

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Antonio Fernandes Sfalsin

**MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA BASEADOS EM
NEGRO DE FUMO E
PAPEL CELULÓSICO NA BANDA X
(8,2 - 12,4 GHz)**

Taubaté – SP

2008

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Antonio Fernandes Sfalsin

**MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA BASEADOS EM
NEGRO DE FUMO E
PAPEL CELULÓSICO (8,2-12,4 GHz)**

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: Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Taubaté – SP

2008

S523m Sfalsin, Antonio Fernandes.
Materiais absorvedores de radiação eletromagnética baseados em negro de fumo e papel celulósico (8,2-12,4 ghz)./ Antonio Fernandes Sfalsin. – Taubaté: Unitau, 2008.

112 f. :il;30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté. Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara.

1. Negro de fumo. 2. Papel celulósico. 3. Banda X. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD(21) 539.2

ANTONIO FERNANDES SFALSIN

**MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA BASEADOS EM NEGRO DE FUMO
E PAPEL CELULÓSICO (8,2-12,4 GHz)**

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: Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Data: 5 de abril de 2008.

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Evandro Luís Nohara
Presidente da Banca - Orientador

Universidade de Taubaté

Prof. Dra. Luiza de Castro Folgueras
Membro Interno

Universidade de Taubaté

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Membro Externo

Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

À UNITAU pela oportunidade da realização deste Curso de Pós-Graduação (mestrado).

Ao Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA) por disponibilizar sua infra-estrutura de laboratórios para a realização da parte experimental deste trabalho.

Ao meu orientador e amigo Professor Doutor Evandro Luis Nohara pela direção apontada e pelos ensinamentos tantos que a mim foram passados.

Ao meu amigo Professor Doutor Marcio Bambirra pelos conselhos sábios que um dia me deu me incentivando na realização deste mestrado.

Ao José Arauto Ribeiro pela grande ajuda e apoio durante os trabalhos de preparação do material para caracterização.

À Dona Neuza pelos exemplos de coragem e determinação na busca da realização dos nossos sonhos.

Ao Sr. Clóvis Roberto Silva “o nosso Sôbetim” pelos exemplos de dignidade e respeito ao semelhante (tão necessários) em todos os momentos da vida.

À minha irmã Nemir Sfalsin “a nossa Mila” pela paz e as palavras de estímulo a mim transmitidas nesses últimos anos de trabalho.

Aos grandes amigos desde o início de tudo, Grayce e Norberto que sempre me incentivaram e acreditaram no sucesso deste trabalho.

Dedico este trabalho à minha mãe (in memoriam) que com sua simplicidade e carinho, me ensinou a lutar pelos meus sonhos.

“Nunca te afaste de teus sonhos, pois, se eles se forem, você continuará vivendo, mas terá deixado de existir.”

Charles Chaplin.

RESUMO

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) têm recebido muita atenção nas últimas quatro décadas, devido à crescente utilização para atender as exigências das legislações governamentais no controle de níveis de radiação eletromagnética espúria emitida por equipamentos eletrônicos, das normas industriais de compatibilidade e interferência eletromagnética, envolvendo basicamente as indústrias de equipamentos eletrônicos e telecomunicações, bem como a demanda da sociedade na confiabilidade nos equipamentos eletrônicos. O presente trabalho tem como objetivo estudar a produção e a caracterização de MARE na faixa de frequências compreendida entre 8,2 – 12,4 GHz, baseados em papel celulósico impregnado com negro de fumo e matriz tipo poliuretano, aplicado por meio de pistola de pintura. Seis diferentes condições de impregnação foram estudadas, variando distância de aplicação e número de demãos (uma em cada lado do papel celulósico): 25 cm – 2 demãos, 25 cm – 4 demãos, 30 cm – 2 demãos, 30 cm – 4 demãos, 40 cm -2 demãos e 40 cm – 4 demãos. Os resultados médios obtidos da caracterização eletromagnética dos seis lotes, via medição dos parâmetros S (S_{11}/S_{22} – Energia refletida, E_r e S_{12}/S_{21} – Energia transmitida, E_t) e cálculo da energia absorvida (E_a), mostram que para os lotes com duas demãos, quanto maior a distância de aplicação, menores são os valores de E_r e E_a e maior é a E_t , uma vez que a gramatura do MARE diminui. Para os lotes com quatro demãos, quanto maior a distância de aplicação, menor é a E_r e maior a E_t . Entretanto, o parâmetro E_a para o lote com quatro demãos não se comporta como o lote com duas demãos, pois entre as distâncias de aplicação 25 cm e 30 cm é observada a queda de E_a , mas com a distância de aplicação 40 cm o valor de E_a aumenta, pois a onda eletromagnética consegue penetrar mais efetivamente no material, ou seja, há uma determinada concentração de centros absorvedores no substrato que permite maior interação do material com a onda eletromagnética. A partir dos valores de E_a , E_r e E_t foram selecionados 3 condições de impregnação para montagem de um MARE baseado em 8 tubos de celulose montados lado a lado formando um quadrado, sendo cada tubo com dimensões de 50 cm de comprimento e diâmetro de 7,6 cm, dobrados ao meio para promover múltiplas reflexões do sinal e assim aumentar a atenuação do sinal. As condições de impregnação foram escolhidas a partir da análise dos resultados dos seis lotes com base no menor valor de energia refletida e maior energia absorvida, na

seguinte ordem crescente: 25 cm – 4 demãos, 25 cm – 2 demãos e 40 cm – 2 demãos. Os resultados de refletividade no arco NRL mostram que a maior atenuação é obtida no lote com menor valor de energia refletida (40 cm – 2 demãos, -8,20 dB/84,8% em média) e a menor atenuação no lote com maior valor de energia refletida (-2,84 dB/48,0%). Estes resultados demonstram que para um MARE baseado em múltiplas reflexões possuir alta eficiência de absorção de energia, o mesmo deve possuir baixos valores de energia refletida, pois a onda eletromagnética deve ter capacidade de penetrar na estrutura do material, fazendo com que a reflexão seja diminuída.

Palavras-chave: Materiais absorvedores de radiação eletromagnética, negro de fumo, papel celulósico, banda X.

ABSTRACT

The electromagnetic absorbers has been receiving a lot of attention in the last four decades, due to their growing use in order to attend the demands of governmental control laws of electromagnetic radiation spurious levels emitted by electronic devices, industrial standards of electromagnetic compatibility (EMC) and electromagnetic interference (EMI), basically involving electronic and telecommunication industries, as well the demand of the society on the reliability of electronic equipments. The aim of the present work is to study the production and characterization of electromagnetic absorbers in the frequency range of 8,2 – 12,4 GHz, based on cellulose paper impregnated with carbon black and poliuretanic matrix, applied with spray gun. Six different conditions of impregnation were studied by varying the application distance and number of coats (one coat on each paper side): 25 cm – 2 coats, 25 cm – 4 coats, 30 cm – 2 coats, 30 cm – 4 coats, 40 cm - coats and 40 cm – 4 coats. The results of scattering parameters (S_{11}/S_{22} – reflected energy, E_r and S_{12}/S_{21} – transmitted energy, E_t) and calculated absorbed energy (E_a) for the six conditions showed that the conditions with two coats, the larger coat application distance, the smaller are the values of E_r and E_a and the larger is E_t , due to the decrease of paper gramature. The conditions with four coats, the larger coat application distance, the smaller is the value of E_r and larger is the E_t . However, the values of E_a for the condition with four coats has different behavior when compared with the condition with two coats, because between application distances of 25 cm and 30 cm is observed the decrease of E_a values, but with the application distance of 40 cm the E_a value increases, because the electromagnetic wave can penetrate more effectively in the material bulk, or be, there is a concentration of absorbers centers inside the material that allows a stronger interaction with the electromagnetic wave. Based on the values of E_a , E_r and E_t for the six conditions, were selected three conditions to assemble an electromagnetic absorber based on eight cellulose tubes, places side by side in order to form a square, with each tube with dimensions of 50 cm length and 7,6 cm diameter, bended in the middle portion to promote multiple reflections of electromagnetic wave in order to increase the signal attenuation. The conditions of tubes impregnation were chosen by the analysis of the six conditions results, based on the smaller value of E_r and the larger value of E_a : 25 cm – 4 coats, 25 cm – 2 coats e 40 cm – 2 coats. The reflectivity results of NRL arch shows that

the larger attenuation is observed with the condition that present the smaller reflected energy (40 cm – 2 coats, -8,20 dB/84,8%) and the smaller attenuation in the lot with the larger value of reflected energy (-2,84 dB/48,0%). These results shows that for an electromagnetic absorber based on multiple reflections possess high efficiency of energy absorption, the material must possess lower values of reflected energy, because the electromagnetic wave must have the capacity to penetrate in the bulk of the material, decreasing the reflection.

Key-words: Electromagnetic absorbers, carbon black, cellulose paper, X band.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Considerações Iniciais	23
1.2 Justificativa e Objetivos	28
1.3 Organização da Dissertação	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1 Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética	32
2.1.1 Ressonância em materiais com perdas dielétricas	34
2.1.2 Ressonância em materiais com perdas magnéticas	36
2.2 Materiais utilizados no processamento de MARE dielétrico	39
2.2.1 Negro de fumo	39
2.2.2 Matriz polimérica	40
2.3 Câmara Anecóica	41
2.3.1 MARE na forma de tubos dielétricos	44
2.4 Métodos de caracterização eletromagnética	45
2.4.1 Guia de onda	46
2.4.2 Arco NRL	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 Materiais	50

3.1.1 Resina tipo poliuretano	50
3.1.2 Negro de fumo	52
3.1.3 Papel celulósico	52
3.1.4 Pistola de pintura	52
3.1.5 Compressor de ar	53
3.1.6 Caracterização eletromagnética	53
3.2 Métodos Experimentais	54
3.2.1 Projeto e montagem do sistema de pintura	54
3.2.2 Determinação das distâncias de aplicação e número de demãos	56
3.2.3 Critérios de seleção da condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para os tubos	57
3.2.4 Montagem dos tubos	58
3.2.5 Caracterização eletromagnética	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1 Ganho de massa do papel celulósico com aplicação de negro de fumo	64
4.2 Parâmetros S	65
4.2.1 Papel celulósico puro	66
4.2.2 Aplicação de uma e duas demãos a 25 cm de distância	70
4.2.3 Aplicação de uma e duas demãos a 30 cm de distância	78
4.2.4 Aplicação de uma e duas demãos a 40 cm de distância	86
4.2.5 Tendências observadas dos parâmetros S e energia absorvida	94
4.3 Seleção da condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para os tubos	96

4.4 Refletividade dos lotes de tubos – Arco NRL	98
5 CONCLUSÕES	101
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fotografia de um veículo no interior de uma câmara anecóica para testes de compatibilidade eletromagnética [ETS LINDGREN, 2005]	25
Figura 1.2. Fotografia de uma aeronave em um campo de testes de compatibilidade eletromagnética [NOHARA, 2005]	25
Figura 1.3. Aeronaves americanas com baixa detecção ao radar. (a) F-117. (b) B-2 americana [DORNHEIM, 1990; STONIER, 1991]	26
Figura 1.4. Embarcações marítimas com baixa detecção ao radar. (a) <i>Sea Shadow</i> americano [US NAVY, 2005]. (b) Corveta Visby sueca [SWEDISH NAVY, 2005]	26
Figura 1.5. Fotografia de um carro de combate obtida por radar de imageamento em 30 GHz. (a) sem recobrimento MARE. (b) com recobrimento MARE [SAAB, 2005]	27
Figura 2.1. Mecanismo de conversão da energia da onda eletromagnética em calor (efeito Joule), devido à polarização dos centros de absorção (dipolo elétrico) [MIKHAILOVSKY, 1999]	35
Figura 2.2. Perfil típico dos valores bicomplexos da permissividade em função da frequência na região de ressonância para um material absorvedor de microondas com perdas dielétricas [MIKHAILOVSKY, 1999]	35
Figura 2.3. Variação da permissividade do negro de fumo em função da frequência [DIAS, 2000]	36
Figura 2.4. Perfil dos valores bicomplexos de permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ) em função da frequência para uma ferrita de microondas [NOHARA, 2003]	37
Figura 2.5. Variação de ϵ_r e de μ_r de uma ferrita típica com a frequência [DIAS, 2000]..	38
Figura 2.6. Câmara anecóica para operação na faixa de frequências de 28 MHz a 2 GHz [LEHMAN, 2003]	42

