, mostrando que o algoritmo Nicolson-Ross é mais eficiente para materiais magnéticos.

5 CONCLUSÕES

1) Para medidas dos parâmetros S

a. Energia refletida (E_r)

Com a avaliação dos gráficos obtidos dos parâmetros S foi possível observar no parâmetro S_{11} e S_{22} que para concentrações menores de ferrocarbonila (40%) obtém-se maior atenuação em corpos-de-prova com menores espessuras (2,50 mm) e o aumento da concentração para 65% as curvas de atenuação invertem-se obtendo maior atenuação em corpos-de-prova com espessuras maiores (3,50 mm). Esta inversão ocorre nas frequências 11,3 GHz, 10,3 GHz, 10,3 GHz, 9,3 GHz e 8,3 GHz para as concentrações de 45%, 50%, 55%, 60% e 65%, respectivamente. Isto indica que o material em estudo apresenta uma variação de S_{11} e S_{22} de forma não linear.

b. Energia transmitida (E_t)

Os valores obtidos de S_{21} e S_{12} entre as frequências 8,2 e 8,8 GHz são menores em relação aos obtidos em frequências maiores. Os valores de atenuação da energia transmitida são maiores no corpo-de-prova de maior espessura (3,5 mm) e diminui gradativamente à medida que diminui a espessura do corpo-de-prova até 2,5 mm. Esses dois fenômenos são comuns a todas as concentrações estudadas. Os valores médios de atenuação da energia transmitida, obtidos para as formulações em estudo, encontram-se entre: -2,5 e -3,5 dB para 40%, -4,0 e -5,0 dB para 45%, -3,5 e -4,5 dB para 50%, -4,0 e -5,5 dB para 55%, -5,0 e 6,0 dB para 60% e -5,5 e -6,5 dB para 65%.

c. Energia absorvida (E_a)

O aumento da espessura do corpo-de-prova promove um maior aumento da energia absorvida, em uma relação aproximadamente linear com o aumento da frequência. Para a espessura de 2,5 mm, a energia absorvida está em torno de 9% em 8,2 GHz e em torno de 15% em 12,4 GHz. Já para a espessura de 3,5 mm, a energia absorvida está em torno de 12% em 8,2 GHz e de aproximadamente 20% em 12,4 GHz. O comportamento quase linear é devido à homogeneidade da distribuição das partículas nos corpos-de-prova. Estes comportamentos são também observados nas outras concentrações (45%, 50%, 55%, 60% e 65%). O aumento de concentração de ferrocarbonila também propicia o aumento da energia absorvida que chega até 44% de absorção na espessura de 3,5 mm. A interação dos centros absorvedores (ferrocarbonila) com a onda eletromagnética está diretamente relacionada com a concentração destas partículas, ou seja, à medida que se aumenta a concentração de ferrocarbonila observa-se um aumento de energia absorvida pelo material.

d. Refletividade com placa metálica (E_{rp})

O aumento da concentração desloca o máximo da absorção para frequências menores, bem como há um aumento da atenuação da energia da onda eletromagnética com o aumento da concentração, de -5,4 dB para a concentração de 40% em massa (em 11,5 GHz), -7,7 dB em 45% em massa (em 10,6 GHz), -8,7 dB para 50% em massa (em 9,8 GHz), -9,8 dB para 55% em massa (em 9,6 GHz), -13,7 dB para 60% em massa (em 9,1 GHz) e -19,1 dB para 65% em massa (em 8,6 GHz). O mesmo comportamento é observado para todas as espessuras, isto é, o

aumento da concentração de ferrocarbonila para uma espessura fixa desloca o máximo da atenuação para frequências menores. Foi possível observar as curvas de atenuação em forma de V, este comportamento é típico de predominância do cancelamento de fase da onda eletromagnética, no mecanismo de atenuação da energia da onda eletromagnética. Os picos de atenuação em função da frequência foram definidos pela espessura do corpo-de-prova, por exemplo, a melhor atenuação do corpo-de-prova com espessura de 3,0 mm ocorreu na frequência de 10,2 GHz. Portanto, o controle da espessura do MARE final é bastante crítico, pois se houver discrepância entre a espessura desejada e a obtida pode haver deslocamento da melhor atenuação no eixo da frequência.

Os altos valores de atenuação encontrados são resultados da soma dos fenômenos de absorção intrínseca e cancelamento de fase. A caracterização eletromagnética dos corpos-de-prova de ferrocarbonila em resina epóxi mostra o bom potencial deste material como MARE. Desde os corpos-de-prova com menores concentrações de ferrocarbonila (40%) até os corpos-de-prova com maiores concentrações (65%) em massa mostraram bons valores de atenuação, de -6 dB a -19 dB, que correspondem a 75% e 98,7% de atenuação do sinal emitido, respectivamente.

2) Para medidas de permissividade e permeabilidade complexas do Poli(difluoroetileno)

Para as medidas de permissividade e permeabilidade dos materiais pelos modelos matemáticos adotados pelo *software* 85071E é necessário os valores de ϵ_r' e μ_r' para calcular a espessura de medidas baseados no comprimento de onda da onda guiada (λ_g). Isto à primeira vista é uma contradição, uma vez que é exigido o

conhecimento dos valores dos parâmetros que serão medidos. Portanto, para avaliar os critérios do modelo Nicolson-Ross, foram efetuadas medidas de permissividade e permeabilidade complexas em corpos-de-prova de poli(difluoroetileno), pois este material possui o ϵ_r' e μ_r' conhecidos pela literatura, com valores iguais a 2,03 e 1,0, respectivamente. As espessuras foram calculadas de forma a atender os critérios do modelo Nicolson-Ross, que estabelece que a espessura do corpo-de-prova deve estar entre $\lambda_g/18$ e $\lambda_g/2$. Foram confeccionados corpos-de-prova com espessuras entre $\lambda_g/27$ e $\lambda_g/1$, para avaliar também as medidas que extrapolam estes limites estabelecidos de espessura.

Os resultados mostraram que a espessura em torno de $\lambda_g/18$ causa erro devido à esta espessura do corpo-de-prova estar abaixo do limite mínimo e quando a espessura está em torno de $\lambda_g/2$ há erros devido à ressonância em S_{11} . Vale salientar que é preciso observar as medidas do coeficiente de reflexão (S_{11}), pois não deve haver cancelamento de fase em nenhum ponto da curva em relação à frequência, por isso, dependendo do material a espessura máxima pode ser menor que o comprimento $\lambda_g/2$.

As medidas efetuadas com a espessura ótima para o modelo Nicolson-Ross, $\lambda_g/4$, mostraram-se bastante coerentes, com diferença entre o valor médio e o maior e menor valor em torno de 2%, para os valores de ϵ_r' e μ_r' , na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz.

- 3) Para medidas de permissividade e permeabilidade complexas da Ferrocarbonila

Para as medidas de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de resina epóxi aditada com ferrocarbonila, foi possível estimar os valores de ϵ_r' e μ_r' com o auxílio de dados da literatura.

As medidas efetuadas com a espessura ótima para o modelo Nicolson-Ross, $\lambda_g/4$, mostraram-se bastante coerentes, com desvio padrão em torno de 0,03 para os valores ϵ_r' e μ_r' e em torno de 0,08 para ϵ_r'' e μ_r'' em relação aos seus valores médios. Os valores obtidos dos corpos-de-prova de ferrocarbonila apresentaram-se diferentes dos valores da literatura, pois o mesmo tipo de matriz polimérica pode exibir valores diferentes de ϵ_r' , ϵ_r'' , dependentes da sua constituição química, bem como das variáveis utilizadas no seu processamento.

No geral, conclui-se que para efetuar as medidas de permissividade e permeabilidade complexa é preciso conhecer ou estimar os valores de ϵ_r' e μ_r' . Caso não seja possível, pode-se efetuar as medidas de permissividade e permeabilidade em corpos-de-prova com espessuras menores que 9,77 mm ($\lambda_g/4$ do ar em 10,08 GHz), para a banda X, e analisar os valores de S_{11} para não haja ressonância.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Realizar a caracterização eletromagnética de MARE em guia de ondas retangular, na faixa de freqüências compreendida entre 12,4 e 40 GHz, para obtenção dos parâmetros de permissividade e permeabilidade complexa.
- 2- Realizar a caracterização eletromagnética de MARE em cabos coaxiais na faixa de freqüências compreendida entre 2 e 18 GHz para obtenção dos parâmetros de permissividade e permeabilidade complexa.
- 3- Realizar a caracterização eletromagnética de MARE via técnica de Arco NRL (*Naval Research Laboratory*) na faixa de freqüências compreendida entre 2 e 40 GHz;
- 4- Realizar a caracterização eletromagnética de MARE pela técnica de Seção Reta Radar (RCS - *Radar Cross Section*) em câmara anecóica na faixa de freqüências compreendida entre 2 e 40 GHz.
- 5- Realizar a caracterização eletromagnética de MARE pela técnica RCS em campo aberto na faixa de freqüências compreendida entre 2 e 40 GHz.
- 6- Definir método para medidas de permissividade e permeabilidade complexa em filmes finos, na faixa de freqüências compreendidas entre 2 e 40 GHz.
- 7- Definir método para medidas de permissividade e permeabilidade complexa de materiais em alta temperatura (200-1400°C), na faixa de freqüências compreendidas entre 2 e 40 GHz.
- 8- Definir metodologia para medidas de permissividade e permeabilidade complexa, em materiais líquidos, na faixa de freqüências compreendidas entre 2 e 40 GHz.
- 9- Simular a atenuação de MARE por meio de valores de permissividade e permeabilidade complexa.

- 10-Montar um banco de dados de permissividade e permeabilidade complexa de materiais dielétricos e magnéticos.
- 11-Efetuar medidas interlaboratoriais para verificação de materiais magnéticos de referência.

7 PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA GERADA DURANTE O TRABALHO

No desenvolvimento deste trabalho foram gerados até, o momento, os seguintes trabalhos técnico-científicos:

[1] PEREIRA, J. J.; SILVA, V. A.; NOHARA, E. L.; REZENDE, M. C. Medidas do Coeficiente de Reflexão (S_{11}), na Banda X, de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética à Base de Ferrita de MnZn. In: VIII SIMPÓSIO DE GUERRA ELETRÔNICA DO ITA, 2006, São José dos Campos. SIGE 2006. 2006.

[2] SILVA, V. A.; PEREIRA, J. J.; NOHARA, E. L.; LIMA, U. R.; NASAR, R. S.; NASAR, M. C.; REZENDE, M. C. Medidas de Refletividade da Nanoferrita $Ni_{0,2}Cu_{0,3}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ para uso como Centro Absorvedor de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética In: VIII SIMPÓSIO DE GUERRA ELETRÔNICA DO ITA, 2006, São José dos Campos. SIGE 2006. 2006.

[3] PEREIRA, J. J.; REZENDE, M. C.; NOHARA, E. L. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) com Aditivos em Ferrita de Manganês-Zinco (MnZn). In: VII MOSTRA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, 2006, Taubaté. MPG UNITAU 2006. 2006.

[4] PEREIRA, J. J.; REZENDE, M. C.; NOHARA, E. L. Tecnologia Stealth – Aplicações Cíveis e Militares. In: VII MOSTRA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, 2006, Taubaté. MPG UNITAU 2006. 2006.

[5] PEREIRA, J. J.; REZENDE, M. C.; NOHARA, E. L. Estudo da Influência da Concentração de Ferrita tipo MnZn no Comportamento Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética de 8 a 12 GHz. In: II WORKSHOP DE COOPERAÇÃO UNIVERSIDADE EMPRESA, 2006, Taubaté. UNEM 2006. 2006.

[6] PEIXOTO, G. G.; PEREIRA, J. J.; REZENDE, M. C. Validação de uma Esfera Metálica como Alvo de Calibração para Medida de Seção Reta Radar na Banda X. In: 12º SBMO – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS E OPTOELETRÔNICA E 7º CBMAG – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 2006, Belo Horizonte. MOMAG 2006. 2006.

[7] PAULA, A. L.; PEREIRA, J. J.; MONIZ, C. L.; NOHARA, E. L.; REZENDE, M. C. Estudo das Propriedade Eletromagnéticas de Estruturas do Tipo Colméias na Faixa de Freqüências entre 8 e 12 GHz. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA, 2005, São José dos Campos. IX ENIC UNIVAP 2005. 2005.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFSAR, M.; BIRCH, J.B.; CLARKE, R.N.; CHANTRY, E. G.W. Measurement of the Properties of Materials. **Proc. IEEE**, v. 74, n. 1, p. 183-199, 01 jan. 1986.

AGILENT TECHNOLOGIES. **In-Fixture Measurements Using Vector Network Analyzers**. Application Note AN 1287-9, 32 p., 2000.

AGILENT TECHNOLOGIES. **11644A X, P and K Waveguide Calibration Kits**. User's and service guide, 83 p., 2002.

AGILENT TECHNOLOGIES. **Solutions for measuring permittivity and permeability with LCR meters and impedance analyzers**. Application note 1369-1. 28 p. 2003.

AGILENT TECHNOLOGIES. **Basics of measuring the dielectric properties of material**. Application note 1217-1. 5989-2589EN. USA, 32 p., 2005a.

AGILENT TECHNOLOGIES. **Materials measurement software Agilent 85071E**. Technical Overview. 5988-9472EN. USA, 8 p., 2005b.

AGILENT TECHNOLOGIES. **Specifying calibration standards for the Agilent 8510 Network Analyzer**. Application note 8510-5B. 2003 Disponível em: <<http://www.agilent.com>>. Acesso em: 15 dez 2005, 32p, 2005c.

AGILENT TECHNOLOGIES. **Materials Measurement**. 2006. Disponível em: <<http://www.die.uniroma1.it/personale/frezza/biblioteca/dispense/MisureMateriali.pdf>>. Acesso em: 14 fev 2007, 78p, 2007a.

AGILENT TECHNOLOGIES. **Waveguide Calibration in Network Analysis: accuracy enhancement**. Apresentação de Power Point. Documento fornecido pelo representante da Agilent Technologies. Em: fev 2007, 20p, 2007b.

BAHADOOR, A.; WANG, Y.; AFSAR, M. Complex permittivity and permeability of hexaferrite and carbonyl iron powder using rectangular waveguide technique from 8,0-40 GHz. **Proc. IEEE**, p. 446, 2005.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: analysis and design**. New York: John Wiley Sons, 1989a.

BALANIS, C. A. **Advanced Engineering Electromagnetics**. New York: John Willey Sons, p. 386-87, 1989b.

BASF CORPORATION. **Carbonyl iron powder**. Disponível em: <http://www.inorganics.basf.com/p02/CAPortal/en_GB/portal/Carbonyleisenpulver/content/Produktgruppen/Carbonyleisenpulver/Carbonyleisenpulver>. Acesso em: 15 jan 2007.

BHATTACHARYYA, A. K.; SENGUPTA, D. L. **Radar Cross Section Analysis and Control**. Norwood: Inc Artech House, 1991.

BISCARO, R. S.; BOTELHO, E. C; TAKAHASHI, M. F. K; FAEZ, R; REZENDE, M. C. Estudo reológico de tintas de poliuretano contendo PAni-DBSA aplicadas como materiais absorvedores de microondas (8-12 GHz). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São José dos Campos, v. 12, n. 4, p. 318-327, 2002.

BISCARO, R. S. **Estudo dos Mecanismos de Absorção de Microondas (100 MHz – 20 GHz) de Revestimentos à Base de Polímeros Condutores**. 2006. 180f. Tese (Doutorado em Ciência) – Curso Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

BOMBARD, A. J. F. **Suspensões magneto-reológicas de pós de ferro carbonilo: um estudo da influência das propriedades magnéticas e do tamanho das partículas**. 2005. 169f. Tese (Doutorado em Ciência) – Instituto de Química – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BRASCOLA. **Araldite Professional**. Folhas de Dados Técnicos. Jan 2001. Disponível em: <http://www.brascola.com.br/pdf/araldite_professional.pdf>. Acesso em: 07 out 2006.

BUSSEY, H. E. Measurement of RF properties of materials-A survey. **Proc. IEEE**, vol. 55, n. 6, p. 1046-1053, Jun 1967.

CHEN, P.; WU, R. X.; ZHAO, T.; YANG, F.; XIAO, J. Q. Complex permittivity and permeability of metallic magnetic granular composites at microwave frequencies. **Journal of Physics D: applied physics**, 38 (2005), p. 2302-2305. Jul 2005.