Figura 2.7. Objetos em estudo no interior de câmaras anecóicas para avaliação de compatibilidade eletromagnética [LEHMAN, 2003; HYFRAL, 2003, FRANKONIA, 2003; SIEPEL, 2003]	43
Figura 2.8. Arquitetura do absorvedor de radiação eletromagnética na forma de tubos [NOHARA, 2001]	44
Figura 2.9. Esquema geral dos possíveis caminhos da energia da onda eletromagnética incidente sobre um determinado material (■). E_i – Energia incidente, E_a – Energia absorvida, E_t – Energia transmitida, E_r – Energia refletida, E_d – Energia dissipada devido à atenuação do espaço livre	46
Figura 2.10. Esquema do dispositivo utilizado no método de guia de onda. E_i – Energia incidente, E_r – Energia refletida, E_t – Energia transmitida, E_a – Energia absorvida pelo material	47
Figura 2.11. Arco NRL clássico [KNOTT, 1985]	48
Figura 3.1 Fluxograma geral da seqüência de atividades realizadas no presente trabalho	51
Figura 3.2 Pistola de pintura marca DeVILBISS, equipada com manômetro.	52
Figura 3.3 Compressor de ar SCHULZ	53
Figura 3.4 Sistema de pintura para impregnação do papel celulósico com o sistema poliuretano/negro de fumo	55
Figura 3.5 Utilização do sistema de pintura de aplicação de negro de fumo/poliuretano no papel celulósico por um operador	56
Figura 3.6 Tubo de papel celulósico puro (à esquerda), tubo de papel celulósico impregnado com poliuretano/negro de fumo (meio) e tubo de papel com poliuretano/negro de fumo com anel de PVC e dobrado ao meio (diâmetro = 7,6 cm)	58

Figura 3.7 Tubo de papel celulósico impregnado com negro de fumo/poliuretano com comprimento total de 50 cm, dobrado ao meio e com anel de PVC na extremidade (tubo na posição vertical – à esquerda e posição horizontal – à direita)	59
Figura 3.8 Esquema e dimensões da montagem dos oito tubos de papel celulósico impregnado com negro de fumo/poliuretano	60
Figura 3.9 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 [PEREIRA, 2007]	61
Figura 3.10 Esquema do arco NRL utilizado para as medidas de refletividade alocado no CTA [SILVA, 2000]	62
Figura 3.11 Vistas do arco NRL montado no CTA, com vista geral à esquerda e local de colocação do material em estudo à direita	63
Figura 4.1 Gramatura dos lotes de papel celulósico impregnado com negro de fumo	65
Figura 4.2 Curvas dos parâmetros S_{12} e S_{21} (energia transmitida) do papel celulósico puro	66
Figura 4.3 Curvas dos parâmetros S_{11} e S_{22} (energia refletida) do papel celulósico puro	68
Figura 4.4 Curva de energia absorvida do papel celulósico puro	69
Figura 4.5 Balanço de energia para o papel celulósico puro (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz)	70
Figura 4.6 Curvas de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 2 demãos)	71
Figura 4.7 Curva de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 4 demãos)	71

Figura 4.8 Curva de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 2 demãos)	74
Figura 4.9 Curva de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 4 demãos)	74
Figura 4.10 Curva dos valores calculados de energia absorvida para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos	76
Figura 4.11 Balanço de energia para os lotes (a) 25 cm – 2 demãos e (b) 25 cm – 4 demãos (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz).....	78
Figura 4.12 Curva de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm - 2 demãos)	79
Figura 4.13 Curva de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm – 4 demãos)	79
Figura 4.14 Curva de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm - 2 demãos)	82
Figura 4.15 Curva de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm – 4 demãos)	82
Figura 4.16 Curva dos valores calculados de energia absorvida para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos	84
Figura 4.17 Balanço de energia para os lotes (a) 30 cm – 2 demãos e (b) 30 cm – 4 demãos (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz)	85
Figura 4.18 Curva de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm - 2 demãos)	87
Figura 4.19 Curva de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm – 4 demãos)	87
Figura 4.20 Curva de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm - 2 demãos)	89

Figura 4.21 Curva de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm – 4 demãos)	89
Figura 4.22 Curva dos valores calculados de energia absorvida para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos	91
Figura 4.23 Balanço de energia para os lotes (a) 40 cm – 2 demãos e (b) 40 cm – 4 demãos (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz)	93
Figura 4.24 Tendência observada para os parâmetros S dos lotes com 2 demãos: E_r - energia refletida (S_{11}/S_{22}), E_t - energia transmitida (S_{12}/S_{21}) e E_a - energia absorvida	94
Figura 4.25 Tendência observada para os parâmetros S dos lotes com 4 demãos: E_r - energia refletida (S_{11}/S_{22}), E_t - energia transmitida (S_{12}/S_{21})	95
Figura 4.26. Tendência observada para E_a - energia absorvida dos lotes com 4 demãos	96
Figura 4.27 Curvas de refletividade no arco NRL dos lotes dos tubos branco (papel celulósico puro), 25 cm – 4 demãos, 25 cm – 2 demãos e 40 cm – 2 demãos	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Exemplos da utilização do espectro eletromagnético por faixa de frequência regulamentado pela Agência Nacional de Telecomunicações [ANATEL, 2005]	24
Tabela 2.1 Propriedades elétricas típicas de matrizes poliméricas [LEE, 1991]	41
Tabela 2.2. Coeficiente de absorção do MARE do tipo tubo em função da frequência [NOHARA, 2001]	45
Tabela 4.1. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz para o papel celulósico puro	67
Tabela 4.2. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz para o papel celulósico puro	69
Tabela 4.3. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz	73
Tabela 4.4. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB/%) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 2 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz	75
Tabela 4.5. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.....	76
Tabela 4.6. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz	80

Tabela 4.7. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz	83
Tabela 4.8. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz	84
Tabela 4.9. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB/%) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.....	88
Tabela 4.10. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz	90
Tabela 4.11. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 2 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz	92
Tabela 4.12. Lotes escolhidos de condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para a manufatura dos tubos	98

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)
HP	<i>Hewlett Packard</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
MARE	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
NRL	<i>Naval Research Laboratory</i>
PU	Poliuretano
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RCS	<i>Radar Cross Section</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Banda X	Faixa de frequências compreendida entre 8 e 12 GHz
dB	Decibél
E_a	Energia absorvida
E_d	Energia dissipada
E_i	Energia incidente
E_r	Energia refletida
E_t	Energia transmitida
F	Frequência em Hz
GHz	Gigahertz = 1×10^9 Hz
Hz	Hertz
J	Unidade imaginária
KHz	Kilohertz = 1×10^3 Hz
m	Metro
mm	Milímetro
MHz	Megahertz = 1×10^6 Hz
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
tanδ	Tangente de perdas
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 $_ 8,854 \times 10^{-12}$ 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
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 $_ 1,256 \times 10^{-6}$ 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

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A sociedade moderna utiliza o espectro eletromagnético em uma larga faixa de frequências em diversas aplicações, desde kHz até GHz, regulamentada no Brasil pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL. Alguns exemplos de utilização do espectro eletromagnético estão descritos na Tabela 1.1 [ANATEL, 2005].

Devido à crescente utilização do espectro eletromagnético e emissão de ondas eletromagnéticas no meio ambiente, ligada principalmente à área de telecomunicações, surgiu a necessidade de realizar estudos e estabelecimento de normas de compatibilidade e interferência eletromagnética em equipamentos eletrônicos (*EMC - Electromagnetic Compatibility* e *EMI - Electromagnetic Interference*) [LEE, 1991; JOHNSON, 1992]. Esses estudos envolvem a interação de equipamentos/componentes eletrônicos com as ondas eletromagnéticas presentes no meio ambiente externo ou geradas pelo próprio equipamento/componente, uma vez que as ondas eletromagnéticas podem comprometer o funcionamento adequado desses componentes, por exemplo, embarcados em automóveis, navios ou aviões.

As indústrias envolvidas nessa área compreendem equipamentos domésticos, telecomunicações, médico, automobilístico, aeroespacial e militar, uma vez que também existem exigências das legislações governamentais no controle de níveis de radiação eletromagnética emitida por equipamentos eletrônicos, bem como a demanda da sociedade na confiabilidade dos equipamentos eletrônicos. A área de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) está envolvida nesse contexto, uma vez que a resolução dos problemas na área de *EMC/EMI* que necessitam absorver a energia das ondas eletromagnéticas são solucionadas utilizando MARE.

Tabela 1.1. Exemplos da utilização do espectro eletromagnético por faixa de frequência regulamentado pela Agência Nacional de Telecomunicações [ANATEL, 2005].

FAIXA DE FREQUÊNCIA	UTILIZAÇÃO
130-160 kHz	Comunicação marítima
535-1625 kHz	Rádiodifusão
30 MHz – 300 MHz	Televisão, Rádiodifusão
400 MHz	Telefone sem fio doméstico
824 - 895 MHz	Telefonia celular
1,2 – 1,5 GHz	Sistema de Posicionamento Global (<i>GPS</i>)
2,45 GHz	Forno de microondas doméstico
2,7 – 2,9 GHz	Radares meteorológicos
3,0 – 3,5 GHz	Radares de aeroportos
2,4 – 5,0 GHz	Tecnologia sem fio " <i>Bluetooth</i> "
3,5 – 4,0 GHz	Internet por rádio
8,0 – 12 GHz	Radares militares de traqueamento aéreo
30 GHz	Radares de imageamento topográfico

A Figura 1.1 apresenta a fotografia de um automóvel no interior de um ambiente isolado do meio externo com as paredes internas revestidas com MARE, denominado câmara anecóica [ETS LINDGREN, 2005]. No interior da câmara anecóica é emitida uma larga faixa do espectro eletromagnético direcionada ao veículo, enquanto é verificado o seu funcionamento (o automóvel é ligado no interior da câmara) [ETS LINDGREN, 2005]. Ou seja, é checada a compatibilidade eletromagnética dos componentes eletrônicos do automóvel em função do nível de potência e frequência da onda eletromagnética [INPE, 2005]. A torre circular localizada no fundo da câmara à

direita possui uma antena emissora de ondas eletromagnéticas, indicada pela seta amarela (Figura 1.1). A Figura 1.2 apresenta uma aeronave sendo submetida ao mesmo tipo de avaliação em um campo de testes com várias antenas emitindo ondas eletromagnéticas (os cabos na horizontal e diagonal formam as antenas) [NOHARA, 2005].



Figura 1.1. Fotografia de um veículo no interior de uma câmara anecóica para testes de compatibilidade eletromagnética [ETS LINDGREN, 2005].



Figura 1.2. Fotografia de uma aeronave em um campo de testes de compatibilidade eletromagnética [NOHARA, 2005].

No setor militar, exemplos de uso bem sucedido de MARE podem ser encontrados na aeronáutica em estruturas com baixa detecção por sistemas de radar, como a aeronave F-117A e o bombardeiro B-2 (Figura 1.3), ambos da força aérea americana [DORNHEIM, 1990; STONIER, 1991], aeronaves MIG da força aérea russa [NOHARA, 2003] e protótipos franceses [CNES, 2000]. No setor marítimo, alguns países que possuem marinha equipada com embarcações furtivas (navios) são: Reino Unido, Estados Unidos da América, Japão, Suécia, Itália, França, Alemanha, Índia e Rússia (Figura 1.4) [ALEKSEIEV, 2001].

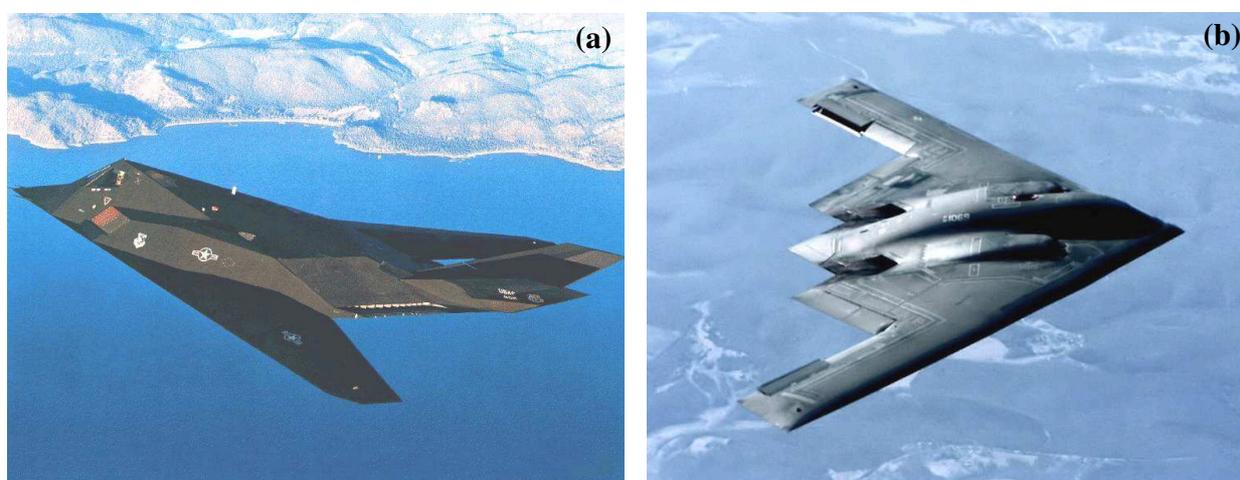


Figura 1.3. Aeronaves americanas com baixa detecção ao radar. (a) F-117. (b) B-2 americana [DORNHEIM, 1990; STONIER, 1991].

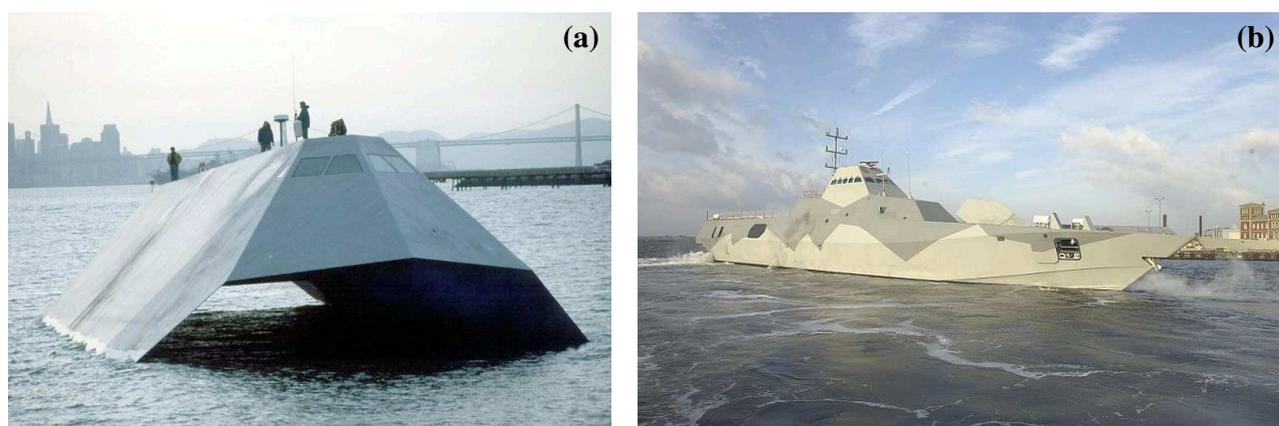


Figura 1.4. Embarcações marítimas com baixa detecção ao radar. (a) *Sea Shadow* americano [US NAVY, 2005]. (b) Corveta Visby sueca [SWEDISH NAVY, 2005].

Os MARE também são incorporados em camuflagens de estruturas em solo, no gerenciamento da assinatura em freqüências de imageamento topográfico por radares aéreo-embarcados e satélites (radares de abertura sintética - *Synthetic Aperture Radar/SAR*) [JOHNSON, 1992]. A Figura 1.5 mostra uma fotografia obtida por radar de imageamento em alta freqüência (30 GHz), de um carro de combate sem e com recobrimento MARE [SAAB, 2005]. O gráfico tridimensional representa os picos relacionados com a reflexão do sinal radar. Este tipo de técnica é muito utilizado por satélites no imageamento topográfico do relevo terrestre em aplicações civis [FREEMAN, 2005].

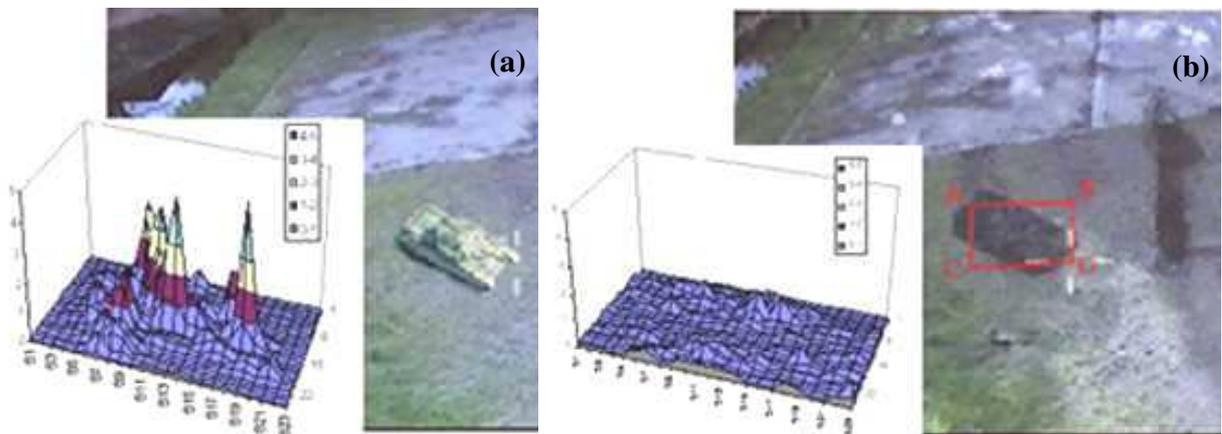


Figura 1.5. Fotografia de um carro de combate obtida por radar de imageamento em 30 GHz. (a) sem recobrimento MARE. (b) com recobrimento MARE [SAAB, 2005].

O desenvolvimento de pesquisas na área de MARE envolve um estudo multidisciplinar, englobando as áreas de química, física, eletrônica, aeronáutica, telecomunicações, entre outras. Alguns parâmetros de estudo na área de MARE envolvem:

- Faixa de freqüências de operação (banda larga ou estreita).
- Nível exigido de absorção.
- Temperatura máxima de estabilidade eletromagnética.

- Resistência ao meio ambiente: ultravioleta, luz solar visível, infravermelho, umidade, chuva, entre outros.
- Resistência a ciclos térmicos.
- Propriedades mecânicas: rigidez, elasticidade, entre outros.
- Efeito do envelhecimento nas propriedades eletromagnéticas e mecânicas e tempo de vida útil.
- Aplicabilidade em estruturas com geometrias simples e complexa .
- Adesão em substratos: ligas de aço, alumínio e materiais compósitos.
- Estabelecimento de metodologias confiáveis para caracterização eletromagnética do MARE.
- Os parâmetros avaliados compreendem basicamente o coeficiente de reflexão, os valores complexos da permeabilidade ($\mu' - j\mu''$), permissividade ($\epsilon' - j\epsilon''$) e tangente de perdas ($\tan \delta$), que determinam suas características de absorção. [MIKHAILOVSKY, 1999].

1.2 Justificativa e Objetivos

O acesso à tecnologia de obtenção de MARE é limitado, por estar intimamente ligado à uma área estratégica, como a de obtenção de estruturas de baixa detecção a radar. As informações hoje existentes em literatura se resumem a conceitos genéricos e de divulgação do potencial de aplicação do material.

Devido às restrições cada vez maiores à exportação de materiais considerados estratégicos, trabalhos de pesquisa e desenvolvimento estão sendo realizados na Universidade de Taubaté, visando a nacionalização de materiais, assim como de processos e a conseqüente autonomia do país na obtenção de produtos e no domínio

de processamento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética de aplicação nas áreas aeronáutica, espacial, telecomunicações e médica. Reconhecendo a importância estratégica no domínio do conhecimento desta área e a necessidade de reforçar as atividades de pesquisa sobre este tema, no âmbito nacional, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

1 - Estudar o processamento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética baseado em papel celulósico impregnado com negro de fumo;

2 - Estudar os parâmetros de impregnação do negro de fumo no papel, via solução de negro de fumo em resina poliuretânica, impregnado via pistola de pintura com ar comprimido.

3 - Avaliar os coeficientes de transmissão, reflexão e absorção do papel impregnado em função da concentração de negro de fumo, via técnica guias de onda e arco NRL na faixa de frequências compreendidas entre 8,2 -12,4 GHz.

4 – Montar estruturas na forma de tubos cilíndricos, com papel celulósico impregnado com negro de fumo, e avaliar seu desempenho no arco NRL, na faixa de frequências compreendidas entre 8,2 -12,4 GHz.

Dentre os benefícios que o presente trabalho trará tanto à indústria brasileira, nas áreas de telecomunicações, médica e automobilística, pode-se destacar:

- A inovação tecnológica na área de processamento de MARE, com propriedades de aplicação para obtenção de câmaras anecóicas, em função da formulação preparada.

- O domínio da fabricação de absorvedores que poderão ser utilizados em

telecomunicações para:

- modificação de diagramas de irradiação de antenas;
 - redução de lóbulos laterais de antenas de médio (diâmetro de 3,6 - 4,5 metros) e grande porte (diâmetros maiores que 4,5 metros);
 - eliminação de correntes de superfície e, conseqüentemente, a reflexão especular em microondas;
 - redução do fator de mérito (Q) de cavidades ressonantes, amplificadores de RF, osciladores, bem como a redução de irradiações internas em caixas metálicas, como por exemplo, LNB's ("*Low Noise Blocks*"), usados em sistemas de recepção de sinais de TV via satélite.
 - fabricação de absorvedores úteis na elaboração de cargas para guias de onda e cabos coaxiais, atenuadores e outros elementos dissipativos, muito utilizados em equipamentos/acessórios de medidas de microondas e antenas.
- os MARE obtidos poderão ser utilizados como proteção de locais próximos às estações rádio-base (ERB's) do sistema celular e torres de telecomunicações que transmitem sinais eletromagnéticos de alta potência ("*up-link*" para transmissão de sinais via satélite), como "*Back Cavity Absorber*" e, também, para a redução dos lóbulos laterais de antenas usadas em radares anti-colisão (uso automobilístico).
 - o domínio da fabricação de absorvedores que poderão ser utilizados na construção de câmaras anecóicas.

O estudo da tecnologia MARE visa criar capacitação de recursos humanos, de grande importância na compra de tecnologias, envolvendo a sua especificação técnica, operação e manutenção, bem como a busca de soluções em problemas de âmbito nacional.

I.3 Organização da Dissertação

A tese está organizada de acordo com os seguintes itens:

- **Revisão Bibliográfica** reúne os conceitos sobre Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética e métodos de caracterização eletromagnética.
- **Materiais e Métodos** são apresentados os materiais, equipamentos e metodologias utilizados nesta dissertação.
- **Resultados e Discussões** apresenta os resultados obtidos da impregnação do papel celulósico com negro de fumo/poliuretano e a caracterização eletromagnética do material obtido via medidas dos parâmetros S, energia absorvida e refletividade no arco NRL.
- **Conclusões** são apresentadas as conclusões deste trabalho.
- **Sugestões para Trabalhos Futuros** reúne sugestões de continuidade do trabalho apresentado nessa tese.
- **Referências Bibliográficas** relaciona a bibliografia pesquisada no presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

A utilização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) teve seu início na Segunda Guerra Mundial, quando foram utilizados pela marinha alemã para proteger submarinos da detecção de radares inimigos. Dessa data, até o momento atual, os MARE têm ampliado o seu uso, podendo-se citar aplicações nas indústrias aeroespacial, de artefatos médicos, de telecomunicações e de eletrodomésticos [LEE, 1991; DIAS, 2000].

Os MARE transformam parcialmente a energia das radiações incidentes em calor, reduzindo a dispersão da radiação em diferentes direções [LEE, 1991; STONIER, 1991; FOLGUERAS, 2005]. Em função da faixa de frequências que o MARE atenua a radiação incidente, podem ser, ainda, divididos em absorvedores de banda larga ou em ressonantes de banda estreita. E, quanto à sua textura final e apresentação, em tintas, espumas, colméias, placas rígidas, mantas flexíveis ou compósitos estruturais absorvedores de radiação [LEE, 1991; LOCK, 1997; MIKHAILOVSKI, 1997; KASANTSEVA, 1997, KASANTSEV, 1997, DIAS, 1998].