CHIAMENTI, I. **Implementação de bipolos discretos no método de análise eletromagnética por elementos finitos no domínio do tempo usando a técnica de Newmark**. 2005. 92f. Projeto Final de Curso (Bacharel) – Curso de Engenharia Elétrica, setor de Tecnologia, - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CHOMERICS CORPORATION (Massachusetts). John F. Broderick; Noel J. Tessier; Michael S. Heafey; Michael T. Kocsik. **Eletromagnetic Energy Absorber**. US 5576710. 16 jun. 1994. 19 nov. 1996. Electromagnetc Energy Absorber. 17 f, 1996.

CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. California: Addison-Wesley Publishing Company, p. 181-203. 1972.

DICK, A.; SMITH, L.; GRUSZYNSKI, J. S-Parameter Theory and Applications. **Hewlett-Packard Journal**, 1966.

DINIZ, A. B.; FREIRE, G. F. O. **Ondas Eletromagnéticas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p. 9-12. 1973.

DORADO INTERNATIONAL CORPORATION. **Waveguide Components**. Waveguide Products/Price. 2001. <<http://www.dorado-intl.com/>>. Acesso em: 10 fev 2007.

EDMINISTER, J. A. **Eletromagnetismo**. São Paulo: Mc-Graw-Hill do Brasil, p. 15-134. 1980.

EMERSON, W. H. Eletromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. Massachusetts, v. AP-21, n. 4, p. 484-490, 04 jul. 1973.

ETS-LINDGREN. **Anechoic Chambers**, Past and Present. 2005. Disponível em: <http://www.ets-lindgren.com/pdf/anechoic_chambers_lawrence.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2006.

FAEZ, R.; REZENDE, M. C.; MARTIN, I. M.; DE PAOLI, M. A. Polímeros Condutores Intrínsecos e Seu Potencial em Blindagem de Radiações Eletromagnéticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São José dos Campos, v. 10, n. 3, p.130-137, 2000.

FENG, Y. B.; QIU, T.; SHEN, C. Y.; LI, X. Y. Electromagnetic and absorption properties of carbonyl iron/rubber radar absorbing materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 42, n. 3, p. 363-368. Mar 2006.

FOLGUERAS, L. C. **Obtenção e caracterização de materiais absorvedores de microondas flexíveis impregnados com polianilina**. 2005. 230f. Tese (Doutorado em Ciência) – Curso Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

FRANCHITTO, M. **Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Microondas**. 2001. 169f. Dissertação (Mestre em Ciência) – Curso Engenharia Eletrônica e Computação, área Microondas e Optoeletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

FREE PATENTS ON LINE. Quick Search. **Search Patent**. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com>>. Acesso em: 04 out. 2006.

FRESH PATENTS. Quick Search. **Search Patent**. Disponível em: <<http://www.freshpatents.com>>. Acesso em: 04 out. 2006.

GEAR, J. T. Microwave Absorbers Manage Military Electronics RF Interference. **Defense Electronics**. RF Design. p. 6-9, 2004.

HIPPEL, A. R. V. **Dielectric Materials and Applications**. USA: Massachusetts Institute of Technology, John Wiley, New York, 1954.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. 4. ed. Rio de Janeiro, 75 p. 2005.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Pesquisa Rápida. **Pesquisa de Patentes**. Disponível em: <<http://www.inpi.gov.br>>. Acesso em: 04 out. 2006.

KIM, Y. J.; KIM, S. S. Microwave absorbing properties of Co-substituted Ni₂W hexaferrites in Ka-band frequencies (26,5-40 GHz). **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 38, n. 5, p. 3108-3110, 2002.

KIM, S. S.; JO, S. B.; GUEON, K. I.; CHOI, K. K.; KIM, J. M.; CHURN, K. S. Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composite in X-band frequencies. **IEEE Transaction on Magnetism**, Taejon, v. 27, n. 6, p.5462-5464, 1991.

KNOTT, E. F.; SHAEFFER, J. F.; TULEY, M. T. **Radar Cross Section**. 2. ed. Norwood, MA: Artech House, 1993.

KOMORI, H.; FELOW, Y. K. Wide band electromagnetic wave absorber with thin magnetic layers. **IEEE transactions on Broadcasting**, vol. 40, n. 4, p. 219-222. Dez 1994.

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara S.A., p. 187-245. 1978.

LANDAU, L. D. **Electrodynamics of Continuous Media**. Oxford: Pergamon Press, 1960.

LAVERGHETA, T. S. **Modern microwave measurements and techniques**. Norwood: Artech House, 1988.

LEE, S. M. **International Encyclopedia of Composites**. VCH Publishers, v. 6. p. 404-430. 1991.

LIMA, A. C. C. **Fundamentos de Telecomunicações: teoria eletromagnética e aplicações**. Salvador-BA: P&A Editora, 2005. p. 61-90

LIN, M.; WANG, Y.; AFSAR, M. N. Precision measurement of complex permittivity and permeability by microwave cavity perturbation technique. **Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics**, Medford, p. 63-64, 2005.

MIACCI, M.A.S.; NOHARA, E.L.; MARTIN, I. M.; FERRAZ, M.; REZENDE, M.C. – Centro Técnico Aeroespacial (São José dos Campos). Método de Medida de Seção Reta Radar de Objetos Refletores de Ondas Eletromagnéticas na Faixa de 1 GHz a 100 GHz para Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Radiação. **Patente INPI - MU8102042-2**. Data de depósito: 02 jun 2001.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD AND TECHNOLOGY. **Transmission Reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability**. NIST Technical note 1355-R. Colorado, 1993.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. **A Guide to the Characterization of Dielectric Materials at RF and Microwave Frequencies**. London, 2003.

NASCIMENTO, D. C.; MORAES, J. A. Jr.; SCHILDBERG, R.; LACAVA, J. C. Análise e projeto de antenas de microfita de baixo custo. **12^o. SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 7^o. CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. Belo Horizonte, ago 2006.

NEC CORPORATION (Tokyo, Japan). Tetsuji Inui; Kenichi Hatakeyama; Satoshi Yoshiuchi; Takashi Harada; Takashi Kizaki. **Electromagnetic Wave Absorber**. US 5081455. 04 jan. 1989. 14 jan. 1992. Electromagnetic Wave Absorber. 41 f, 1992

NICOLSON, A. M.; ROSS, G. F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Ohio, v. 19, n. 4, p.377-382, 04 nov. 1970.

NOHARA, E.L.; MIACCI, M.A.S.; MARTIN, I.M.; REZENDE, M.C. Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Flat Plates Painted with Microwave Absorbing Materials. **Proceedings SBMO/IEEE MIT-S IMOC 2001**, p. 263-267, 2001.

NOHARA, E.L.; MARTIN, I.M.; REZENDE, M.C. Processamento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética constituídos de mantas flexíveis ou artefatos rígidos, maciços ou porosos, com acabamentos superficiais liso ou irregular, tipos: estriado, cônico ou piramidal, utilizando matrizes poliméricas aditadas com ferritas e/ou negro de fumo e/ou grafite e/ou polímeros condutores, na faixa de 1 a 20 GHz. CTA/IAE/AMR – Centro Técnico Aeroespacial / Instituto de Aeronáutica e Espaço / Divisão de Materiais (São José dos Campos). **Patente INPI - PI0100772-6**, 2001.

NOHARA, E. L.; REZENDE, M. C. **Materiais Absorvedores de Radiação (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos**. 3^o relatório anual de atividades de doutorado – descrição das atividades desenvolvidas na Rússia, FAPESP, 10 ago. 2002.

NOHARA, E. L. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos**. 2003. 198f. Tese (Doutorado em Ciência) – Curso Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003a.

NOHARA, E. L.; MIACCI, M. A. S.; PEIXOTO, G. G; MARTIN, I. M; REZENDE, M. C. Radar cross section reduction of dihedral and trihedral corner reflectors coated with radar absorbing materials (8-12 GHz). **Microwave and Optoelectronics Conference**, v. 1, p. 479-484, 2003b.

OLMEDO, L.; HOURQUEBE, P.; JOUSSE, F. Microwave properties of conductive polymers. **Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers**, vol. 3. Conductive polymers: spectroscopy and physical properties. Ed. John Wiley & Sons Ltd., 1977.

PARK, M. J.; CHOI, J.; KIM, S. S.; **Wide bandwidth pyramidal absorbers of granular ferrite and carbonyl iron powders**. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, n. 5, p. 3272-3274. Set 2000.

PENN ENGINEERING COMPONENTS. **Waveguide**. 2005. Disponível em: <<http://www.pennengineering.com/waveguide.htm>>. Acesso em: 10 fev 2007.

PEREIRA, J. J.; REZENDE, M. C.; NOHARA, E. L. Estudo da influência da concentração de ferrita tipo MnZn no comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz). **Anais do II Workshop Cooperação Universidade-Empresa em Automação, Energia, Materiais e Produção UNEM 2006**. Taubaté, v. 1, n.1, p. 241-246, 2006a.

PEREIRA, J. J.; REZENDE, M. C.; NOHARA, E. L. Tecnologia Stealth: aplicações civis e militares. **XI Encontro de Iniciação Científica e VII Mostra de Pós-graduação da Universidade de Taubaté**. Taubaté, 2006b.

PEREIRA, J. J.; REZENDE, M. C.; NOHARA, E. L. Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) com aditivos em ferrita de manganês-zinco (MnZn). **XI Encontro de Iniciação Científica e VII Mostra de Pós-graduação da Universidade de Taubaté**. Taubaté, 2006c.

PINHO, M. S.; SEBRÃO, M. Z.; NUNES, R. C. R.; SOARES, B. G. Avaliação da resistência à corrosão de compósitos ferromagnéticos com policloropreno ao ensaio de névoa salina. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 22-27, 2003.

READE ADVANCED MATERIALS. **Carbonyl iron powder**. 2006. Disponível em: <<http://www.reade.com>>. Acesso em: 20 out. 2006.

REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda, p. 82-359. 1982.

RESOURCES PACEMAKER. **Global Leadership in Medical Technology**. Saint Jude Medical. 2006. Disponível em: <www.sjm.com/globals/popups/pacemaker.htm>. Acesso em: 15 set. 2006.

REZENDE, M. C.; MARTIN, I. M.; MIACCI, M. A. S.; NOHARA, E. L. Radar cross section measurements (8-12 GHz) of flat plates painted with microwave absorbing materials. **Microwave and Optoelectronics Conference**, v. 1, p. 263-267, 2001.

REZENDE, M. C.; MARTIN, I. M.; MIACCI, M. A. S.; NOHARA, E. L. Radar cross section measurements (8-12 GHz) of magnetic and dielectric microwave absorbing thin sheets. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 15, p. 24-29, 2002.

REZENDE, M. C.; NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; MIACCI, M. A. S. Medidas de refletividade de materiais absorvedores de radiação eletromagnética usando as técnicas RCS e NRL. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 16, p. 30-36, 2003.

ROHDE & SCHWARZ. **Radiofreqüência**. Seminário na Divisão de Materiais/IAE/CTA. Outubro, 2004a.

ROHDE & SCHWARZ. **Fundamentos de Radiofreqüência**. Seminário na Divisão de Materiais/IAE/CTA. Outubro, 2004b.

ROBERTS, J. **High Frequency Applications of Ferrites**. London: The English Universities Press Ltd, p. 26-55. 1960.

ROUSSY, G.; PEARCE, J. A. **Foundations and industrial applications of microwave and radio frequency fields: physical and chemical processes**. Chichester: John Wiley & Sons, 1995.

SILVA, F. S. **Obtenção de estruturas híbridas absorvedoras de radiação eletromagnética na faixa de microondas aplicadas no setor aeronáutico**. 2000. 111 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

SILVA, S. M. L.; ORLANDO, A. J. F.; NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; REZENDE, M. C. Medidas biestáticas em campo aberto da seção reta radar na banda X de veículos em solo. **XI Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica**. São Paulo, v. 1, nº 1, p.5-11, 2004a.

SILVA, S. M. L. **Metodologia de redução de seção reta radar de plataformas de combate**. 2004. 248 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Curso de Engenharia Eletrônica e Computação, área de Microondas e Optoeletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004b.

SIMÕES, R. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz**. 2005. 88f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Curso Engenharia Mecânica, área Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.

SINGH, P.; BABBAR, V. K.; RAZDAN, A.; SRIVASTAVA, S. L.; PURI, R. K. Complex permeability and permittivity, and microwave absorption studies of $\text{Ca}(\text{CoTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ hexaferrite composites in X-band microwave frequencies. **Materials Science and Engineering**, New Delhi, n. B67, p.132-138. 1999.

SURPLUS SALES OF NEBRASKA. Product Index. **Waveguide**. Disponível em: <<http://www.surplussales.com/RF/RFWaveG-4.html>>. Acesso em: 10 fev 2007.

TAN, K. S.; HINBERG, I.; WADHWANI, J. **Electromagnetic interference in medical devices**. Medical Electronics Manufacturing. Disponível em: <<http://www.medicaldevicelink.com>>. Acesso em: 15 set. 2006.

UNITED STATES OF AMERICA (Massachusetts). Winfield W.Salisbury. **Absorber Body for Electromagnetic Waves**. US 2599944. 11 mai. 1943. 10 jun. 1952 Reduce Reflection of Eletromagnetic Radiation. 7 f, 1952.

UNITED STATES OF AMERICA (Massachusetts). Otto Halpern. **Method and Means for Minimizing Reflection of High-Frequency Radio Waves**. US 2923934. 05 marc. 1945. 02 fev. 1960. Method and Means for Minimizing the Reflection of Radio Waves. 5 f, 1960.

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE. Quick Search. **Search Patent**. Disponível em: <<http://www.uspto.gov>>. Acesso em: 04 out. 2006.

WALLACE, J. L. Broadband magnetic microwave absorbers: fundamental limitations. **IEEE Transactions on Magnetics**, Yucatán, v. 29, n. 6, p.4209-4214, 1993.

WANG, Y.; AFSAR, M. N.; GRIGNON, R. Complex permittivity and permeability of carbonyl iron powders at microwave frequencies. **Proc. IEEE**, p. 619-622. 2003.

WEIR, W. B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. **Proceeding of the IEEE**, California, v. 62, n. 1, p.33-36, 1974.

WIKIPEDIA. **Iron carbonyl**. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Iron_carbonyl>. Acesso em: 10 jan 2007a.

WIKIPEDIA. **Carbonyl iron**. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbonyl_iron>. Acesso em: 10 jan 2007b.

ZHU, S. C.; CHEN, H. Y.; WEN, F. P. Measurement theory and experimental research on microwave permeability and permittivity by using the cavity characteristic equation method. **IEEE Transactions on Magnetics**, Peking, v. 28, n. 5, p. 3213-3215, 1992.

ANEXO 1 – ESTRUTURAS ABSORVEDORAS

Os primeiros MARE foram desenvolvidos a partir de década de 1930 [EMERSON, 1973], desde então, diversos materiais são estudados a fim de obter materiais para diversas aplicações. Os princípios definidos com as primeiras estruturas absorvedoras são ainda utilizados como fundamentação para desenvolvimento de novos materiais. A aplicação de material absorvedor de radiação, para melhorar a relação frente-costa da radiação de antena foi a primeira patente de aplicação deste material, datado em 1936, foi desenvolvido à base de negro de fumo [EMERSON, 1973].

Na Segunda Guerra Mundial os Estados Unidos da América e Alemanha desenvolveram as primeiras aplicações e testes do MARE para radar. A Alemanha visava o uso deste material para camuflagem; e os Estados Unidos fazia testes visando melhorar o desempenho de radar, reduzindo reflexões de objetos próximos [EMERSON, 1973]. O projeto Alemão chamado “Schormteinfeger” (tradução = absorvedor de varredura) foi aplicado em periscópio submarino.

Absorvedor de Wesch

Na Segunda Guerra Mundial, Wesch desenvolveu um material, (posteriormente chamado de Absorvedor de Wesch), ressonante em 3 GHz. Formado por folhas de borracha semi-flexível aditivada com pó de ferrocenona e espessura de cerca de 0,3 polegada (7,62 mm) [EMERSON, 1973].