Quando uma onda eletromagnética incide em um MARE, as estruturas química e física do material possuem mecanismos internos que convertem a energia da onda eletromagnética em calor [MIKHAILOVSKY, 1999; BALAGEAS, 1998; LEE, 1991; JOHNSON, 1986; EMERSON, 1973; SLEMING, 1998; FOLGUERAS, 2005]. Os MARE são classificados em 2 tipos, de acordo com o tipo de interação com a onda eletromagnética. Os materiais que interagem com o campo elétrico da onda são denominados materiais com perdas dielétricas [NOHARA, 2002; NOHARA, 2000; BISCARO, 2002; FAEZ, 2000; HOURQUEBIE, OLMEDO, 1994; HOURQUEBIE, OLMEDO, JOUSSE, 1997; FAEZ, 2002; FAEZ 2001; EEONYX CORPORATION, 2000;

FOLGUERAS, 2005], e com o campo magnético denominados materiais com perdas magnéticas [DIAS, 2000; NOHARA, 2000; NOHARA, 2003; NOHARA, 2001; LAX, 1962]. Um MARE pode ser obtido pelo uso de centros absorvedores com perdas dielétricas ou magnéticas, ou a combinação de ambos, denominados materiais absorvedores híbridos [NOHARA, 2003; SILVA, 2000].

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 [MIKHAILOVSKY, 1999; BALAEGEAS, 1998]. A absorção da energia eletromagnética está ligada ao fenômeno da ressonância, relacionado com o mecanismo da interação onda/matéria. O termo ressonância é comumente utilizado para denominar a faixa de frequências do espectro eletromagnético, onde o material apresenta a maior absorção da energia da onda eletromagnética [MIKHAILOVSKY, 1999]. Exemplos de uso bem sucedido desses materiais podem ser encontrados na fabricação de artefatos utilizados na área de telecomunicações, como sistemas de cabeamento em controle de ruídos espúrios, controle de interferência de sinais de TV em edifícios, sistemas de vigilância; na indústria de eletro-eletrônicos para a resolução de problemas de compatibilidade e interferência eletromagnética (EMI/EMC), em sistemas de segurança de fornos de microondas; em sistemas inteligentes de camuflagem e, principalmente, na medicina, na manufatura de válvulas especiais para coração, com proteção eletromagnética [LEE, 1991; JOHNSON, 1986; EMERSON, 1973; SLEMING, 1998].

Para cada aplicação há uma série de requisitos de desempenho para um material absorvedor de radiação eletromagnética, que compreende: faixa de frequências de absorção de microondas, nível de absorção, resistência ao meio ambiente (ultravioleta, luz solar, umidade, etc), resistência aos ciclos térmicos, adesão em substratos, textura, elasticidade, rigidez, estabilidade dimensional, tempo de vida

útil, efeito do envelhecimento nas propriedades eletromagnéticas, entre outros [NOHARA, 2003]. Em relação às propriedades eletromagnéticas, os parâmetros avaliados compreendem basicamente o coeficiente de reflexão, transmissão, e os valores bicomplexos da permeabilidade (μ) e permissividade (ϵ) [PEREIRA, 2007; KNOTT, SHAEFFER, TULEY, 1985].

2.1.1 Ressonância em materiais com perdas dielétricas

Em materiais com centros absorvedores dielétricos o mecanismo da absorção da onda eletromagnética é baseado na polarização do centro absorvedor (dipolos elétricos), causada pela interação do campo elétrico com o material, na faixa de frequência de ressonância do centro absorvedor. Este mecanismo pode ser dividido em duas partes. Em um primeiro momento, quando a onda eletromagnética incide em um centro de absorção de um material dielétrico, o campo elétrico provoca a polarização das cargas elétricas presentes no material, conforme esquematizado na Figura 2.1 (a). É importante frisar que nesse momento já ocorre absorção da onda eletromagnética. Em um segundo momento, a polarização do material provoca o surgimento de corrente elétrica - Figura 2.1 (b), dissipando a energia eletromagnética inicial na forma de calor – efeito Joule [MIKHAILOVSKY, 1999; HOURQUEBIE, OLMEDO, 1994].

Assim, a absorção da energia da onda eletromagnética é quantificada por dois parâmetros, um relacionado com o armazenamento e o segundo com a perda. O parâmetro relacionado com as perdas dielétricas (interação com o campo elétrico) é denominado permissividade, caracterizado pelos termos bicomplexos adimensionais ϵ' e ϵ'' ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$). O termo da expressão da permissividade relacionado com o armazenamento é definido como ϵ' (componente real) e o parâmetro relacionado com as perdas como ϵ'' (componente complexa). Os parâmetros bicomplexos da

permissividade também podem ser comparados a um circuito elétrico, onde o termo ϵ' está relacionado a um capacitor – armazenamento da energia, e o termo ϵ'' relacionado com um resistor – gasto de energia [MIKHAILOVSKY, 1999].

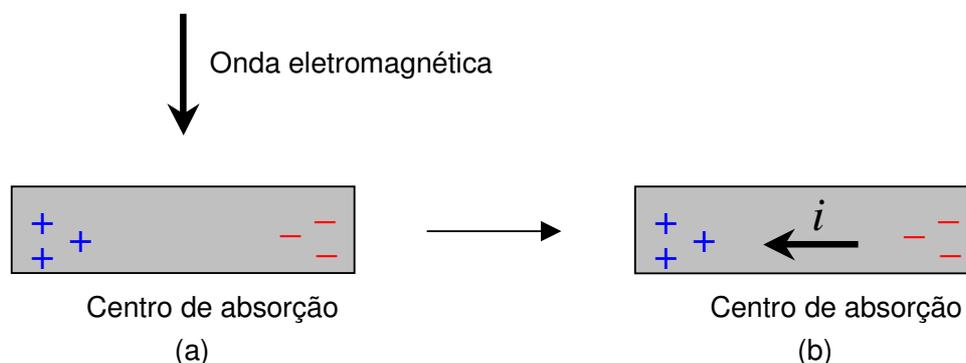


Figura 2.1. Mecanismo de conversão da energia da onda eletromagnética em calor (efeito Joule), devido à polarização dos centros de absorção (dipolo elétrico) [MIKHAILOVSKY, 1999].

Um gráfico típico dos termos bicomplexos da permissividade em função da frequência na região de ressonância, para um material absorvedor dielétrico, apresenta o comportamento relacionado na Figura 2.2. Na região de ressonância do material, onde ocorre a absorção da energia da onda eletromagnética, é observado um pico do valor da componente imaginária da permissividade, relacionado com a perda da energia [MIKHAILOVSKY, 1999].

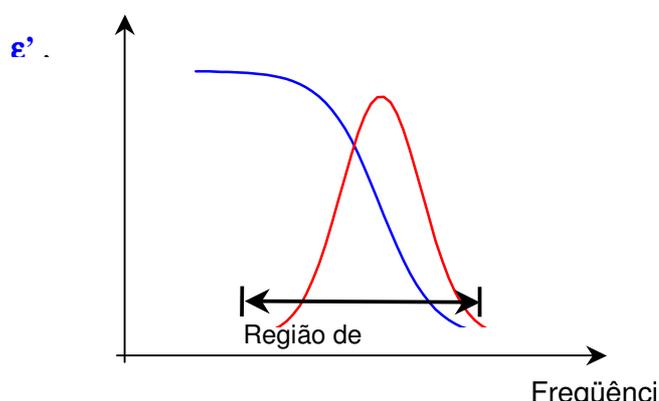


Figura 2.2. Perfil típico dos valores bicomplexos da permissividade em função da frequência na região de ressonância para um material absorvedor de microondas com perdas dielétricas [MIKHAILOVSKY, 1999].

Dentre os aditivos disponíveis comercialmente (negro de fumo e polímeros condutores) na formulação de absorvedores dielétricos, o negro de fumo é um dos mais utilizados [LAIRD TECHNOLOGIES, 2008; EMMERSON & CUMMING, 2008]. A utilização comercial dos polímeros condutores como MARE é relativamente recente (~1994), podendo ser utilizado em conjunto com partículas de negro de fumo [ECONYX CORPORATION, 2007]. A Figura 2.3 mostra a variação das componentes real e imaginária da permissividade (adimensionais) do negro de fumo em função da frequência [DIAS, 2000], evidenciando que o mesmo possui mecanismos internos para dissipação da energia da

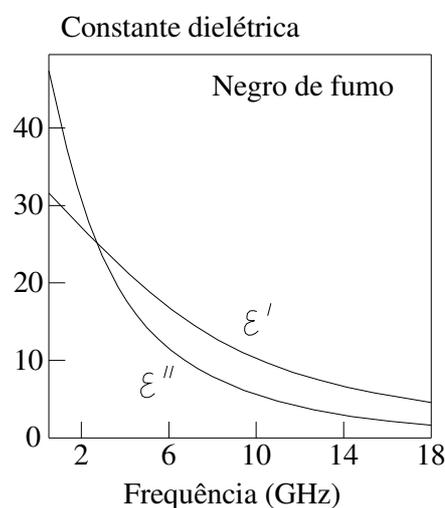


Figura 2.3. Variação da permissividade do negro de fumo em função da frequência [DIAS, 2000].

2.1.2 Ressonância em materiais com perdas magnéticas

Os MARE com perdas magnéticas são baseados em ferritas (material ferrimagnético), apresentando um mecanismo de absorção das ondas eletromagnéticas mais complexo em relação aos materiais dielétricos. As ferritas apresentam perdas magnéticas (dipolos magnéticos) e dielétricos (dipolos elétricos), ou seja, valores de

permeabilidade ($\mu = \mu' - j\mu''$) e permissividade ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) [MIKHAILOVSKY, 1999; DIAS, 2000; LAX, 1962], caracterizados por serem grandezas adimensionais.

A absorção (ressonância) é baseada na interação da onda eletromagnética com os *spins* e elétrons da estrutura da ferrita. A componente magnética da onda eletromagnética interage com os *spins* da ferrita, e a energia é perdida em dois mecanismos gerais: rotação dos *spins*, e transferência da energia cinética da rotação dos *spins* para a rede cristalina. A componente elétrica da onda interage com os dipolos elétricos presentes na estrutura cristalina da ferrita, por mecanismos de polarização [MIKHAILOVSKY, 1999; LAX, 1962].

Devido à série de eventos simultâneos que ocorrem na estrutura da ferrita durante a interação com a onda eletromagnética, armazenamento e perdas dielétricas e magnéticas, não é possível isolar cada um em uma análise dos parâmetros bicomplexos, em função da frequência, devido à sobreposição dos fenômenos. Ao contrário dos materiais absorvedores puramente dielétricos, onde é possível distinguir as curvas de perdas e armazenamento (Figura 2.4), um gráfico relacionando os parâmetros permeabilidade e permissividade em função da frequência usualmente apresenta o comportamento geral descrito na Figura 2.4 [NOHARA, 2003].

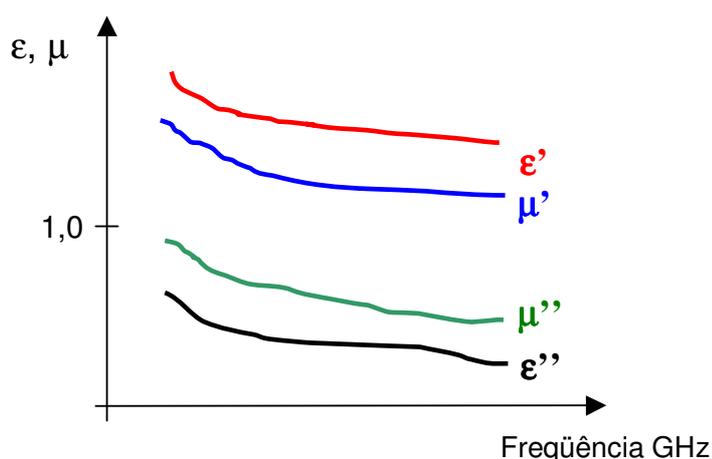


Figura 2.4. Perfil dos valores bicomplexos de permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ) em função da frequência para uma ferrita de microondas [NOHARA, 2003].