Absorvedor de Jauman

Jauman desenvolveu o primeiro material absorvedor, tipo multicamadas com diferentes espessuras, aproximadamente 3 polegadas (76,2 mm). O material era formado por camadas, aumentando gradativamente a condutividade elétrica destas (diminuindo a resistividade), e apresentou atenuação em torno de 20 dB, em banda larga, na faixa de frequência entre 2 e 15 GHz. Este tipo de absorvedor, denominado absorvedor de Jauman, ainda hoje é comercializado [BHATTACHARYYA; SENGUPTA, 1991; EMERSON, 1973; LEE, 1991; SILVA, 2000; SILVA, 2004b].

Absorvedor HARPA

Entre 1941 e 1945, foi desenvolvido nos Estados Unidos da América dois tipos de absorvedores. Foram obtidos no laboratório de radiação do Instituto de Tecnologia de Massachussetts (MIT *Massachussetts Institute of Technology*) [SILVA, 2000] e patenteados por Otto Halpern [UNITED STATES OF AMERICA, 1960a; UNITED STATES OF AMERICA, 1960], recebendo o nome de Pintura Anti-Radar Halpern – HARPA (*Halpern Anti Radiation Paint*) [EMERSON, 1973]. Um tipo de absorvedor, para aplicação em aeronaves, com espessura de aproximadamente 0,025 da polegada (0,635 mm); e um segundo tipo, para aplicação em navios, com espessura próximo de 0,07 da polegada (17,78 mm), ambos, com atenuação em torno de 15 e 20 dB (em ressonância) na Banda X [EMERSON, 1973]. Foram desenvolvidos com materiais condutores de eletricidade, como alumínio, cobre e/ou materiais ferromagnéticos aditados em matrizes não condutivas, como plásticos e borrachas. A formulação resultante era obtida em camadas finas posicionadas em

estruturas híbridas, com orientações contrárias, em zero e noventa graus, para minimizar a anisotropia [SILVA, 2000].

Absorvedor de Salisbury

Foi desenvolvido outro tipo de absorvedor no MIT, conhecido como Absorvedor de Salisbury, teve como princípio de funcionamento baseado no fenômeno chamado “um quarto do comprimento de onda” ($\lambda/4$). Composto por um material laminado com impedância próxima de 377 ohms por polegada quadrada, colocado a uma distância de um quarto do comprimento de onda da radiação incidente sobre o material a ser revestido [EMERSON, 1973; BHATTACHARYYA; SENGUPTA, 1991; SILVA, 2000; SILVA, 2004b; UNITED STATES OF AMERICA, 1952]. Nesse determinado comprimento de onda, a radiação incidente e aquela refletida no material se cancelam, promovendo interferência destrutiva, e atenuação da onda incidente de 25 a 30 dB [LEE, 1991].

Absorvedor de Dällenbach

Essa estrutura beneficia-se dos mesmos mecanismos de perda apresentado para o Absorvedor de Salisbury, isto é, cancelamento de um quarto do comprimento de onda, acrescido de absorção ocorrida tendo em vista a constante de perdas do material [LEE, 1991]. No caso da estrutura de Dällenbach o material pode ser um dielétrico e ou um híbrido (dielétrico e magnético). Em ambos os casos, analisando-se o sistema por um modelo de linha de transmissão, tanto o cancelamento quanto a absorção estão relacionados a uma impedância de entrada do meio absorvedor, que deverá estar casada como meio externo ou parcialmente casada, tolerando-se um coeficiente de reflexão [SILVA, 2004b].

ANEXO 2 – FENÔMENOS DE ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

A-2.1 CANCELAMENTO DE FASE

Um dos mecanismos de atenuação ainda usado como princípio no desenvolvimento de MARE é estrutura de Salisbury (Anexo 1), que consiste em um material com impedância próximo a do ar (377 ohms), de modo que a onda incidente não encontra dificuldade de penetração na superfície frontal posicionada a um quarto de comprimento de onda elétrico sobre um material condutor. O mecanismo de atenuação da energia da onda eletromagnética é baseado na obtenção de uma espessura elétrica do MARE de $\lambda/4$, isto é, o cancelamento da onda eletromagnética refletida na parte frontal com a onda eletromagnética emergente do MARE, o cancelamento ocorre por estas ondas estarem com fases invertidas de 0° a 180° [LEE,1991], conforme esquema da Figura A-2.1 [SIMÕES, 2005]. Se a inversão de fase for de 180° o cancelamento é total, se for menor que 180° o cancelamento é parcial.

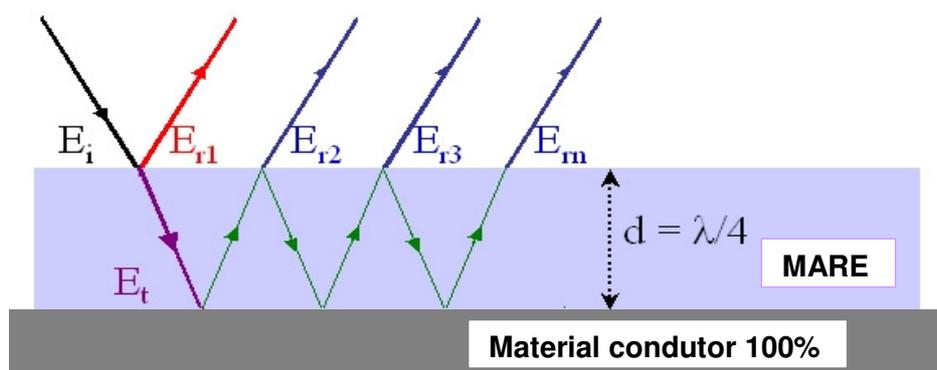


Figura A-2.1 – MARE baseado na Estrutura de Salisbury. E_i energia incidente. E_{r1} energia refletida. E_{r2} , E_{r3} ... E_{rn} energia emergente. E_t energia transmitida [SIMÕES, 2005].

A-2.2 ENERGIA ABSORVIDA

Os métodos de caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de radiação envolvem fundamentalmente a determinação de 3 variáveis (energia refletida, energia transmitida e energia absorvida), relacionadas com a interação da onda eletromagnética com o material [NOHARA, 2003a]. De acordo com a Equação A-2.1:

$$E_i = E_t + E_r + E_a + E_d \quad (\text{A-2.1})$$

onde:

E_i = energia incidente, representa o total da energia emitida pelo equipamento. Considera-se 100% para efeito de cálculo;

E_t = energia transmitida, representa a parcial da energia que atravessa a estrutura do material sem ser absorvida ou refletida;

E_r = energia refletida, representa a parcial da energia que é refletida do material;

E_a = energia absorvida, representa a parcial da energia que é atenuada devido ao material;

E_d = energia dissipada, representa a parcial da energia que é atenuada pelo espaço livre, isto é, a energia dissipada no meio ambiente no caminho entre a fonte e o detector da onda eletromagnética, considerada desprezível para efeito de cálculo da energia absorvida.

A Figura A-2.2 apresenta a interação dessas energias com a matéria.

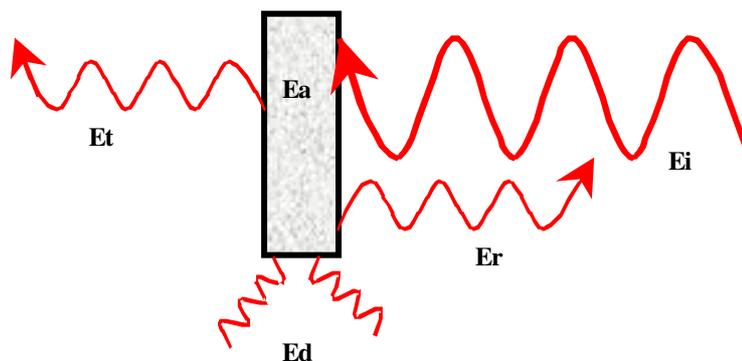


Figura A-2.2 – Esquema do caminho de energia da onda eletromagnética [NOHARA, 2003a].

Portanto, a energia absorvida é a componente da energia da onda eletromagnética que sofre a conversão da energia eletromagnética para a energia térmica, devido às propriedades dielétricas (permissividade complexa) e magnéticas (permeabilidade complexa) do material. Pelas propriedades dielétricas é definida a tangente de perdas ($tg \delta$), caracterizando o potencial de perda ôhmica da energia, e esta é consequência da condutividade do material e da corrente de deslocamento em função da frequência [LEE, 1991; REZENDE; MARTIN; MIACCI; NOHARA, 2001; HIPPEL, 1954].

A partir das propriedades magnéticas é definida a tangente de perdas magnética ($tg \delta_m$), caracterizado pelos mecanismos de absorção devido ao alinhamento e rotação de spins de magnetização dentro do domínio do material [BALANIS, 1989]. A energia absorvida está relacionada com a absorção intrínseca do material, ou seja, a magnitude da energia absorvida depende das tangentes de perdas dielétricas e magnéticas [NOHARA, 2003a].

A-2.3 MULTIREFLEXÕES INTERNAS

A componente da onda eletromagnética que atravessa a superfície, sofre multireflexões no interior do material, devido à reflexão dos centros absorvedores de radiação (aditivos dielétricos e/ou magnéticos) que se encontram dispersos homoganeamente em todo o volume interno do MARE [NOHARA, 2003a]. Também podem ocorrer multireflexões entre as superfícies dos MARE (superfície com o meio externo e a superfície com o material condutor), essas multireflexões acontecem simultaneamente e promovem a atenuação da radiação. Apresentado na Figura A-2.3 (a) e (b), os fenômenos foram separados para melhor explanação.

Na Figura A-2.3 (a) é apresentado as multireflexões internas que ocorrem entre as partículas dos centros absorvedores, de maneira que a onda incidente ao penetrar os MARE encontra as partículas de centros absorvedores dispersados homoganeamente em todo o volume e é refletida entre essas partículas. Na Figura A-2.3 (b) é apresentado as multireflexões internas que ocorrem entre as superfícies do MARE, a onda incidente ao ultrapassar a superfície ar-MARE monocamada com impedância próximo do ar chega a superfície MARE-material 100% condutor e sofre reflexão total, esta onda chega novamente a superfície ar-MARE e parte da onda é emergida para o meio externo e parte da onda é novamente refletida, esta sucessão de reflexões múltiplas promovem a atenuação da onda incidente [BALANIS, 1989; FOLGUERAS, 2005; LEE, 1991]

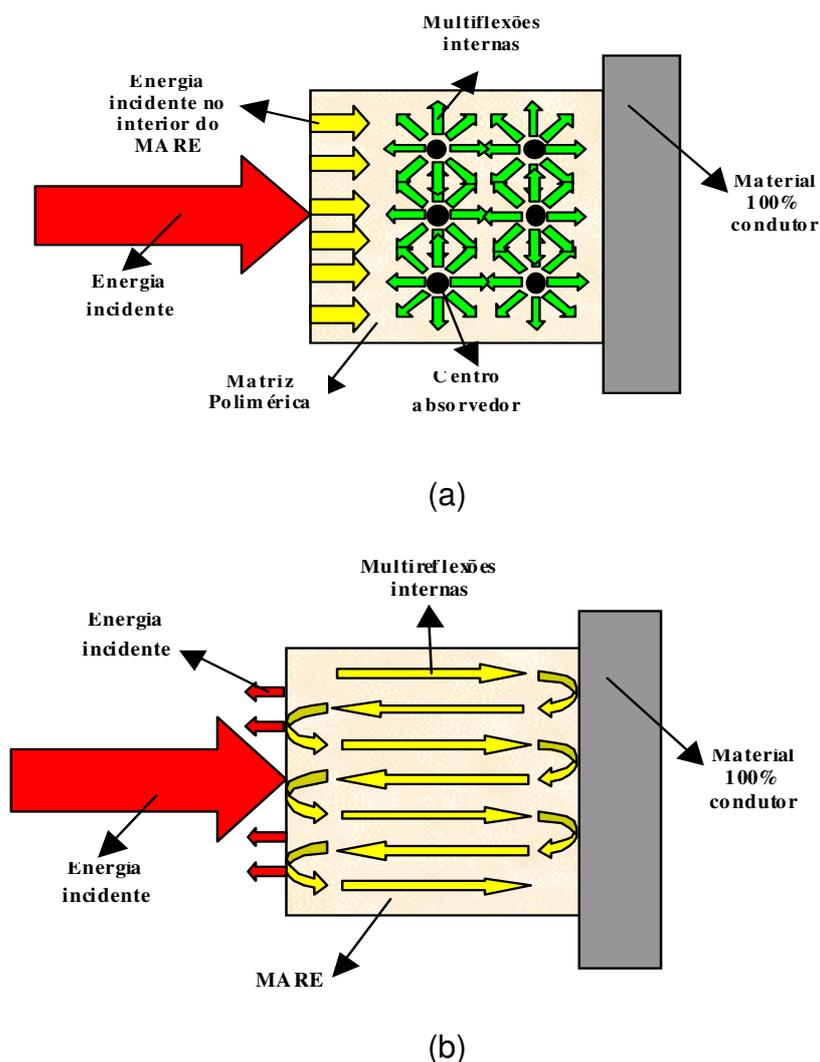


Figura A-2.3 – Multireflexões internas: (a) Multireflexões entre os centros absorvedores, (b) multireflexões entre as superfícies MARE-ar e MARE-material condutor [BALANIS, 1989].

A-2.4 MULTIREFLEXÕES EXTERNAS

A geometria dos MARE é também um fator importante da atenuação da onda eletromagnética, a superfície rugosa ou de topografia desigual com oscilações do ponto mais baixo ao ponto mais alto, superior a $\lambda/32$, causa multireflexões superficial da onda eletromagnética [KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993; LEE, 1991]. Parte da onda é refletida no plano superficial, reflete e absorve novamente,

em outro plano superficial, desta forma a onda é diminuída pelas multireflexões superficial, conforme apresentado na Figura A-2.4.

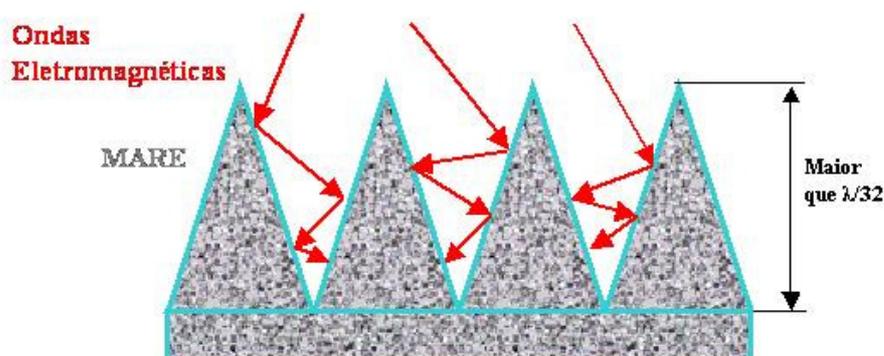


Figura A-2.4 – MARE com topografia piramidal [ETS-LINDGREN, 2006]

Este princípio é usado para projetar absorvedores, com atenuação abaixo de 50 dB (99,999% de atenuação), usados em revestimento interno de câmara anecóica [ETS-LINDGREN, 2006; KNOTT; SHAEFFER; TULEY, 1993; NEC CORPORATION, 1992], como apresentado na Figura A-2.5.

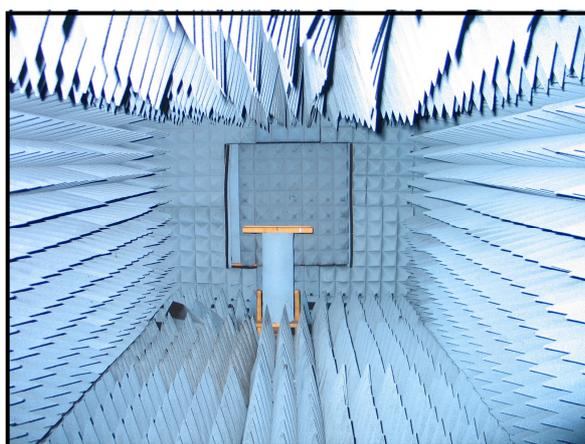


Figura A-2.5 – Fotografia do interior de uma câmara anecóica recoberta por MARE [PEREIRA; REZENDE; NOHARA, 2006b].

ANEXO 3 – MEDIDAS DE PERMISSIVIDADE E PERMEABILIDADES DOS CORPOS-DE-PROVA DE FERROCARBONILA

A seguir estão os gráficos com os resultados obtidos das medidas de permissividade e permeabilidade complexas dos corpos-de-prova de resina epóxi aditados com ferrocarbonila nas concentrações 40%, 45%, 50%, 55%, 60% e 65% (% em massa de ferrocarbonila), nas espessuras entre 2,70 mm e 3,50 mm com passo de 0,10 mm.

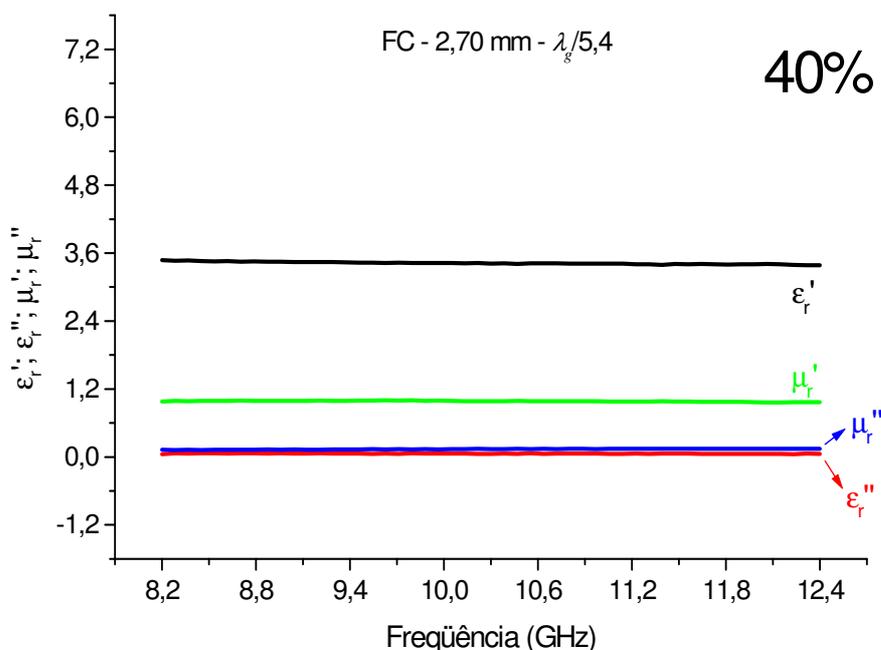


Figura A-3.1 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocarbonila e espessura de 2,70 mm.

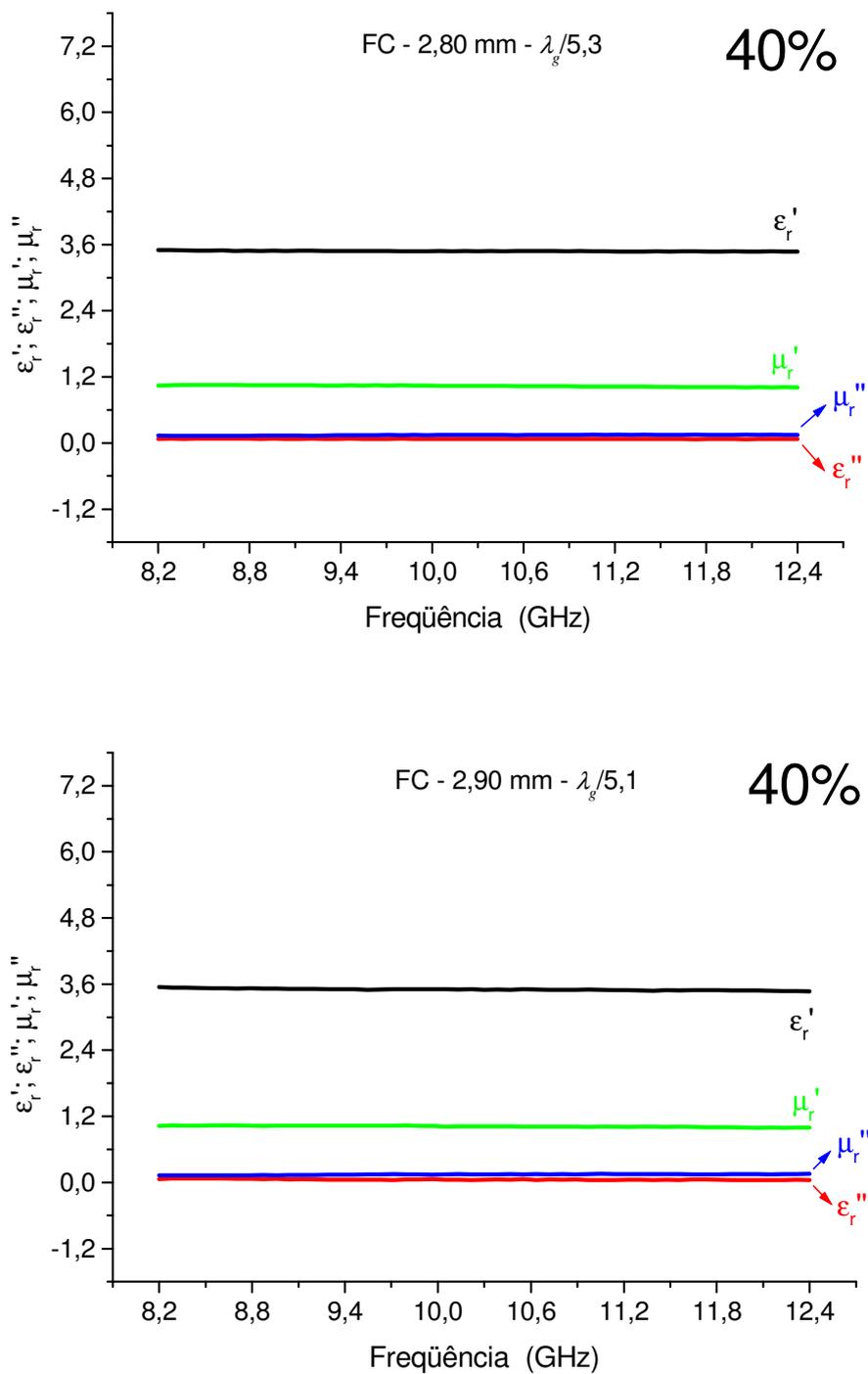


Figura A-3.2 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocyanila e espessuras 2,80 mm e 2,90 mm..

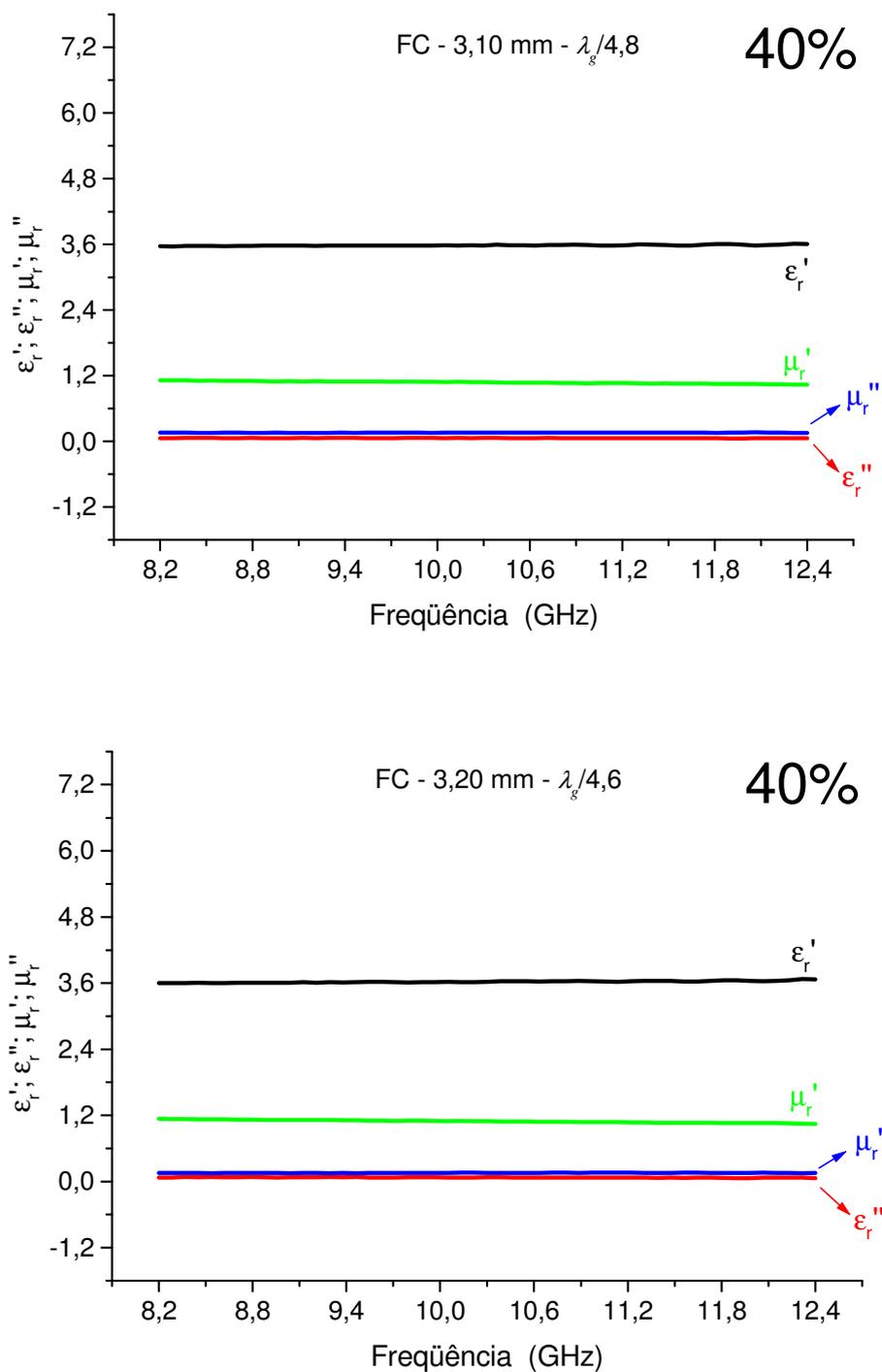


Figura A-3.3 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocenona e espessuras de 3,10 e 3,20 mm.

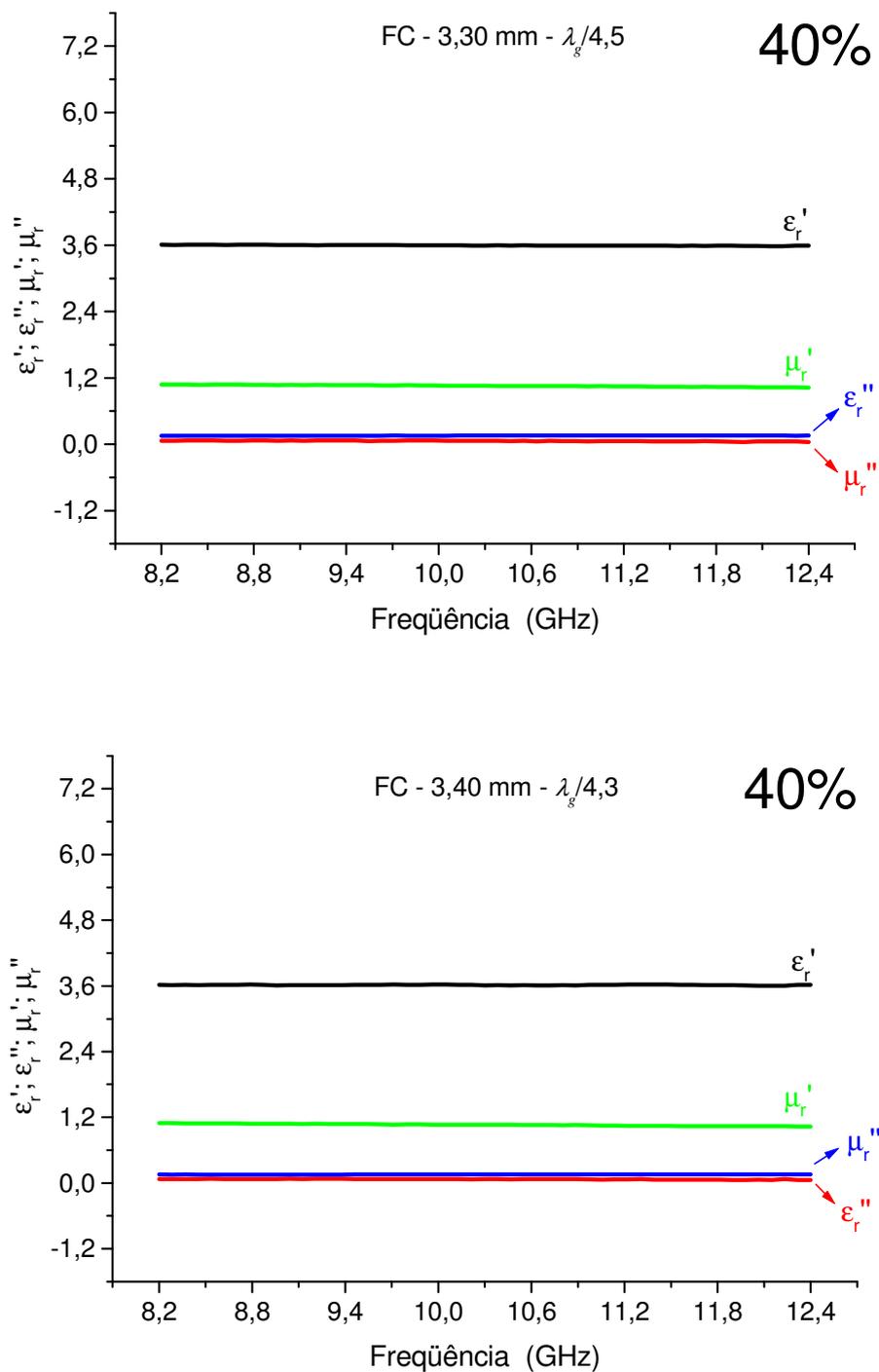


Figura A-3.4 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 40% em massa de ferrocenona e espessuras de 3,30 e 3,40 mm.

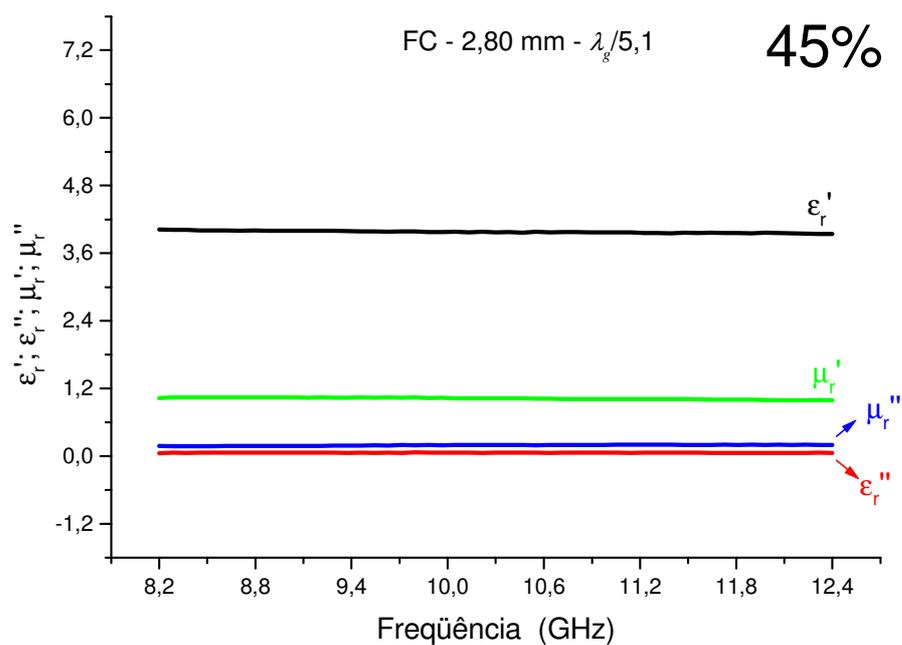
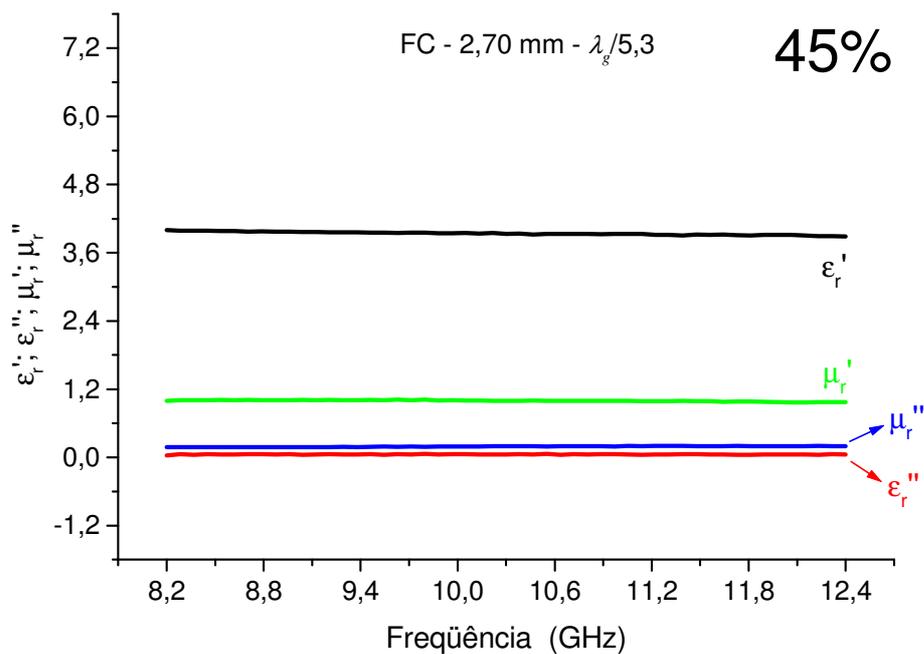


Figura A-3.5 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 45% em massa de ferrocyanila e espessuras de 2,70 e 2,90 mm.