Por definição os valores reais de permissividade (ϵ') e permeabilidade (μ') sempre são maiores que 1 [BALANIS, 1989], e um material que possui zero de perda dielétrica apresenta valores dos parâmetros bicomplexos de permissividade $\epsilon' = 1$ e $\epsilon'' = 0$, e um material com zero de perdas magnéticas: $\mu' = 1$ e $\mu'' = 0$ [BALANIS, 1989].

As variações da permissividade relativa ϵ_r e da permeabilidade relativa μ_r de uma ferrita típica são apresentadas na Figura 2.5, a qual mostra que a permissividade permanece praticamente constante em uma larga faixa de frequências. Entretanto, μ_r varia sensivelmente, diminuindo seus valores com o aumento da frequência [DIAS, 2000].

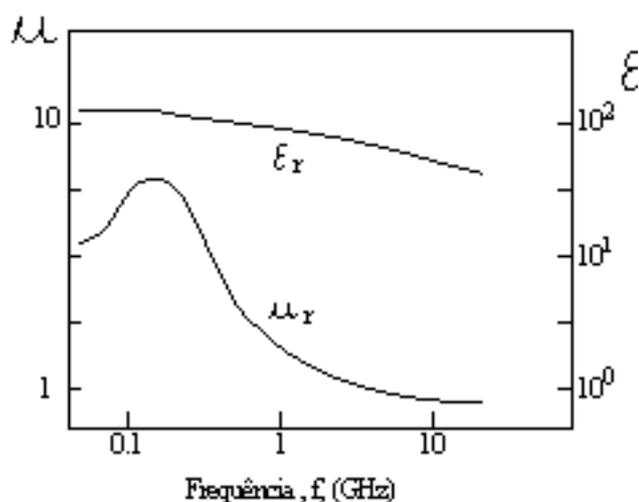


Figura 2.5. Variação de ϵ_r e de μ_r de uma ferrita típica com a frequência [DIAS, 2000].

Uma das desvantagens nos MARE baseados em ferritas é o seu peso final, uma vez que uma ferrita possui massa específica entre 4,5 - 6,5 g/cm³. Para níveis de absorção entre 50% (3,0 dB) a 99,9% (30 dB), um MARE com ferritas, normalmente apresenta uma espessura em torno de 0,1 - 0,5 cm, e gramatura da ordem de ~ 3,0 - 18 kg/m².

2.2 Materiais utilizados no processamento de MARE dielétrico

2.2.1 Negro de Fumo

Atualmente, o negro de fumo (NF) tornou-se um dos aditivos mais aceitos comercialmente no processamento de plásticos condutores e borrachas. Existem, basicamente, quatro tipos de negro de fumo, diferenciados em função do processo de fabricação e propriedades específicas. Em aplicações industriais os mais utilizados são os obtidos pela degradação de compostos orgânicos em forno [CABOT, 1998]. O NF é um material carbonoso da classe dos carbonos poliméricos, apresentando estrutura cristalográfica dos planos basais similar à do grafite e como tal, intrinsecamente semicondutor [CABOT, 1998].

A condutividade elétrica desejada de um material que possui partículas de NF como aditivo é função das propriedades físico-químicas desse aditivo [CABOT, 1998]. A seleção apropriada do tipo de NF condutor a ser utilizado como aditivo no processamento de um MARE é crítica. Pois, isto depende de parâmetros como: a incorporação deste aditivo na matriz polimérica, a condutividade, a permissividade, a processabilidade, a dispersão e o custo [FAZENDA, 1995a; FAZENDA, 1995b; DIAS, 2000].

O fluxo de elétrons em uma matriz polimérica aditada com partículas de negro de fumo é alcançado quando as partículas formam uma rede condutora na massa polimérica. Para isso, as partículas de NF se encontram agregadas, permanecendo em contato ou separadas por distâncias muito pequenas. Esse fenômeno é, em geral, função da área superficial, da estrutura e dos tipos de partículas. A área superficial caracteriza o tamanho da partícula e seu grau de microporosidade [CABOT, 1998]. Altos valores de área superficial levam a um maior número de agregados por unidade de

peso, resultando em distâncias inter-agregados menores, tornando as amostras mais condutoras eletricamente, a uma dada carga. Desse modo, a quantidade de negro de fumo necessária, em peso, para alterar a condutividade elétrica de materiais é, geralmente, pequena [LEE, 1991; CABOT, 1998; LIU, 1995].

Esse tipo de carbono na área de absorvedores de ondas eletromagnéticas é bastante utilizado por suas características físicas, como área superficial, permissividade e condutividade. Essas características permitem a atenuação da radiação incidente por perda da energia eletromagnética como energia calorífica.

2.2.2 Matriz polimérica

A base polimérica no processamento de MARE é utilizada como suporte para as partículas absorvedoras de radiação, por exemplo, as ferritas e o negro de fumo [KASANTSEV, 1997; SCHOEMANN, 2000]. A escolha da matriz polimérica depende do tipo da aplicação, podendo ser epóxi, silicones, poliuretanos (PU), entre outras. Os PU são muito empregados na indústria aeronáutica por possuírem propriedades adequadas a este setor, como maior resistência à erosão, resistência a altas temperaturas de serviço, resistências físico-química e mecânica em gradientes de temperatura na faixa de -70° C a 150° C. E quando aditados com ferritas e negro de fumo, há a possibilidade de atuarem como materiais absorvedores de radiação eletromagnética em determinadas faixas de frequências [LEE, 1991; UFIMTSEV, 1996; INUI, KONISKI, ODA, 1999; AIYAR, 1999]. A Tabela 2.1 mostra algumas propriedades típicas de matrizes poliméricas empregadas no setor aeroespacial [LEE, 1991].

Tabela 2.1 Propriedades elétricas típicas de matrizes poliméricas [LEE, 1991].

Matriz Polimérica	Constante Dielétrica, ϵ'/ϵ_0^*	Fator de Perda, $\tan \delta$
Resinas utilizadas em compósitos convencionais		
Poliéster	2,7- 3,2	0,005-0,020
Epóxi	3,0-3,4	0,010-0,030
Cianoéster	2,7-3,2	0,004-0,010
Polímeros utilizados em compósitos para altas temperaturas		
Fenólicas	3,1-3,5	0,030-0,037
Polímidas	2,7-3,2	0,005-0,008
Silicone	2,8-2,9	0,002-0,006
Poliéterimida(PEI)	3,1	0,004
Polímeros utilizados em compósitos termoplásticos		
Policarbonato (LEXAN®) (G.E.)	2,5	0,0006
Polipropileno (NORYL®) (G.E.)	2,6	0,0009
Polisulfona	3,1	0,003
Poliétersulfona	3,5	0,003
Polisulfeto de fenileno	3,0	0,002
Poliuretano (PU)	2,0	0,002
Teflon® (Du Pont)	2,1	0,0004

Dados para freqüências de 10 GHz a 20°C, ϵ_0^* é a constante dielétrica no vácuo, ϵ' é a componente real.

2.3 Câmara Anecóica

A avaliação das propriedades eletromagnéticas dos materiais, tais como refletividade e a absorção de ondas eletromagnéticas, deve ser realizada em um meio ambiente livre de interferências eletromagnéticas externas, de modo que forneça

resultados confiáveis das propriedades medidas. O meio ambiente desenvolvido com este objetivo é a câmara anecóica.

Uma câmara anecóica tem por finalidade simular um ambiente de teste equivalente ao espaço livre, imune a reflexões, de modo a assegurar a uniformidade em amplitude e fase do sinal incidente na região que contém o dispositivo em teste [MIACCI, 1999]. Para tanto, as câmaras anecóicas são construídas com paredes metálicas para blindagem externa, e revestidas em seu interior por absorvedores de ondas eletromagnéticas com características de absorção específicas para a frequência ou faixa de frequências de interesse [LEHMAN, 2003; SIEPEL, 2003].

Os absorvedores são posicionados nas paredes, teto e chão (se necessário), e convertem a energia eletromagnética em calor, reduzindo, assim, as reflexões indesejáveis (ecos) no interior da câmara. Uma câmara anecóica blindada é mostrada na Figura 2.6, para operação na faixa de frequências compreendida entre 28 MHz e 2 GHz, com atenuação do sinal no interior da câmara de 100 dB (99,9999999 %) [LEHMAN, 2008]. Há no mercado câmaras anecóicas com faixa de frequências mais ampla, de 28 MHz - 40 GHz.



Figura 2.6. Câmara anecóica para operação na faixa de frequências de 28 MHz a 2 GHz [LEHMAN, 2008].

Câmaras anecóicas de grande porte também são utilizadas para estudos de compatibilidade e interferência eletromagnética (*EMI/EMC – Electromagnetic Interference/Electromagnetic Compatibility*), coeficiente de reflexão (E_r), entre outros, de objetos reais de grande escala, como automóveis, helicópteros, satélites e aviões (Figura 2.7).

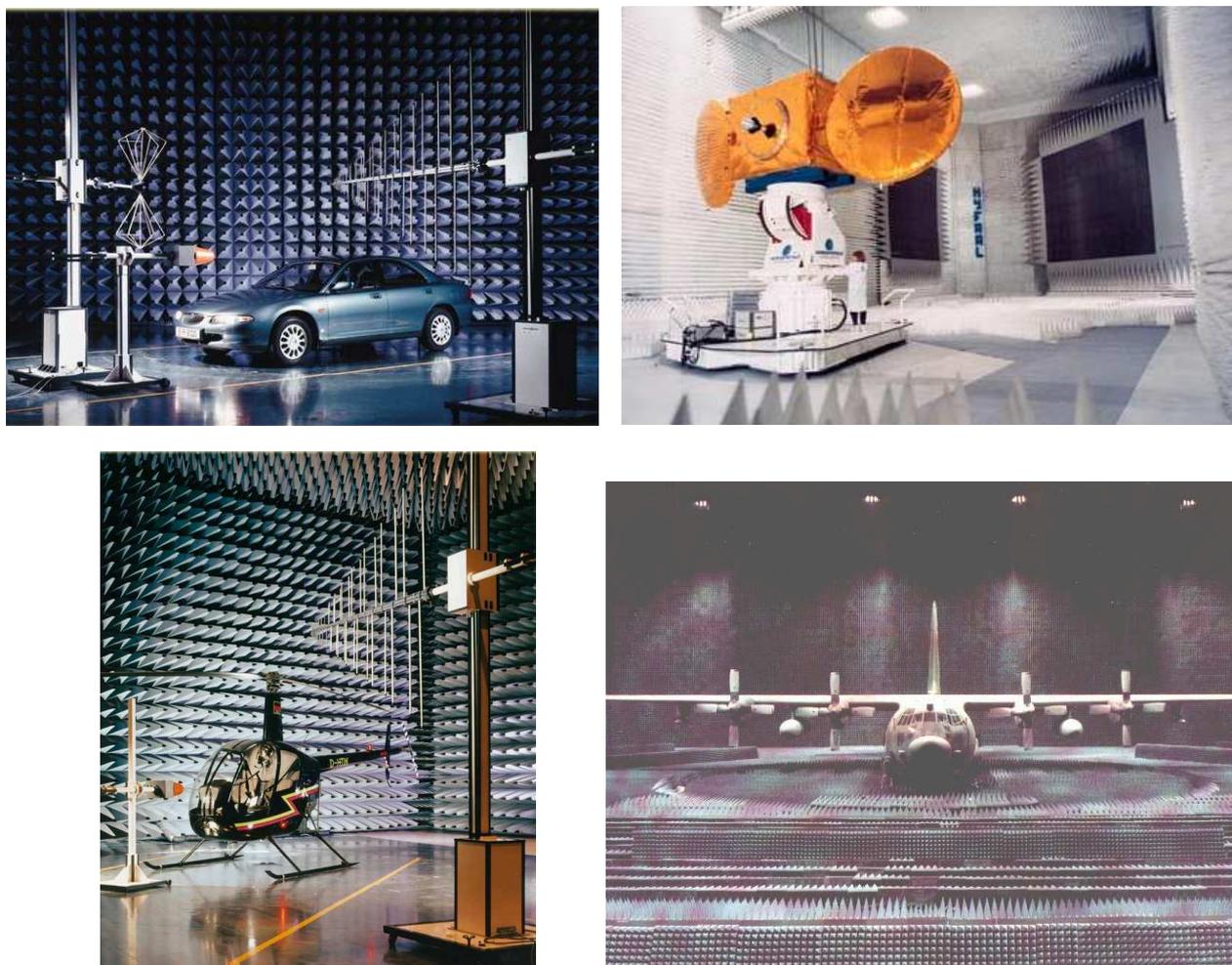


Figura 2.7. Objetos em estudo no interior de câmaras anecóicas para avaliação de compatibilidade eletromagnética [LEHMAN, 2008; HYFRAL, 2003, FRANKONIA, 2003; SIEPEL, 2003].