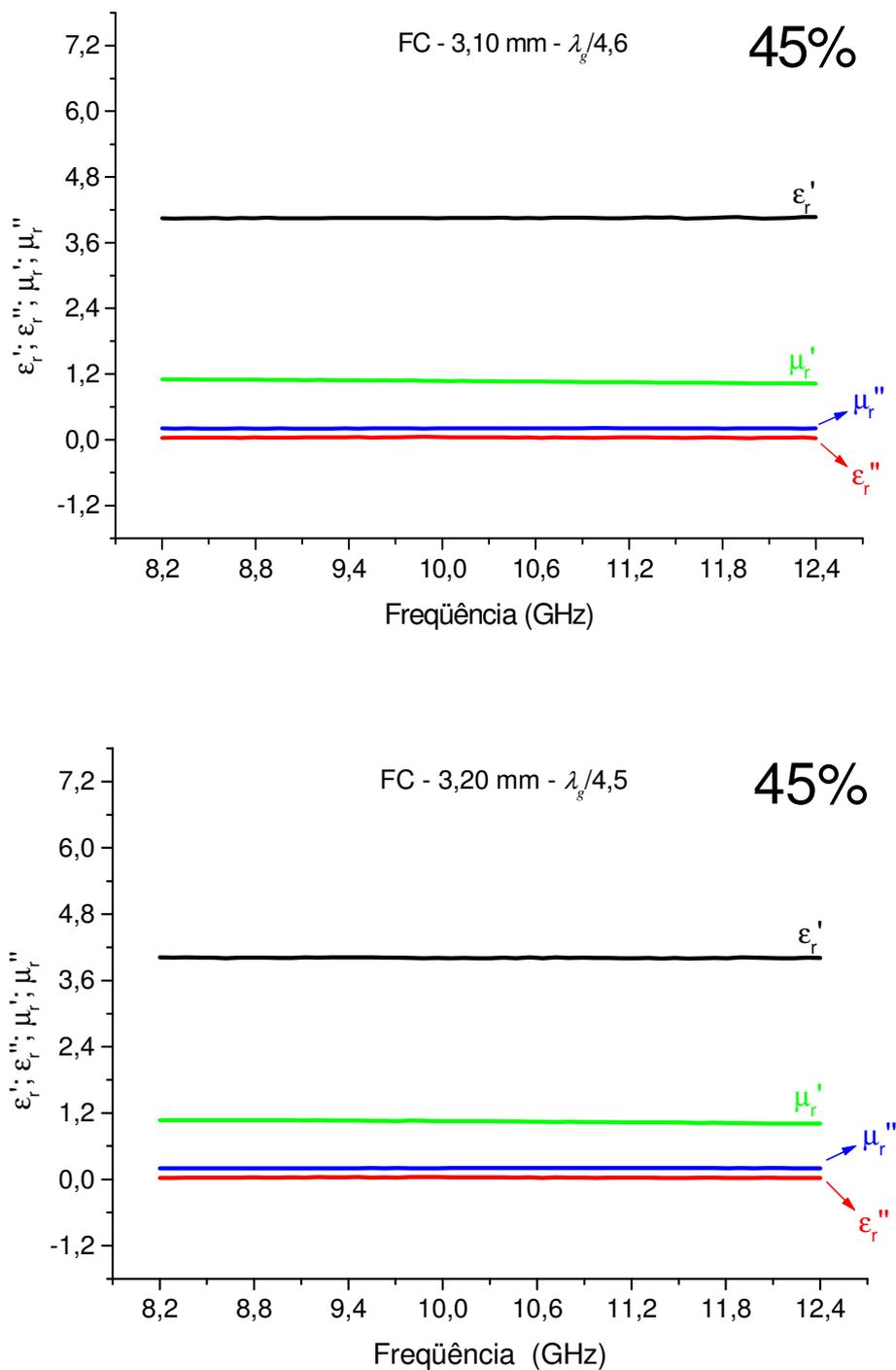


Figura A-3.6 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 45% em massa de ferrocyanila e espessuras de 3,10 e 3,20 mm.

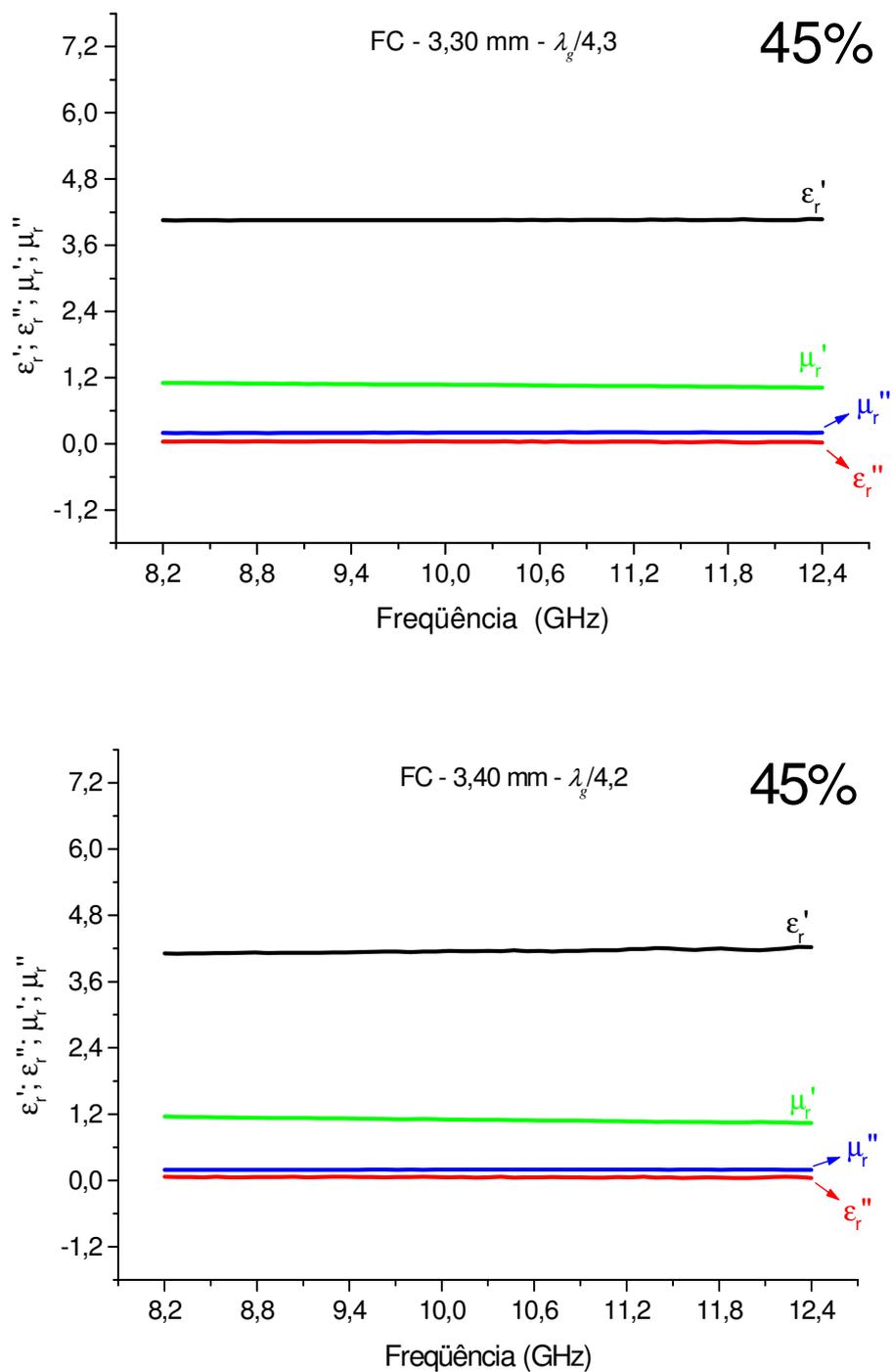


Figura A-3.7 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 45% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,30 e 3,40 mm.

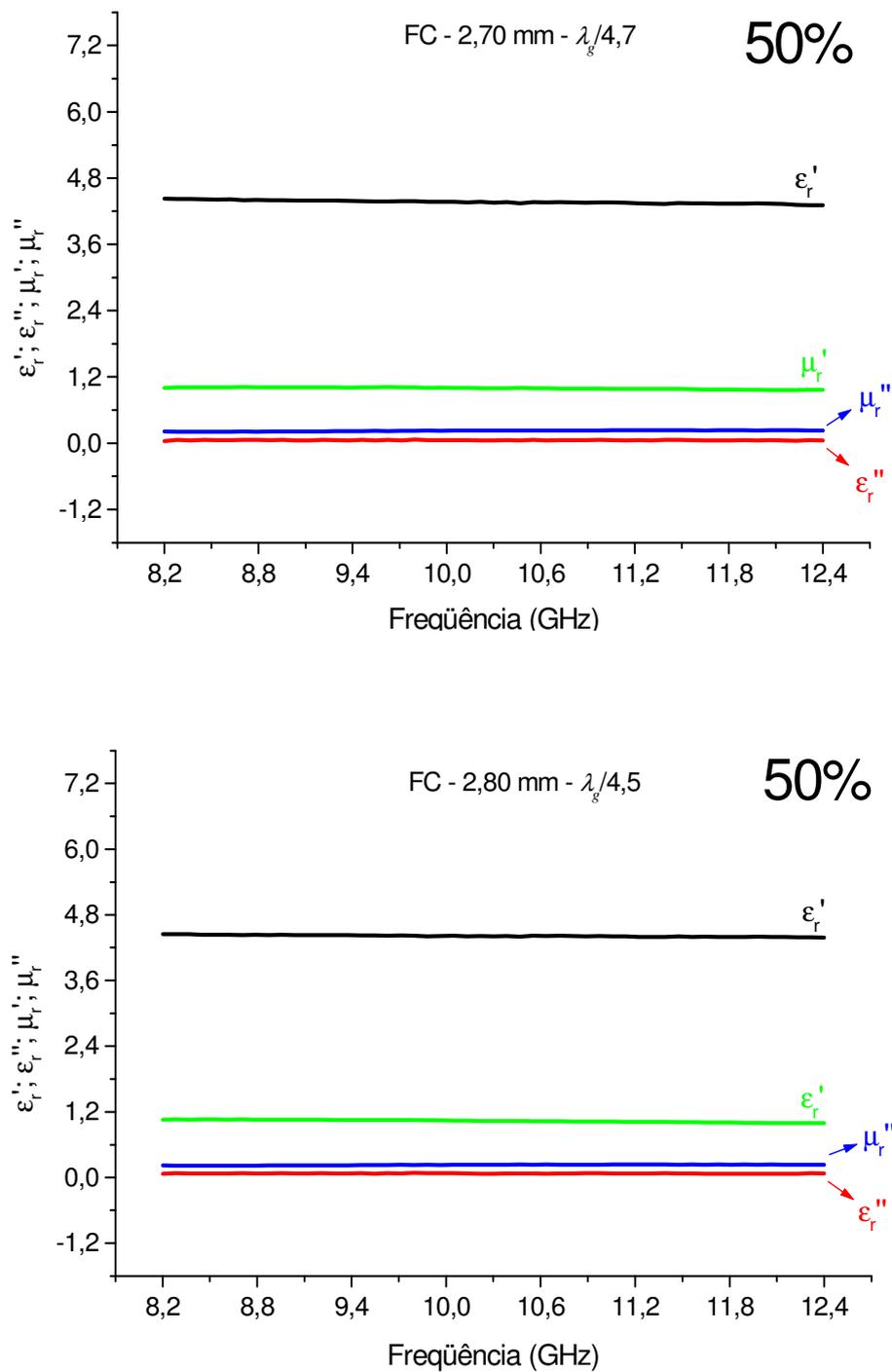


Figura A-3.8 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 50% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 2,70 e 2,80 mm.

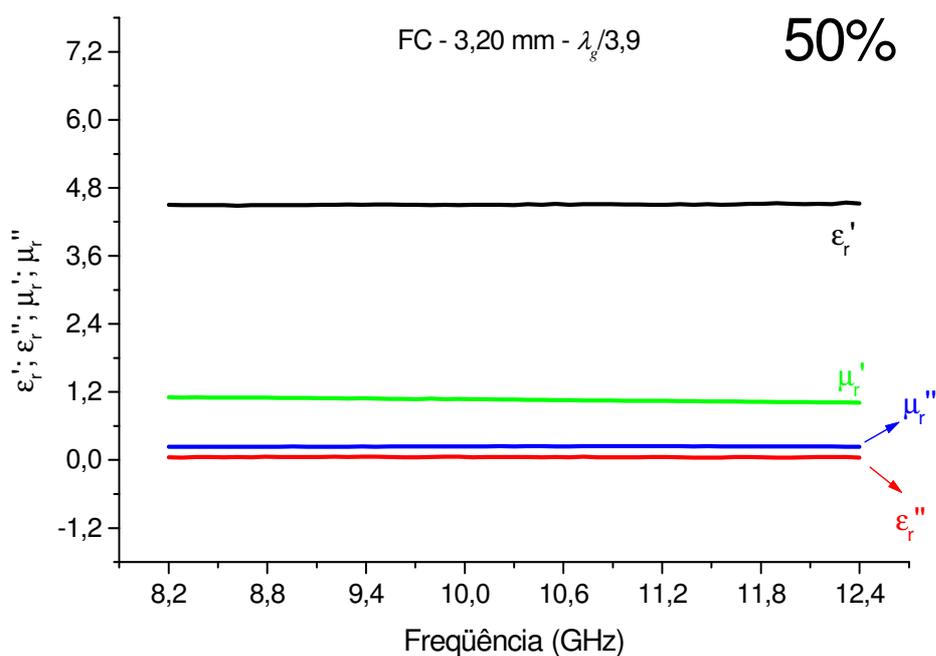
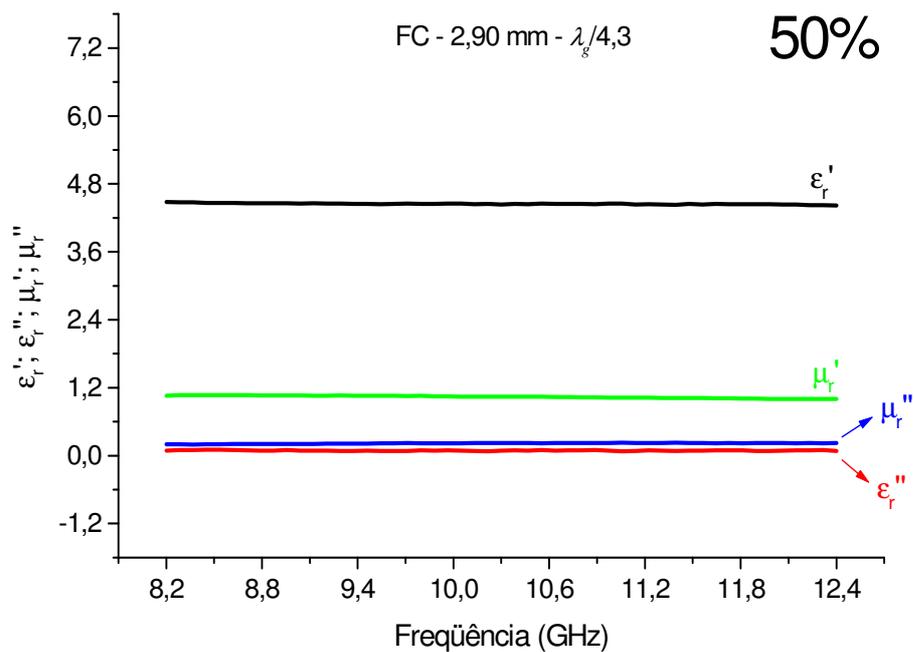


Figura A-3.9 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 50% em massa de ferrocenita e espessuras de 2,90 e 3,20 mm.