2.3.1 MARE na forma de tubos dielétricos

Os MARE na forma de tubos são utilizados no recobrimento de paredes, chão e teto de câmaras anecóicas e consistem em papel impregnado com material condutivo (negro de fumo), aplicado via banho em solução ou spray. A Figura 2.8 mostra um tipo de configuração dos absorvedores baseados em tubos, com altura máxima dos tubos de 1,10 metros, sendo que a colagem da base dos blocos nas paredes é realizado com a utilização de colas adesivas [NOHARA, 2001]. Pode-se observar pela Figura 2.8 que os tubos não possuem um comprimento uniforme, variando de 0,4 m – 1,1 m, com diâmetro do tubo igual a 3 polegadas. Este tipo de construção, na forma de tubos, é feito para que a onda eletromagnética incidente sofra múltiplas reflexões com a estrutura dos tubos, fazendo com que em cada reflexão a energia da onda eletromagnética incidente seja absorvida. A razão dos tubos possuírem comprimentos variados é para obter uma resposta de absorção em diversos ângulos de incidência da onda eletromagnética, situação típica e exigida em ambientes anecóicos ou semi-anecóicos.

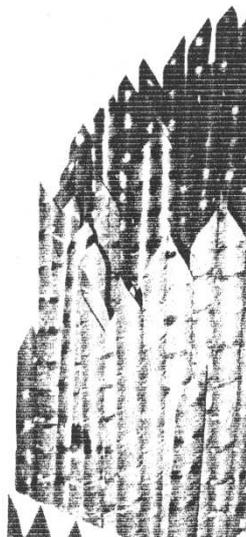


Figura 2.8. Arquitetura do absorvedor de radiação eletromagnética na forma de tubos [NOHARA, 2001].

A massa específica aparente do conjunto de tubos absorvedores (bloco da Figura 2.8) é igual a $0,01 \text{ g/cm}^3$, com gramatura em torno de 12 kg/m^2 . O coeficiente de absorção obtido com esse tipo de configuração está relacionado na Tabela 2.2. Como as folhas condutivas são relativamente baratas e o material final é leve, esse tipo de absorvedor possui um custo menor em relação às espumas de poliuretano.

Tabela 2.2. Coeficiente de absorção do MARE do tipo tubo em função da freqüência [NOHARA, 2001].

Freqüência, GHz	1-2	2-10	10-40
Absorção (dB/%)	-45 / 99,9968	-50 / 99,9990	-50 / 99,9990

2.4 Métodos de caracterização eletromagnética

Os métodos de caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de radiação envolvem fundamentalmente a determinação de 3 variáveis, relacionadas com a interação da onda eletromagnética com o material. De acordo com a equação 2.1, a onda eletromagnética com energia E_i incide no material e a sua energia pode ser totalmente ou parcialmente:

- 1 – refletida, representada por E_r ,
- 2 – atenuada devido ao material, representada por E_a .
- 3 – transmitida, isto é, a energia que passa através da estrutura do material sem ser absorvida ou refletida, representada por E_t , esquematizadas na Figura 2.9.

Outra variável é a atenuação da energia da onda eletromagnética pelo espaço livre, isto é, a energia dissipada no meio ambiente no caminho entre a fonte e o detector da onda eletromagnética, representada por E_d .

$$E_i = E_r + E_t + E_a + E_d \quad (2.1)$$

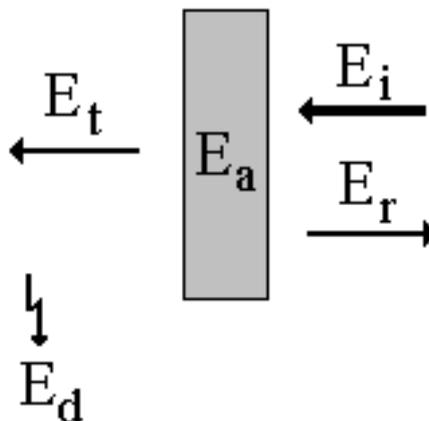


Figura 2.9. Esquema geral dos possíveis caminhos da energia da onda eletromagnética incidente sobre um determinado material (■). E_i – Energia incidente, E_a – Energia absorvida, E_t – Energia transmitida, E_r – Energia refletida, E_d – Energia dissipada devido à atenuação do espaço livre.

2.4.1 Guia de Onda

O método de caracterização eletromagnética utilizando guias de onda permite obter as propriedades descritas na Figura 2.10. O sistema de medidas é basicamente um guia de onda com terminais para o gerador de sinais e o analisador de espectro. A amostra é colocada no interior do guia de onda, e de acordo com a posição do terminal ligado ao analisador de espectro, pode-se determinar a energia refletida (E_r) e transmitida (E_t) pela amostra em estudo (Figura 2.9), obtendo assim, a energia absorvida pelo material (E_a), de acordo com a equação 2.1

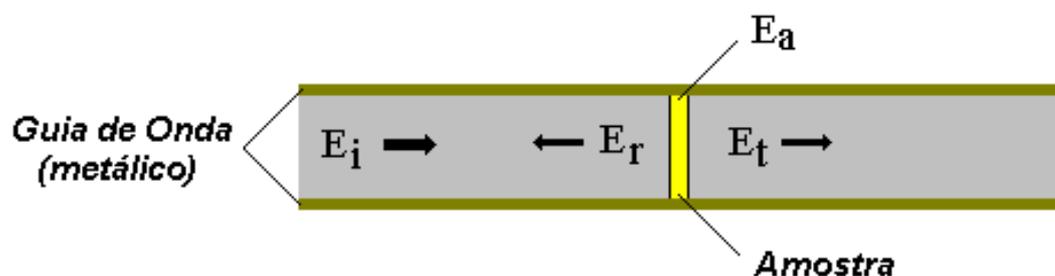


Figura 2.10. Esquema do dispositivo utilizado no método de guia de onda. E_i – Energia incidente, E_r – Energia refletida, E_t – Energia transmitida, E_a – Energia absorvida pelo material.

O tamanho do guia de onda, e conseqüentemente da amostra, é determinado pela faixa de freqüências utilizada para caracterizar o material. Quanto menor a freqüência, maior é a dimensão do guia de onda, uma vez que o comprimento de onda é maior. Na banda X (8,2-12,4 GHz) o tamanho da amostra é reduzido, com dimensões iguais a 23 mm x 10 mm. Nessa metodologia a amostra deve estar com as dimensões exatas do guia de onda (altura e largura), com um encaixe perfeito, sem a presença de vãos entre o material e o guia de onda. Caso contrário, ocorrem erros nas medidas que invalidam o resultado final. Um vão da ordem de milímetros é capaz de introduzir erros de 90% ou mais nas medidas.

2.4.2 Arco NRL

O método do arco NRL (*Naval Research Laboratories*) foi concebido no Laboratório de Pesquisa Naval dos Estados Unidos da América, na década de 50, como um meio de avaliar materiais absorvedores de microondas. O arco consiste, basicamente, de uma estrutura de madeira que permite fixar um par de antenas em uma variedade de ângulos. A antena do tipo corneta, pode ser deslocada ao longo desse

arco. A amostra a ser caracterizada é posicionada sobre um pequeno pedestal no centro da curvatura do arco [KNOTT, 1985].

A estrutura do arco é projetada de modo a manter a corneta apontada para o centro do corpo-de-prova (CDP) em teste, não importando onde a armação é posicionada. O transmissor e o receptor podem ficar próximos, contanto que seja colocado um material absorvedor entre eles, de modo a reduzir as interferências das cornetas transmissora e receptora entre si, devido aos lóbulos laterais de emissão. Para isso, pode-se simplesmente colocar uma placa de MARE entre as antenas. O material em teste é colocado no centro geométrico do arco, conforme a Figura 2.11. Como esquematizado na Figura 2.11, um gerador de sinal com uma saída de amplitude modulada passa por um placa de precisão transmitindo para a corneta, e o sinal refletido capturado pela antenna receptora é transmitido para um detector e a um amplificador, podendo a resposta ser obtida em decibéis [KNOTT, 1985].

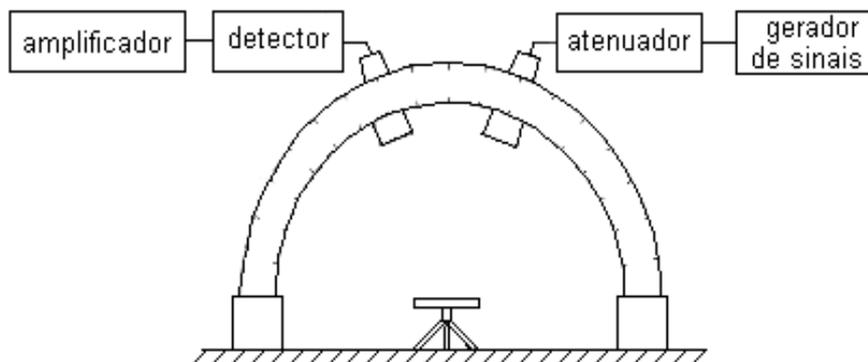


Figura 2.11 Arco NRL clássico [KNOTT, 1985].

De maneira simplificada, o procedimento para a obtenção das medidas de refletividade é o seguinte: inicialmente, a medida de refletividade é feita com uma placa

de metal utilizada como referência e em seguida a amostra em teste é colocada no mesmo local. O desempenho da amostra em teste é obtido pela diferença ponto a ponto, entre a placa de referência e a do material em teste. Se for requerido dados de desempenho em outras freqüências, deve-se ajustar o gerador e repetir as medidas para diferentes faixas de microondas, substituindo adequadamente as cornetas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental consistiu de uma seqüência de atividades, que incluiu a seleção e a preparação das matérias-primas, o desenvolvimento do processo de aplicação do negro de fumo com resina tipo poliuretano no papel celulósico e a caracterização eletromagnética do material obtido.

Foram obtidos lotes de papel celulósico impregnado com negro de fumo e resina tipo poliuretano utilizando pistola de pintura com ar comprimido, com diferentes distâncias de aplicação e número de demãos. A avaliação dos parâmetros S (S_{11} , S_{22} , S_{12} e S_{21}) foi realizada em todos os lotes, e em seguida foram escolhidas três condições de distância de aplicação e número de demãos para confecção dos tubos. Para facilitar a compreensão do texto é apresentado o fluxograma de execução das etapas realizadas no presente trabalho, esquematizado na Fig. 3.1 que também mostra de forma resumida as caracterizações realizadas em cada etapa (destacadas em azul), sendo cada uma descrita nos itens a seguir. As tarefas deste trabalho foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté e na Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial.

3.1 Materiais

Os principais materiais utilizados foram a resina tipo poliuretano (matriz do material absorvedor de radiação eletromagnética), negro de fumo (centro absorvedor), papel celulósico (substrato), ferramentas de trabalho.

3.1.1 Resina tipo poliuretano

A matriz polimérica utilizada para obtenção do revestimento absorvedor de radiação eletromagnética foi do tipo poliuretano, fabricada pela empresa Akzo Nobel Ltda Divisão Tintas Imobiliárias, nome comercial “Verniz Sparlack”, tipo fosco.

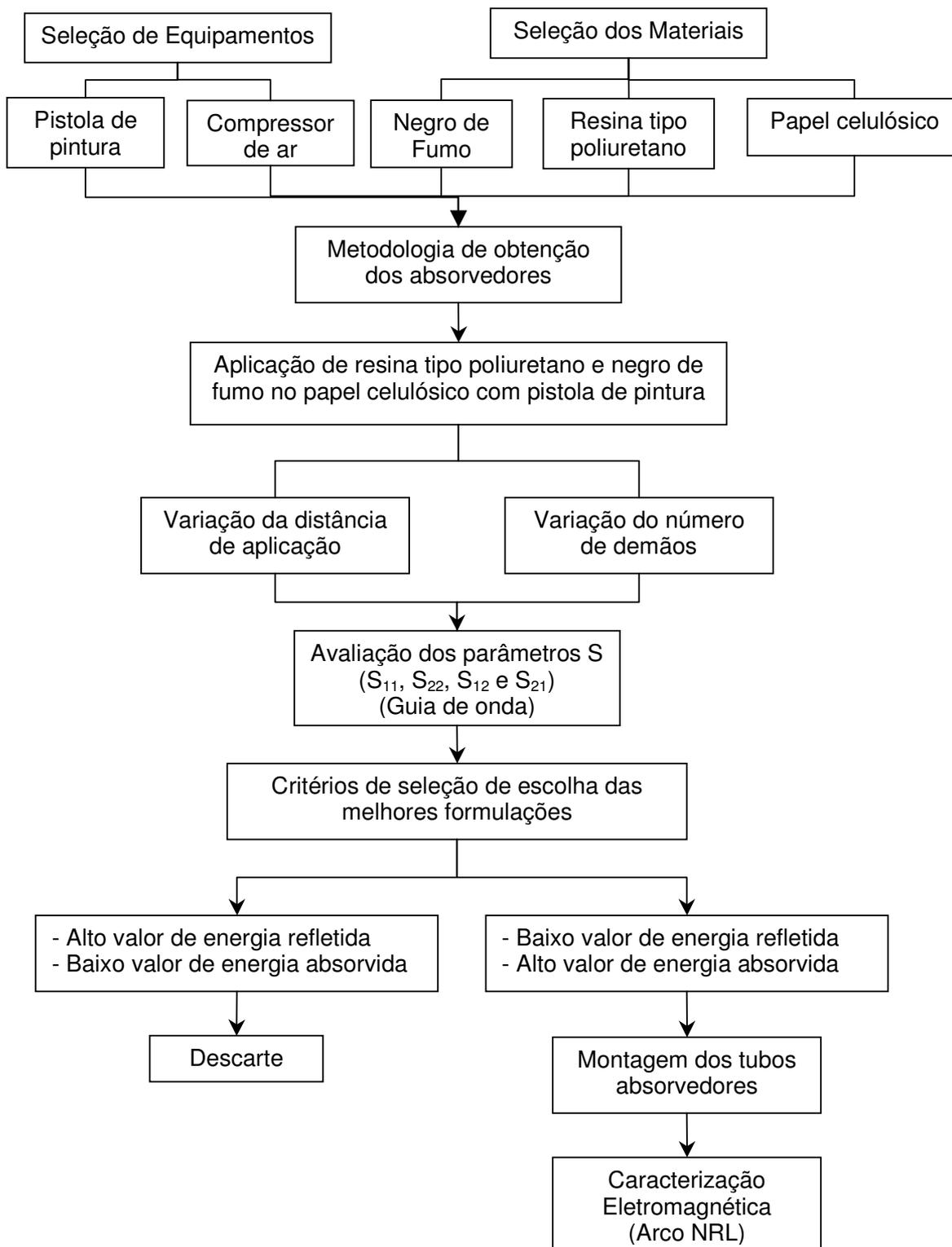


Figura 3.1 Fluxograma geral da seqüência de atividades realizadas no presente trabalho.

3.1.2 Negro de fumo

O negro de fumo utilizado foi adquirido da empresa CABOT, tipo Vulcan XC72R, No. 98246. Este tipo de negro de fumo é indicado, segundo o fabricante, para aplicações que requerem condutividade elétrica, por exemplo, papel condutivo, dispersões líquidas condutivas e como suporte a catalisadores.

3.1.3 Papel celulósico

O papel celulósico utilizado possui gramatura igual a 82 g/m^2 , com espessura de 0,2 mm e dimensões de 50 cm x 50 cm. O papel possui textura poroso, sendo utilizado para processos de filtração na área química.

3.1.4 Pistola de pintura

A pistola de pintura utilizada é da marca DeVILBISS, modelo JGA-503, equipada com manômetro (até 160 psi), apresentada na Figura 3.1.



Figura 3.2 Pistola de pintura marca DeVILBISS, equipada com manômetro.

3.1.5 Compressor de ar

O compressor de ar utilizado é da marca SCHULZ, modelo Classic – Mobile MSL 15 Mas / 100 3 hp, apresentado na Figura 3.2. Esse compressor tem como característica principal a portabilidade, isto é, pode ser transportado facilmente e levado ao local onde é necessário.



Figura 3.3 Compressor de ar SCHULZ.

3.1.6 Caracterização eletromagnética

Os equipamentos utilizados para a caracterização eletromagnética locados na AMR/IAE/CTA (Divisão de materiais do Instituto de aeronáutica e espaço do Comando-geral de tecnologia aeroespacial) estão listados a seguir:

- a) Analisador de redes vetorial tipo 8510C, marca Agilent Technologies;

- b) Cabo Coaxial flexível tipo 85132F, marca Agilent Technologies com conectores de 7 mm (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) Arco NRL;
- f) Gerador de frequências Agilent 83752A;
- g) Analisador de espectro, modelo 70000 (Hewlett Packard).
- h) Guia de onda.

3.2 Métodos experimentais

O trabalho experimental, detalhado a seguir, consistiu das etapas de projeto e montagem do sistema de aplicação da pintura de poliuretano e negro de fumo no papel celulósico, caracterização eletromagnética do material obtido via parâmetros S, montagem do sistema de tubos absorvedores de radiação eletromagnética e sua caracterização eletromagnética via arco NRL.

3.2.1 Projeto e montagem do sistema de pintura

A aplicação do sistema de pintura poliuretano com negro de fumo no papel celulósico foi via pistola de pintura com ar comprimido. Os parâmetros críticos nesse processo envolvem basicamente a pressão utilizada do ar comprimido, distância de aplicação, homogeneidade da solução do sistema de pintura e ambiente de pintura. A Figura 3.3 mostra a fotografia do sistema projetado e montado para impregnação do

papel celulósico com o sistema poliuretano/negro de fumo. Pode-se observar pela Figura 3.3 que a pistola de pintura foi fixada sobre uma placa de madeira horizontal (por meio de parafusos), sendo esta placa montada sobre rodas metálicas e adaptada em um sistema de trilhos. O objetivo é permitir o deslocamento da pistola de pintura fixada no eixo horizontal e com velocidade controlada pelo operador. O papel celulósico pode ser colocado em qualquer distância em relação ao bico da pistola de pintura.



Figura 3.4 Sistema de pintura para impregnação do papel celulósico com o poliuretano/negro de fumo.

A concentração do negro de fumo no verniz poliuretânico foi igual a 5,0 g/L. Esta concentração de negro de fumo permite uma boa homogeneização no verniz poliuretânico, não sendo observado a formação de depósito na solução por tempos de até 24 horas. A utilização de concentração superiores a 5,0 g/L inicia a formação de aglomerados na solução, o que impede a formação de um leque homogêneo durante o processo de aplicação da pintura no papel celulósico, provocando o aparecimento de aglomerados sólidos no papel celulósico. As fotografias da Figura 3.4 mostram uma visão da aplicação do sistema de pintura no papel celulósico por um operador.



Figura 3.5 Utilização do sistema de pintura de aplicação de negro de fumo/poliuretano no papel celulósico por um operador.

3.2.2 Determinação das distâncias de aplicação e número de demãos

Para determinar a distância e número de demãos do sistema de negro de fumo/poliuretano aplicado no papel celulósico, primeiramente foram fixadas duas variáveis: 1) A velocidade de deslocamento horizontal da pistola de pintura no sistema apresentado no item 3.2.1 foi fixada em 2,0 metros por minuto.

2) a pressão utilizada na pistola de pintura foi fixada em 6,0 bar (lida no manômetro da pistola), seguindo indicação de pressão de utilização do manual do fabricante.

A distância de aplicação do sistema de pintura foi determinada em função de duas condições observadas experimentalmente:

1) Ausência de escorrimento após a aplicação da pintura. A utilização de distâncias muito próximas do bico da pistola de pintura para as condições empregadas,

por exemplo, 10 cm, resultam em aplicação excessiva de pintura, provocando o seu escorrimento.

2) Dispersão excessiva do leque de pintura. A utilização de distâncias excessivas em relação ao bico da pistola de pintura faz com que a parte da pintura não atinja o papel celulósico, sendo dispersa no ar.

Baseado nas condições descritas acima, foram escolhidas as distâncias de 25 cm, 30 cm e 40 cm e número de demãos igual a dois ou quatro. Para duas demãos, é aplicada uma demão em cada lado do papel, e para quatro demãos, são aplicadas duas demãos em cada lado do papel. Assim, foram seleccionadas seis condições de aplicação do sistema poliuretano/negro de fumo no papel celulósico:

- a) 25 cm – 2 demãos
- b) 25 cm – 4 demãos
- c) 30 cm – 2 demãos
- d) 30 cm – 4 demãos
- e) 40 cm – 2 demãos
- f) 40 cm – 4 demãos

3.2.3 Critérios de seleção da condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para os tubos

A escolha da formulação para a montagem dos tubos é baseada nos seguintes critérios:

1) A interação da onda eletromagnética com os tubos absorvedores de radiação eletromagnética se dá principalmente por múltiplas reflexões da onda com as paredes dos tubos. Uma vez que a passagem da onda eletromagnética através das paredes de

papel celulósico impregnado com negro de fumo faz com que a energia seja absorvida, é importante que a onda eletromagnética seja capaz de penetrar efetivamente na estrutura do papel celulósico. Assim, é preciso que o papel celulósico impregnado com negro de fumo exiba um baixo valor do coeficiente de reflexão (parâmetros S_{11}/S_{22}).

2) O material deve possuir um alto valor de energia absorvida.

3.2.4 Montagem dos tubos

Os tubos absorvedores de radiação eletromagnética foram montados a partir do papel celulósico impregnado com negro de fumo e poliuretano, com comprimento igual a 50 cm, largura de 25 cm e diâmetro igual a 7,6 cm. A Figura 3.5 mostra uma fotografia de um tubo achatado composto por papel celulósico puro (à esquerda), um tubo achatado com negro de fumo/poliuretano (ao meio) e um tubo dobrado ao meio com suas extremidades com um anel de poli(cloreto de vinila) – PVC (à direita). O anel de PVC possui espessura igual a 2 mm e diâmetro igual a 7,6 cm (2 polegadas).



Figura 3.6 Tubo de papel celulósico puro (à esquerda), tubo de papel celulósico impregnado com poliuretano/negro de fumo (meio) e tubo de papel com poliuretano/negro de fumo com anel de PVC e dobrado ao meio (diâmetro = 7,6 cm).

O anel de PVC tem como objetivo deixar a extremidade do tubo de papel cilíndrica, como mostra em maior aumento a fotografia da Figura 3.6 (vista de um tubo dobrado na posição vertical – à esquerda e horizontal – à direita).

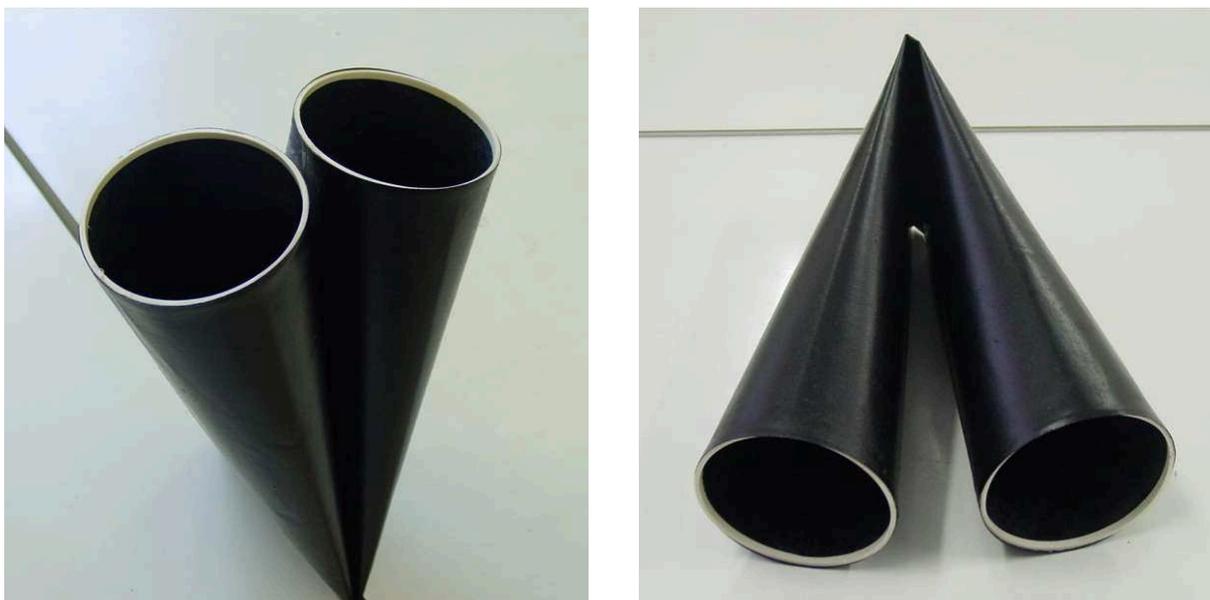


Figura 3.7 Tubo de papel celulósico impregnado com negro de fumo/poliuretano com comprimento total de 50 cm, dobrado ao meio e com anel de PVC na extremidade (tubo na posição vertical – à esquerda e posição horizontal – à direita).