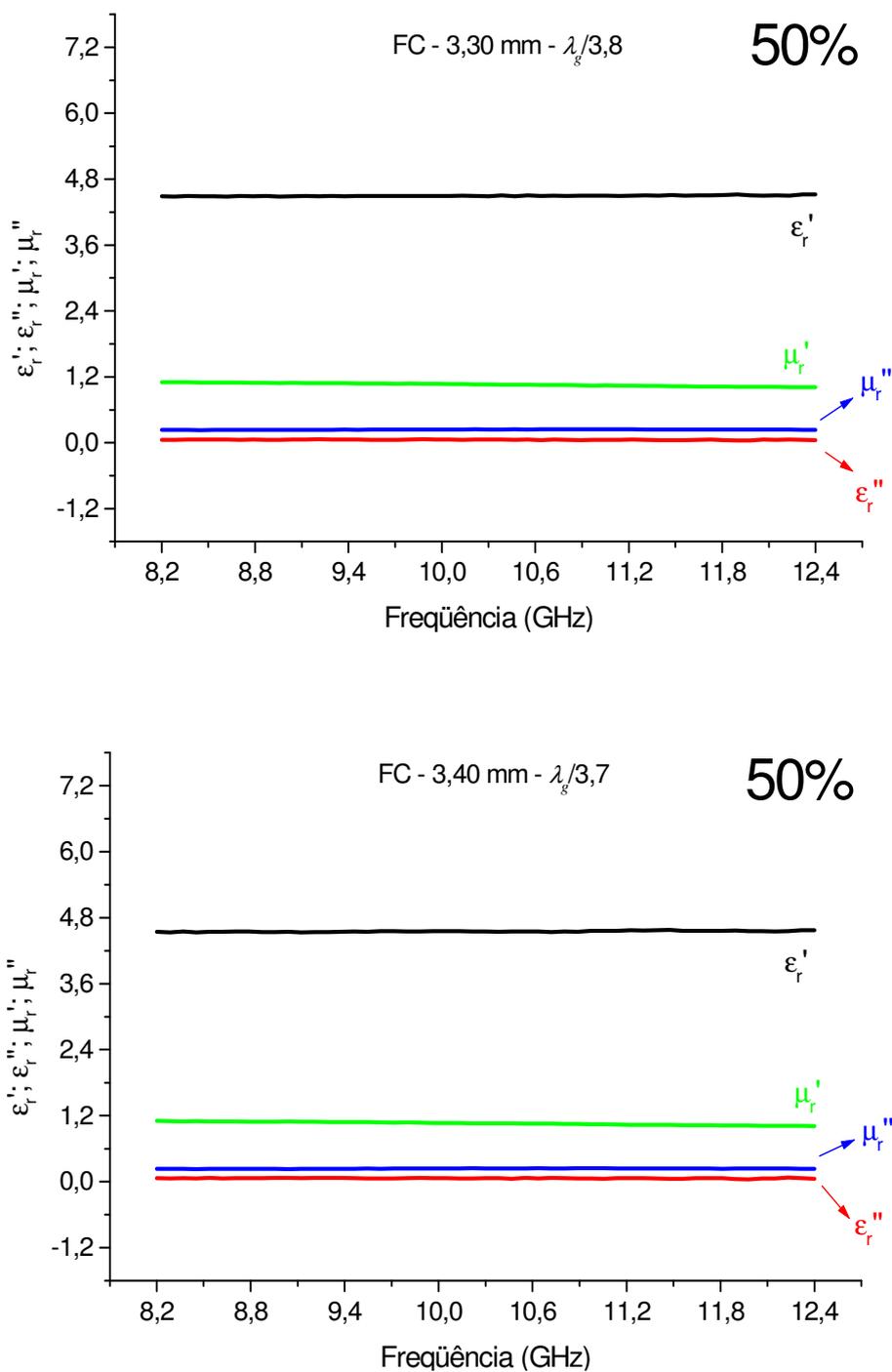


Figura A-3.10 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 50% em massa de ferrocenona e espessuras de 3,30 e 3,40 mm.

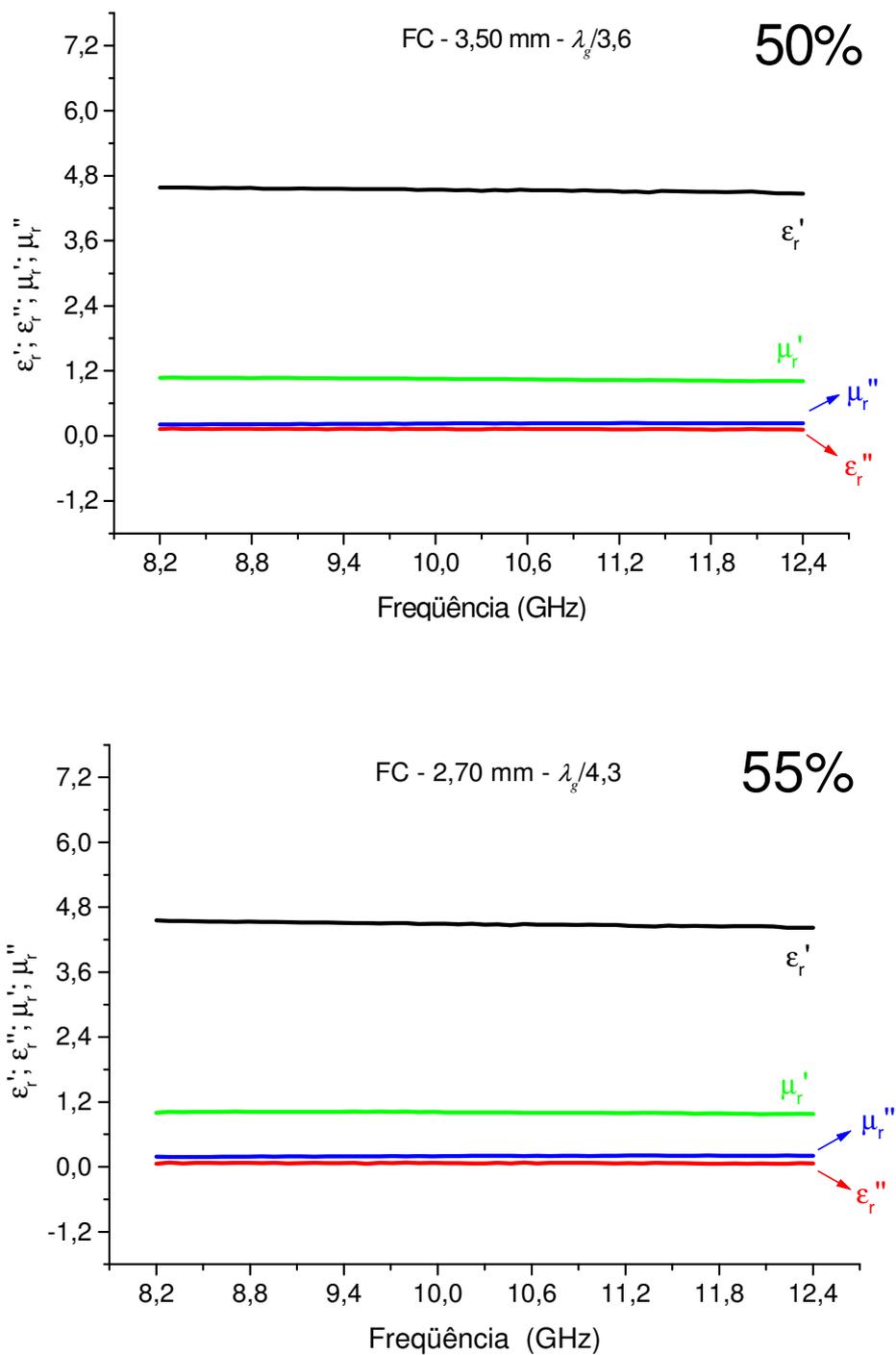


Figura A-3.11 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações de 50% e 40% em massa de ferrocenita e espessuras de 3,50 e 2,70 mm, respectivamente.

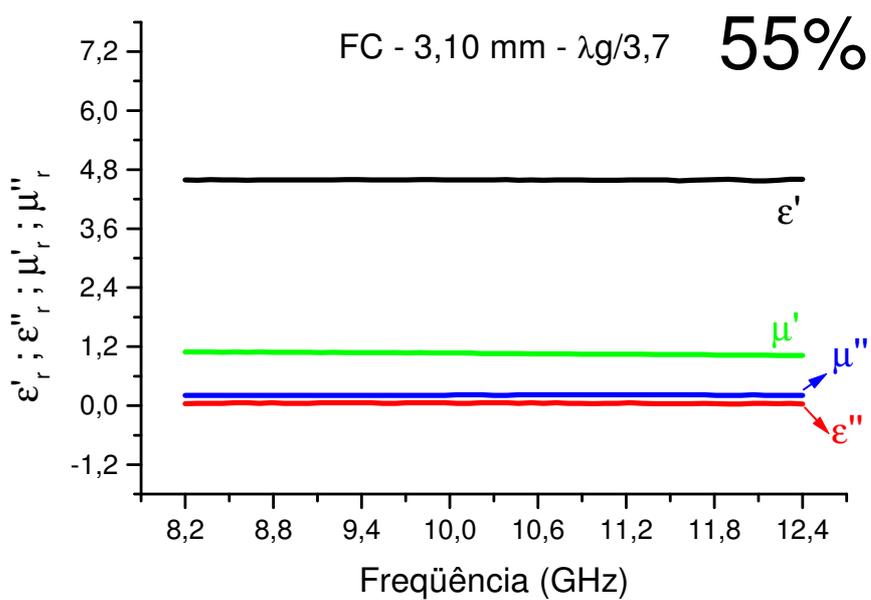
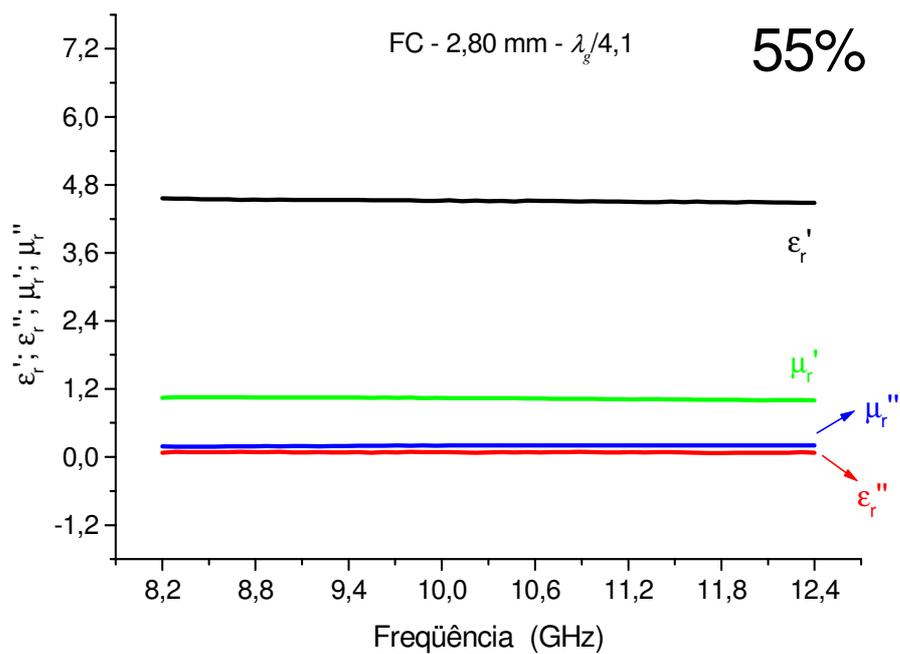


Figura A-3.12 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 55% em massa de ferrocianila e espessuras de 2,80 e 3,10 mm.

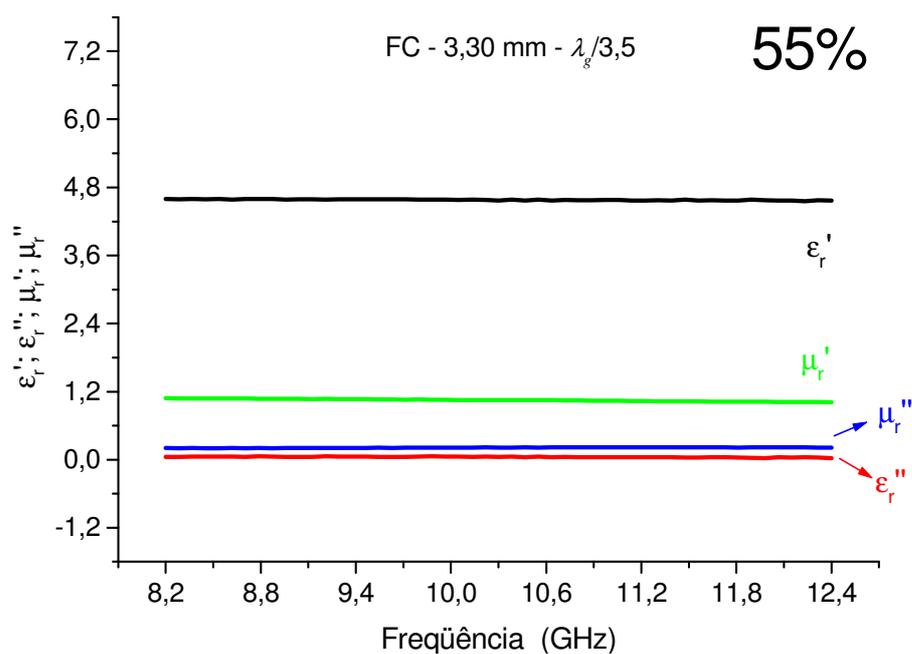
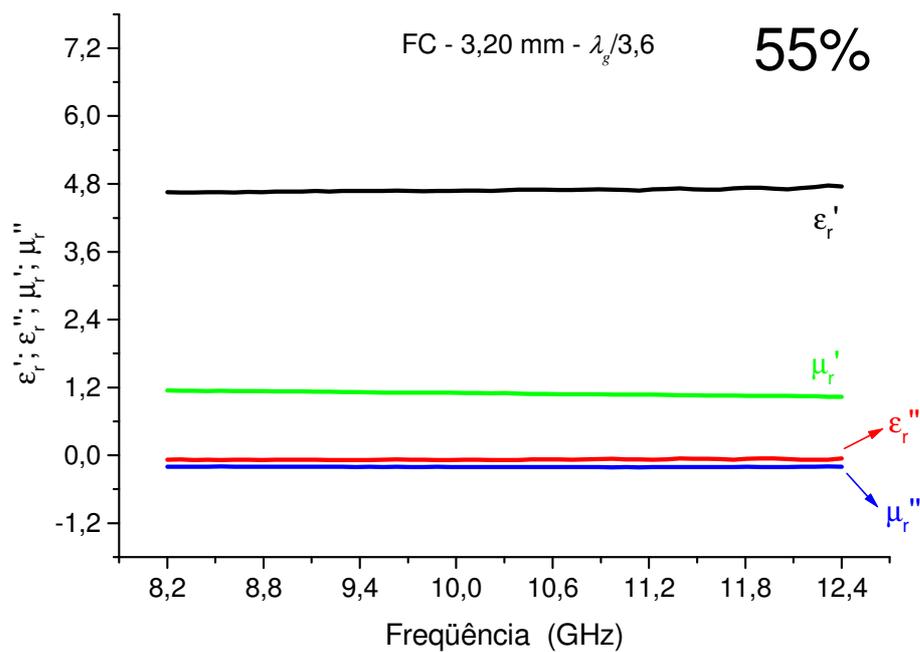


Figura A-3.13 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 55% em massa de ferrocenone e espessuras de 3,20 e 3,30 mm.

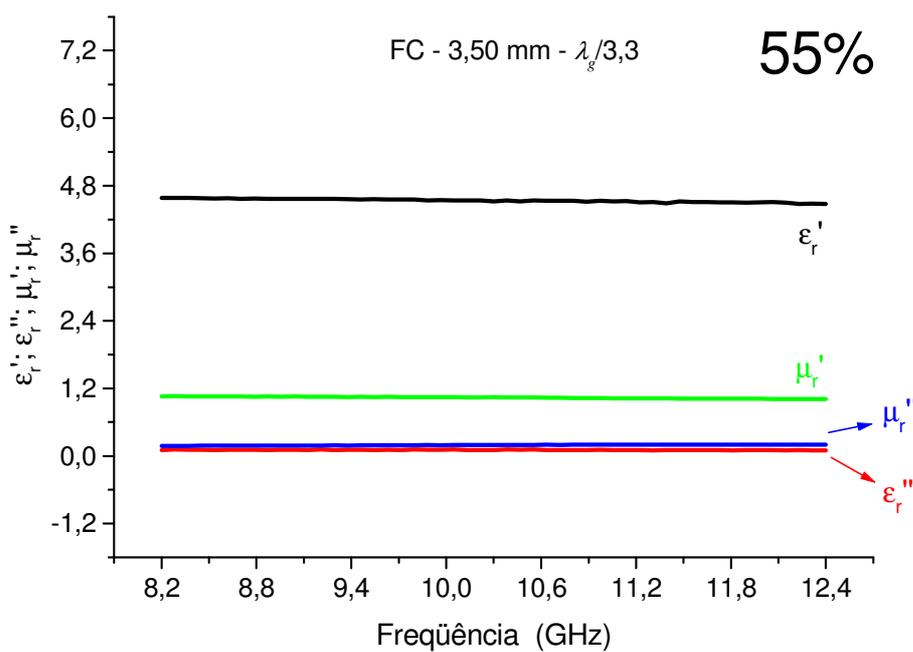
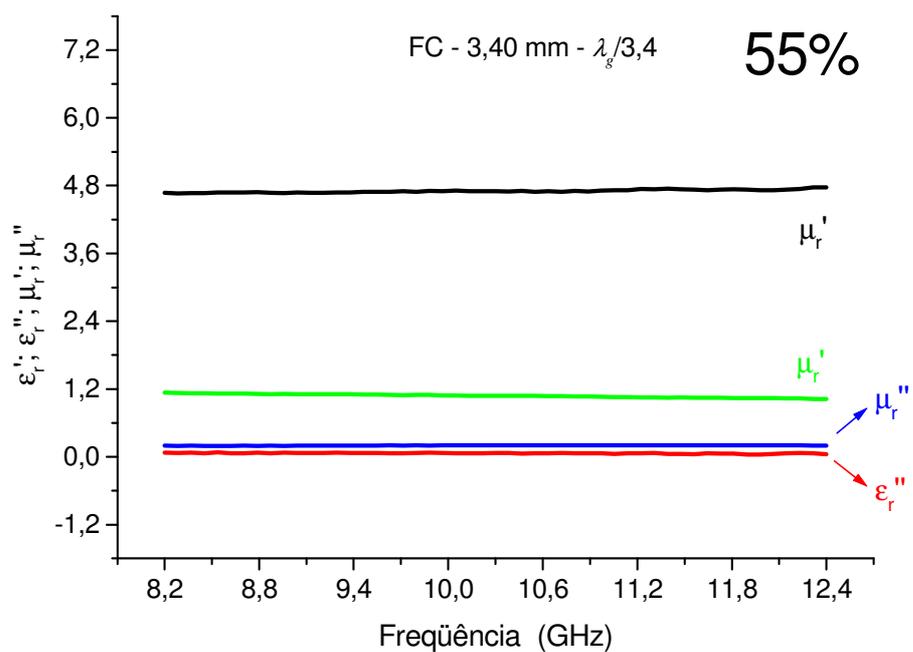


Figura A-3.14 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 55% em massa de ferrocarbonila e espessuras de 3,40 e 3,50 mm.

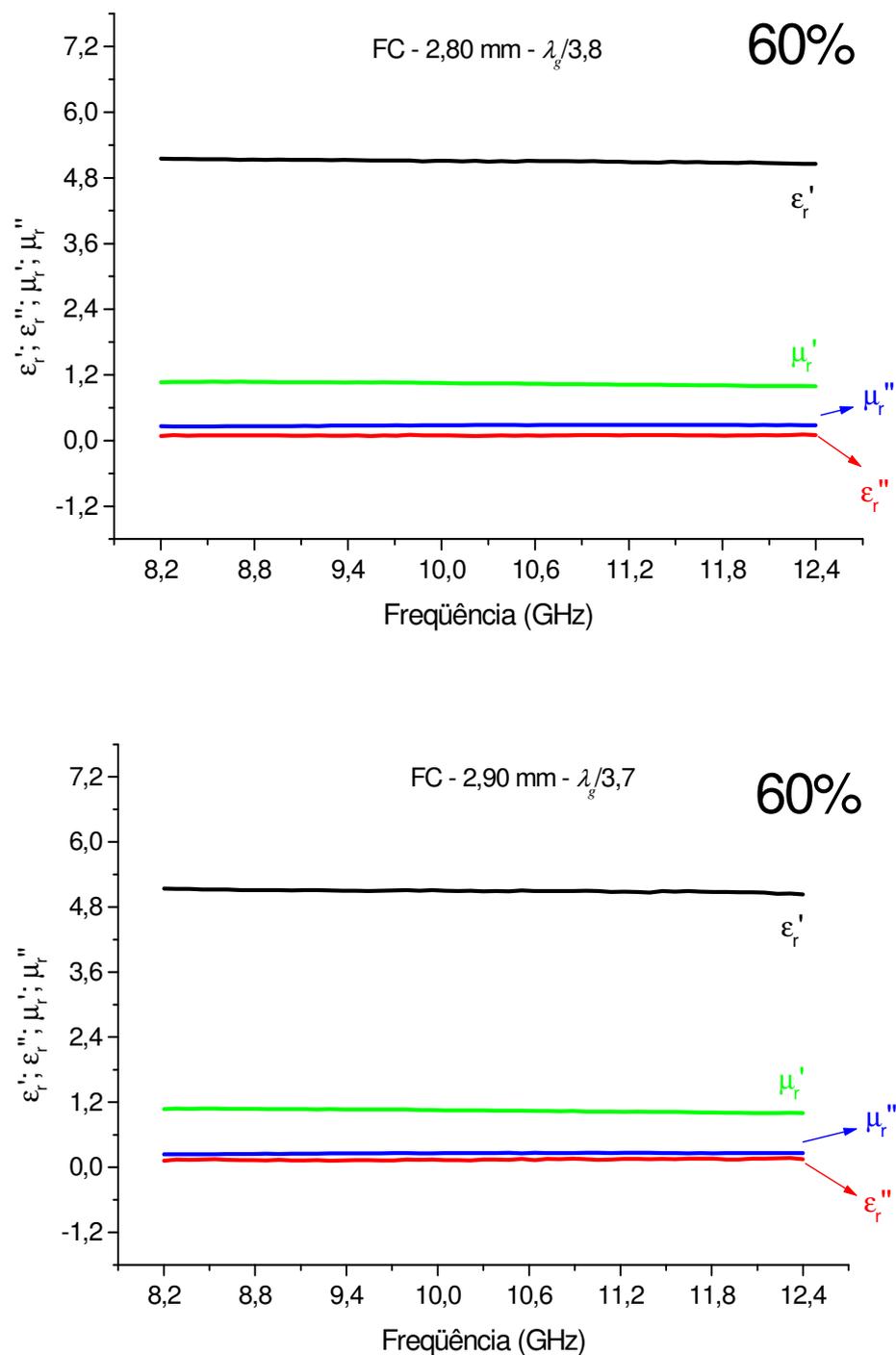


Figura A-3.15 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 60% em massa de ferrocyanila e espessuras de 2,80 e 2,90 mm.

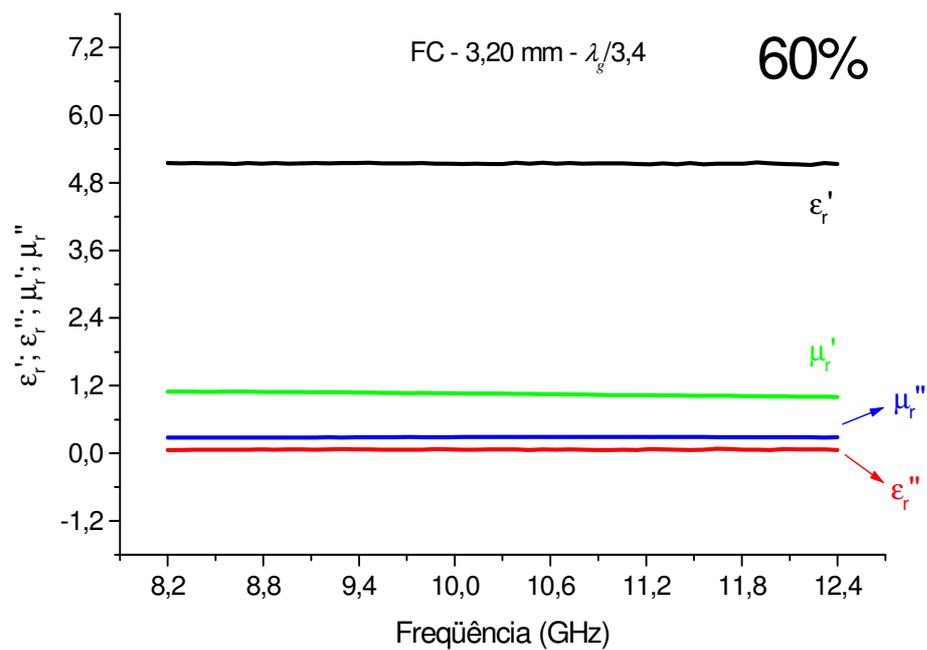
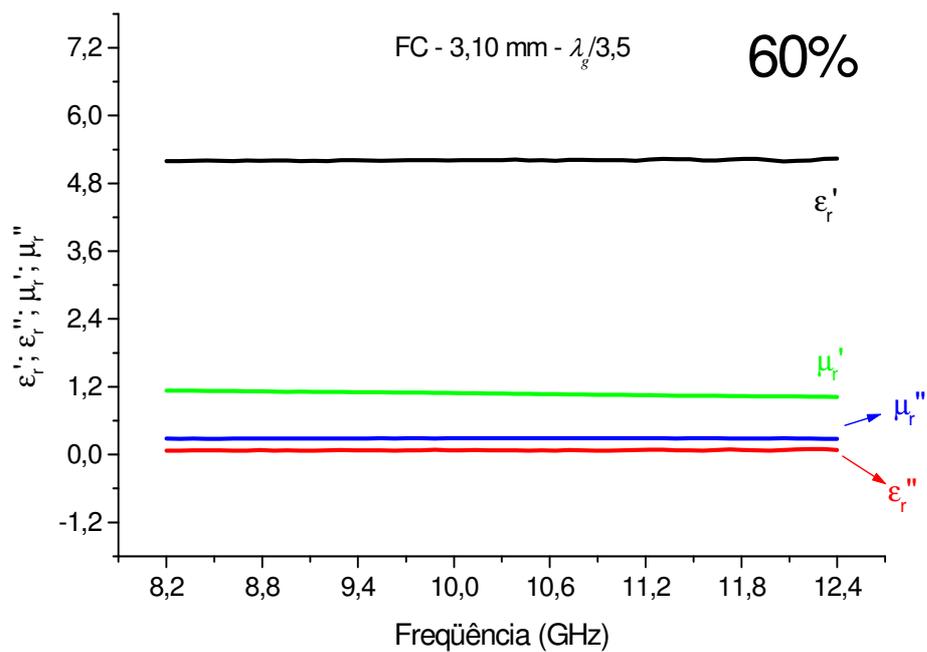


Figura A-3.16 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 60% em massa de ferrocementa e espessuras de 3,10 e 3,20 mm.

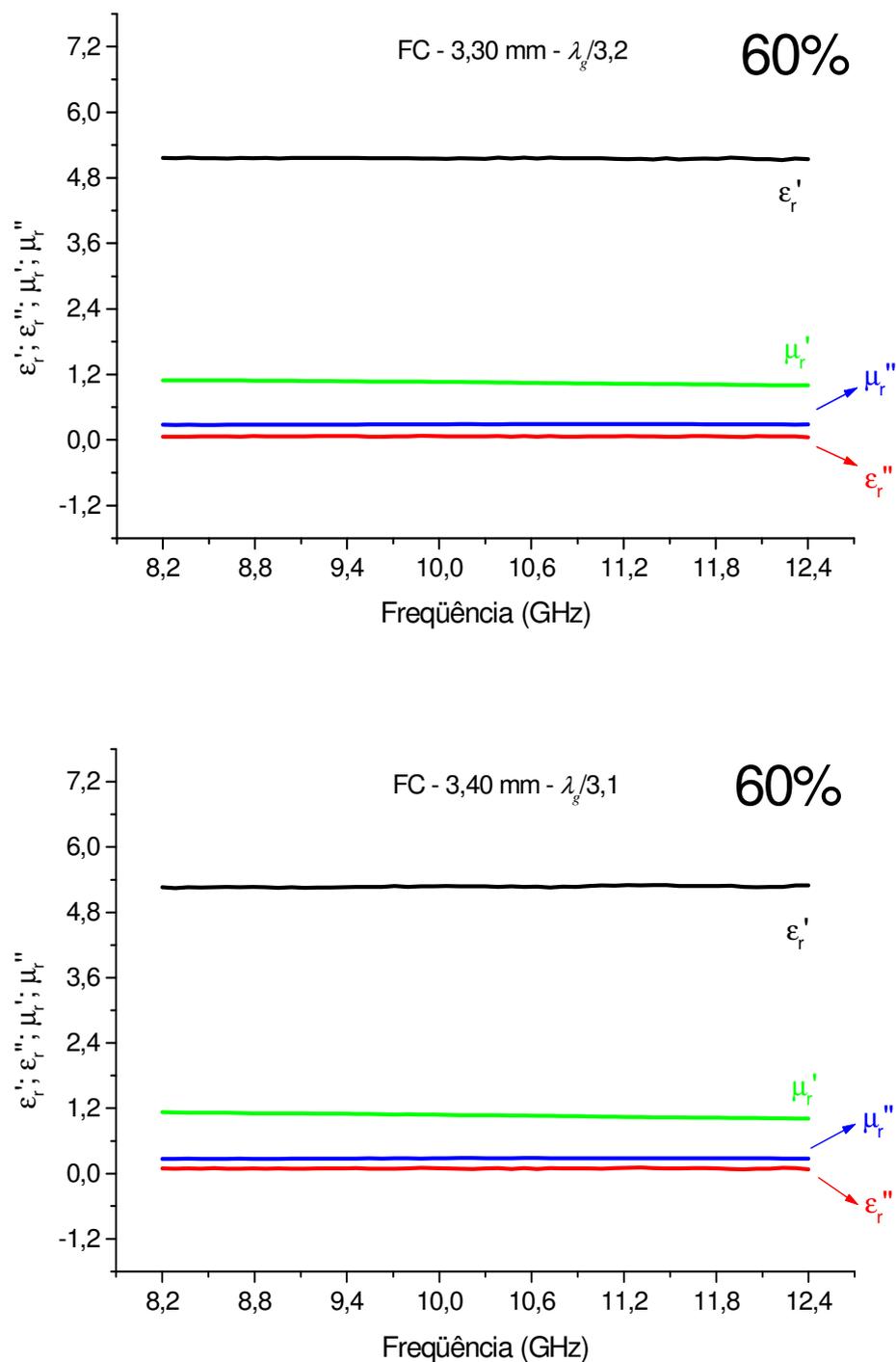


Figura A-3.17 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 60% em massa de ferrocenita e espessuras de 3,30 e 3,40 mm.

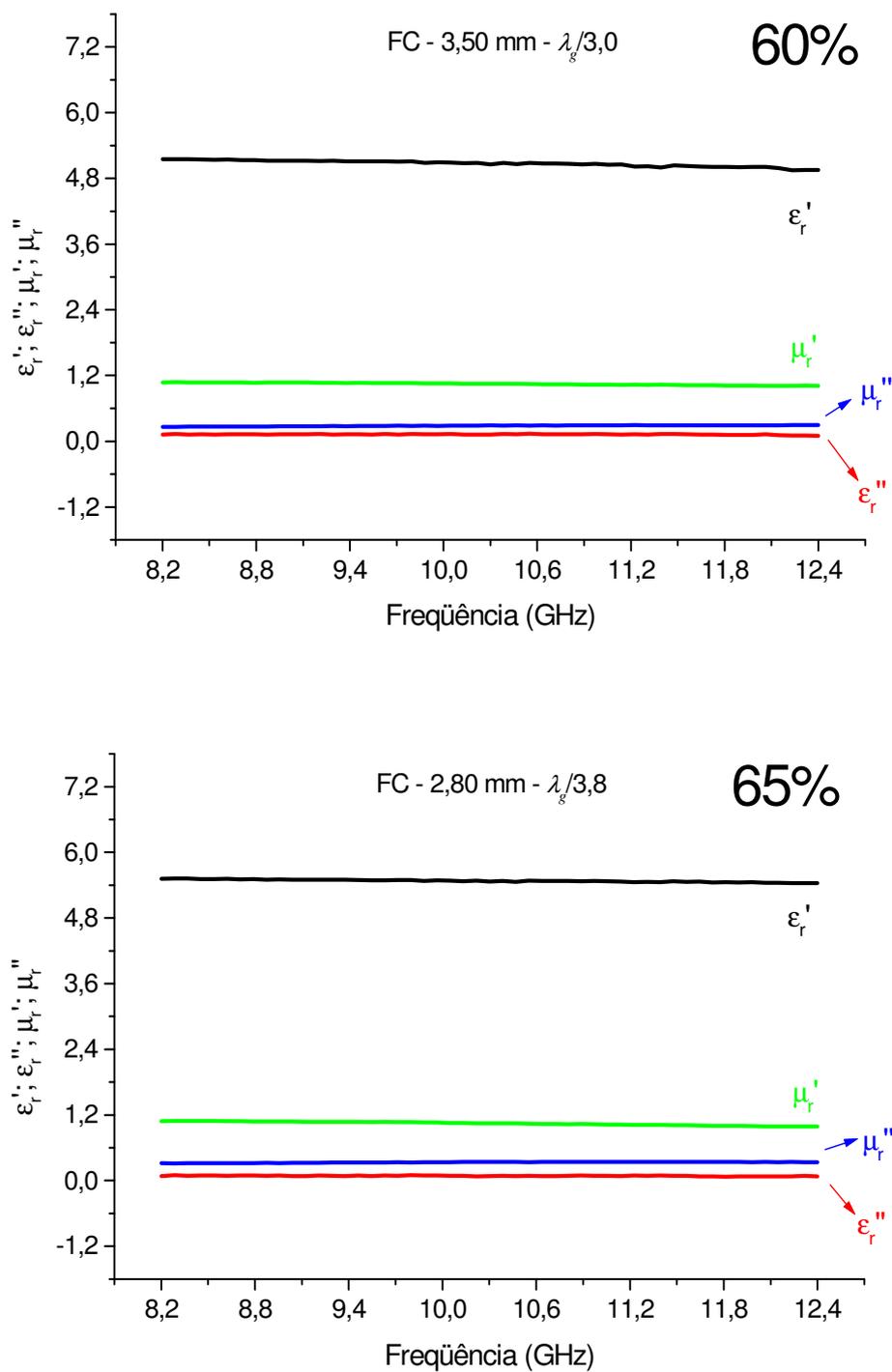


Figura A-3.18 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentrações de 40% e 65% em massa de ferrocenona e espessuras de 3,50 e 2,80 mm, respectivamente.

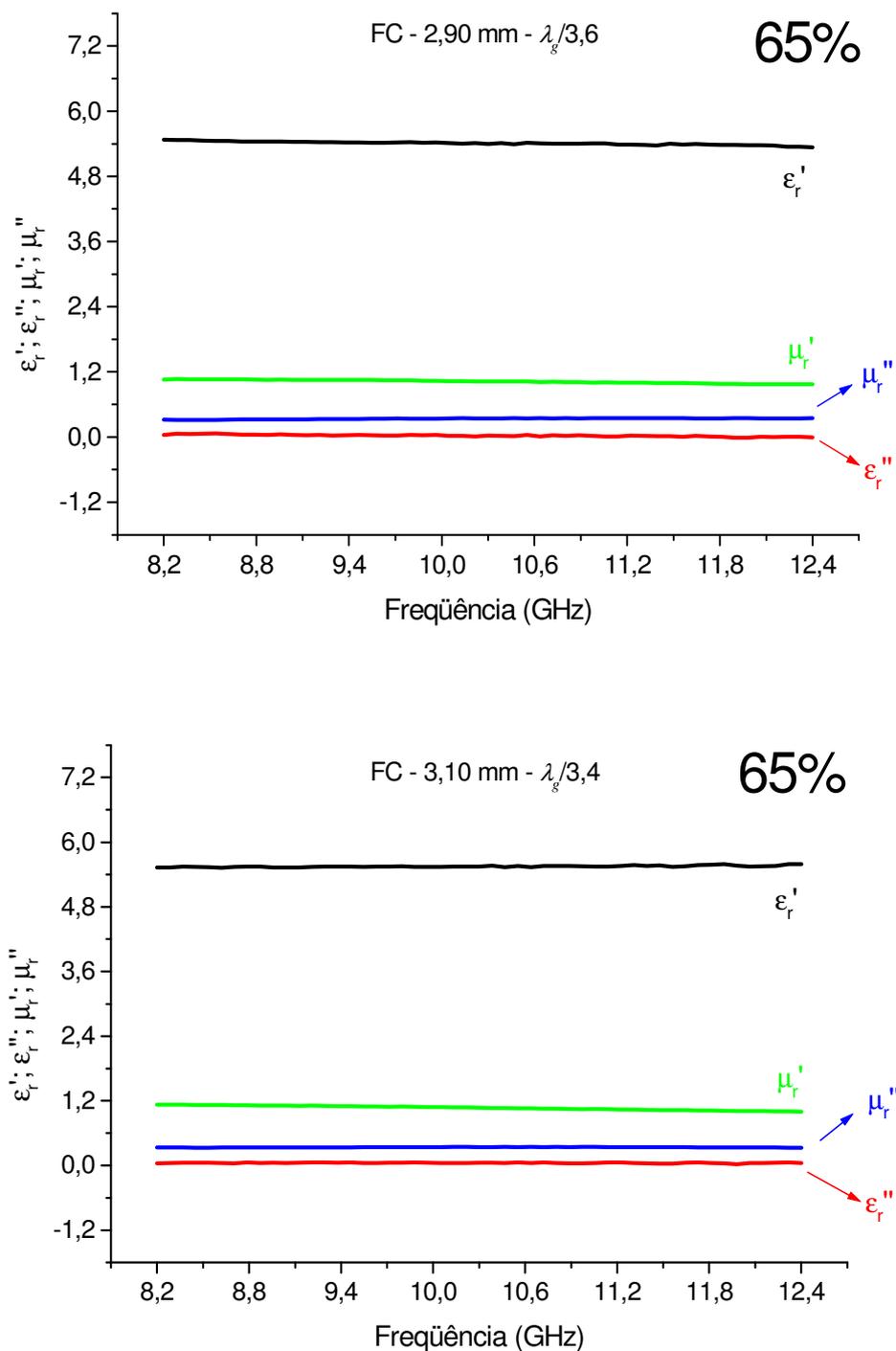


Figura A-3.19 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 65% em massa de ferrocyanila e espessuras de 2,90 e 3,10 mm.

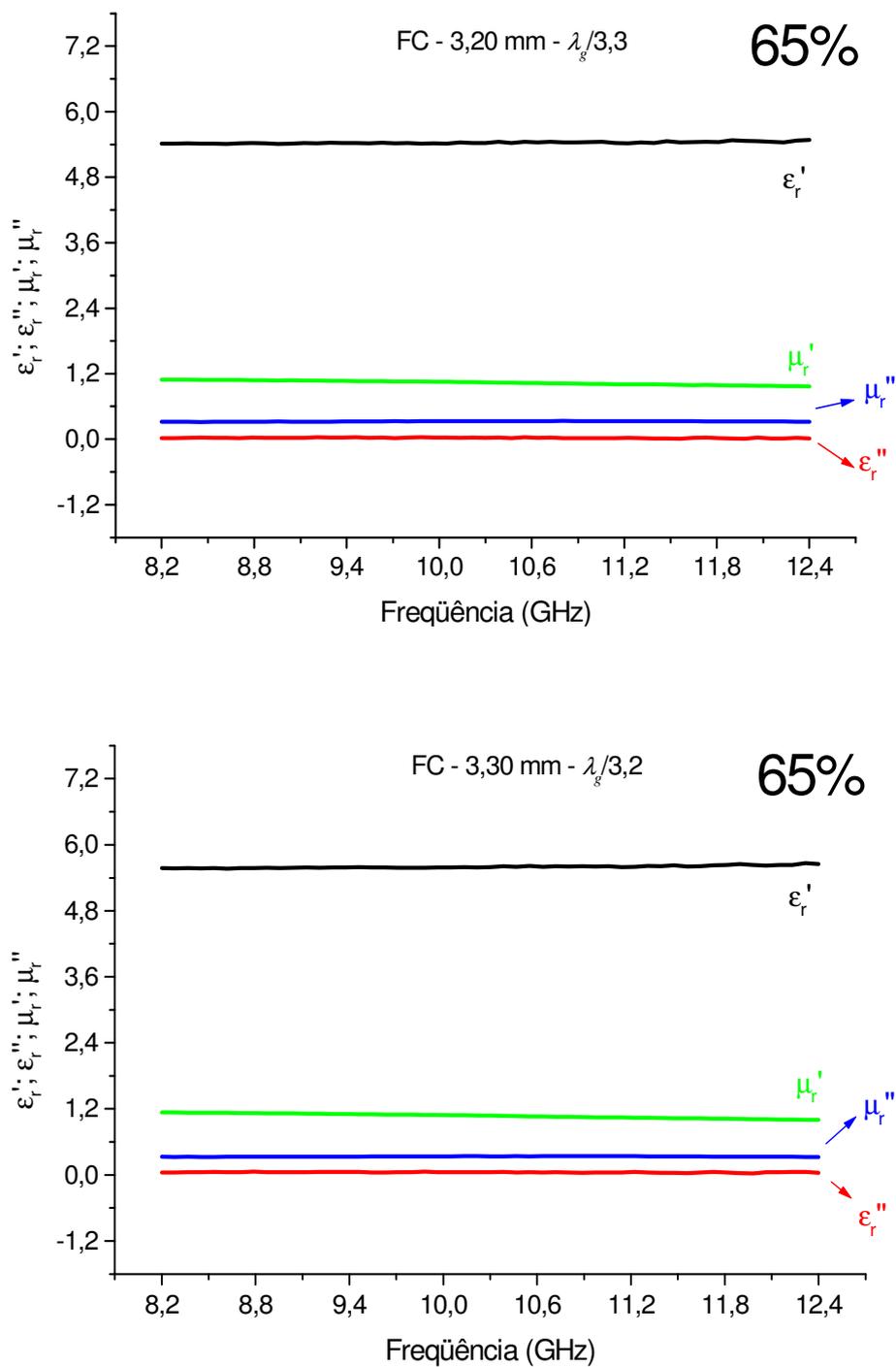


Figura A-3.20 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 65% em massa de ferrocenona e espessuras de 3,20 e 3,30 mm.

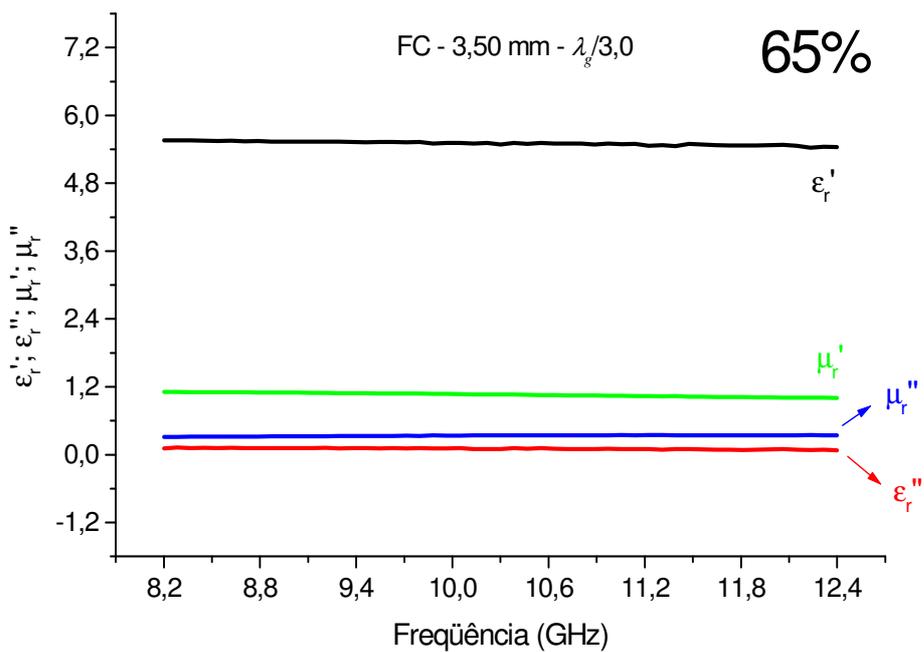
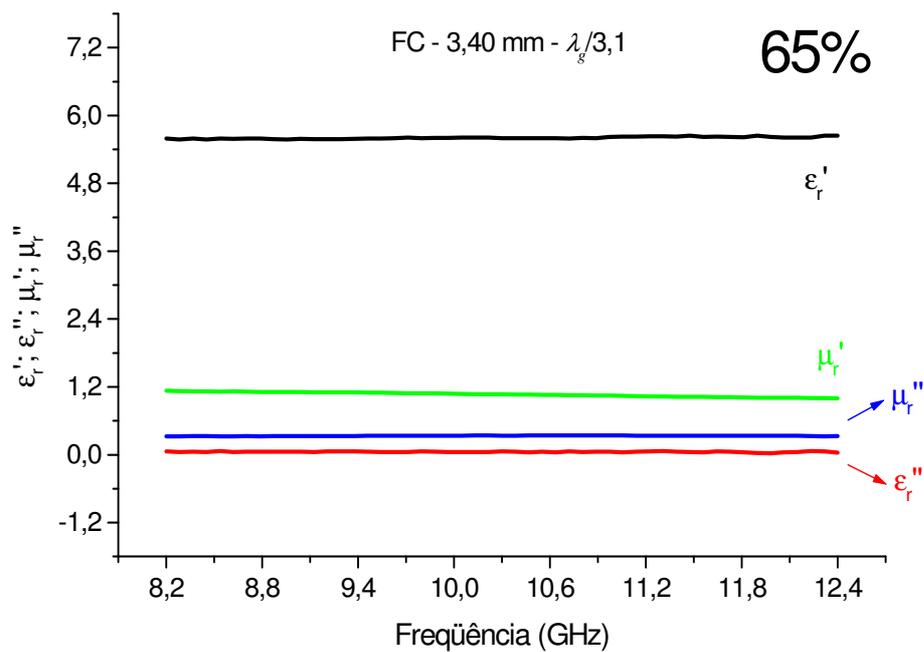


Figura A-3.21 – Valores de permissividade e permeabilidade dos corpos-de-prova com concentração de 65% em massa de ferrocenone e espessuras de 3,40 e 3,50 mm.

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

José Jesus Pereira

Taubaté, maio de 2007.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)