O material absorvedor final é montado a partir de um conjunto de oito tubos, sendo que cada tubo possui a geometria apresentada na Figura 3.6. A Figura 3.7 mostra a geometria e dimensões do conjunto de oito tubos. A montagem dos tubos possui 25 cm de altura e laterais com medida igual a 29 cm e 27 cm.

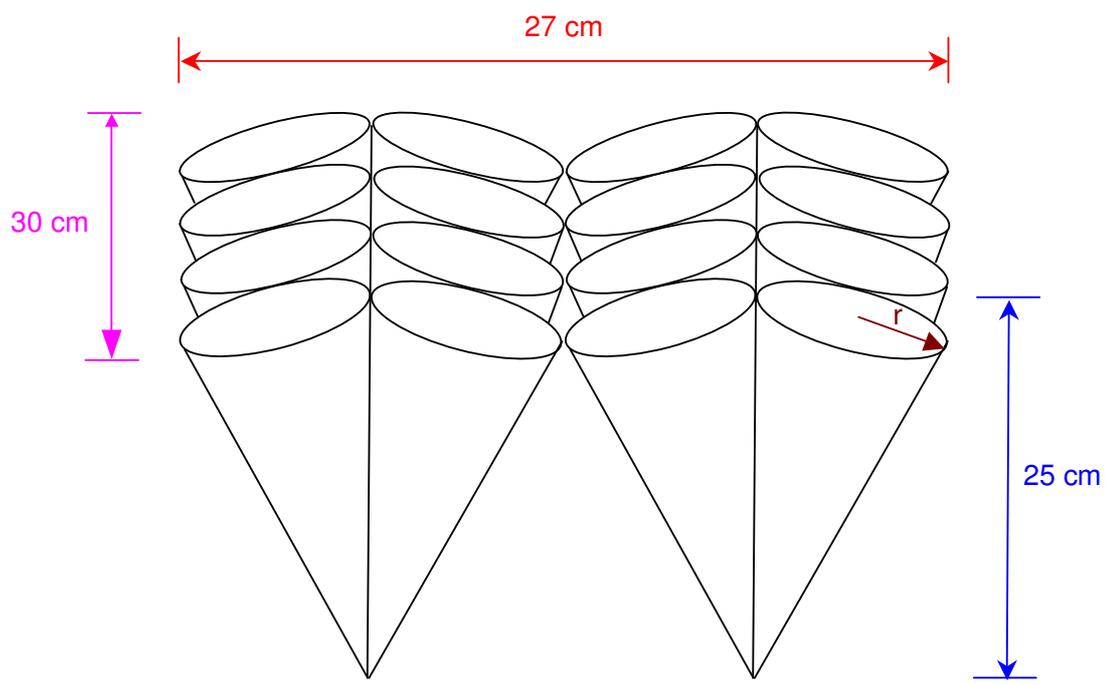


Figura 3.8 Esquema e dimensões da montagem dos oito tubos de papel celulósico impregnado com negro de fumo/poliuretano.

3.2.5 Caracterização eletromagnética

Parâmetros S

Para as medidas dos Parâmetros S (S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22}) é adotada a configuração de medida apresentada na Figura 3.8 (a) no analisador de redes vetorial tipo 8510C, onde o sistema é fechado com o porta-amostra entre o adaptador e a extremidade do trecho de guia de ondas. A Figura 3.8 (b) mostra o encaixe do porta-amostra no guia de onda, bem como o local onde é fixado o corpo-de-prova.

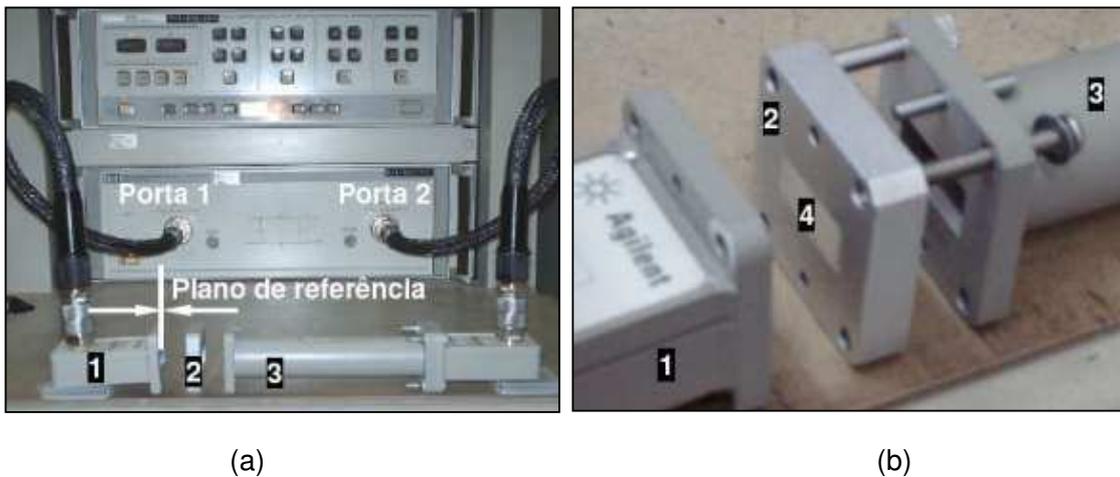


Figura 3.9 Configuração para medidas dos parâmetros S. (a) Vista geral do sistema montado. (b) Vista ampliada do porta-amostra com corpo-de-prova. (1) acoplador da porta 1, (2) porta-amostra, (3) trecho de guia de ondas da porta 2 e (4) corpo-de-prova [PEREIRA, 2007].

O analisador de redes vetorial fornece os dados dos parâmetros S na escala decibel (dB), sendo que os valores em dB podem ser convertidos em % pela equação 3.1.

$$\% = 100 \cdot (1 - 10^{-dB/10}) \quad (3.1)$$

Energia Absorvida

A energia absorvida pelo material pode ser calculada a partir dos valores dos parâmetros S, a partir do balanço de energia. Considera-se a energia incidente (E_i) com valor igual a 100%, a partir do parâmetro S_{11}/S_{22} pode ser determinada a quantidade de energia refletida (E_r) pelo material (em %) e a partir do parâmetro S_{12}/S_{21} pode ser determinada a quantidade de energia transmitida (E_t) através do material (em %). Pelo balanço de energia, pode ser calculada a energia absorvida (E_a) pela equação 3.2.

$$E_i = 100\% = E_r + E_t + E_a \quad (3.2)$$

Arco NRL

Um esquema do arco NRL utilizado no presente trabalho encontra-se esquematizado na Figura 3.9. Uma das antenas, a antena transmissora (à esquerda), está ligada a um gerador de sinais (Agilent 83752A), que envia a onda eletromagnética para o material em estudo, sendo a onda refletida detectada na antena receptora (à direita), ligada ao analisador de espectro. No sistema montado o ângulo mínimo entre a antena receptora e transmissora é igual a 15° . [SILVA, 2000].

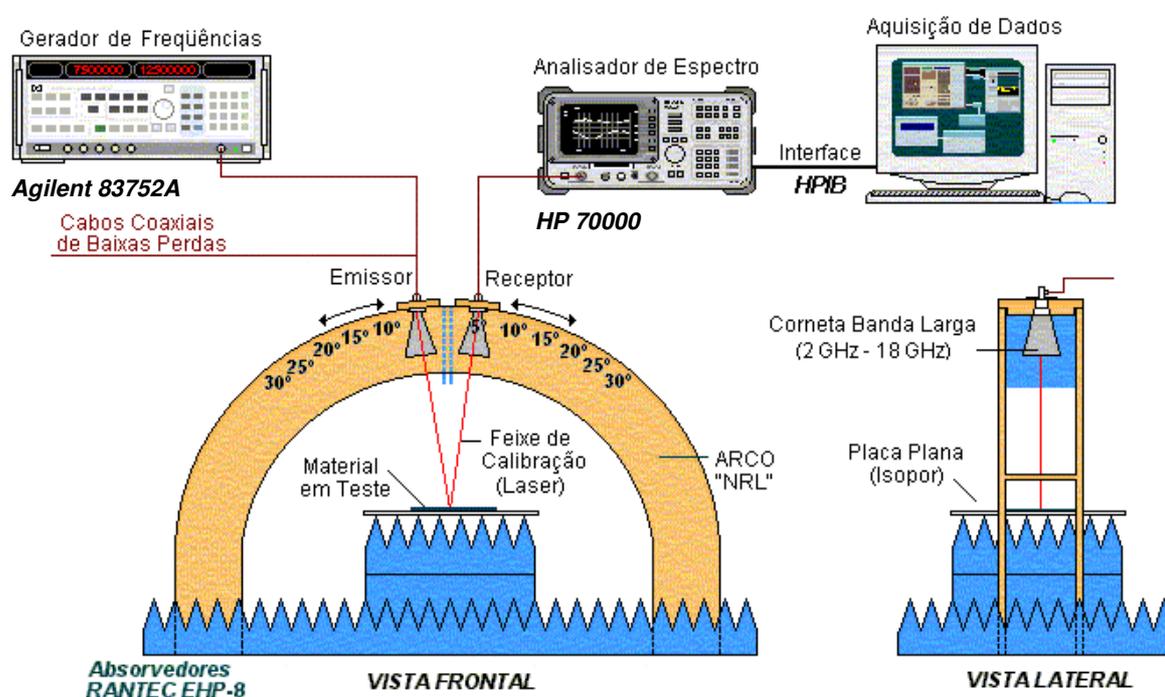


Figura 3.10. Esquema do arco NRL utilizado para as medidas de refletividade alocado no AMR/IAE/CTA [SILVA, 2000].

Para o melhor ajuste das cornetas no arco, utiliza-se duas ponteiros laser, colocadas no centro de cada corneta, o suporte das cornetas é ajustado de maneira com que os feixes da ponteira laser, incidentes na placa em teste, sejam posicionados o

mais próximo possível do centro da placa. A primeira medida obtida é sempre de um material metálico (alumínio) refletor, que será comparado com o sinal gerado pela reflexão do material em teste. Ambos materiais (referência e teste) devem possuir as mesmas dimensões e o valor da leitura é obtido em decibel, dB. A caracterização dos materiais foi realizada com cornetas na faixa de frequências entre 8,2 – 12,4 GHz. A Figura 3.10 traz duas vistas do arco NRL montado no AMR/IAE/CTA, onde a fotografia à esquerda traz uma visão geral e a fotografia à direita uma visão do posicionamento do material em estudo sob o arco, que pode ser no nível do chão (Figura 3.10) ou acima (Figura 3.9). A distância é definida em função da condição de campo distante [MIACCI, 2000].



(a)

(b)

Figura 3.11. Arco NRL montado no AMR/IAE/CTA, com vista geral (a) e o local de colocação do material em estudo (b).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados obtidos do ganho de massa do processo de impregnação do papel celulósico com negro de fumo e valores medidos dos parâmetros S (S_{11} , S_{22} , S_{21} e S_{12}) para os lotes branco (papel celulósico sem negro de fumo), 25 cm – 2 demãos, 25 cm - 4 demãos, 30 cm – 2 demãos, 30 cm – 4 demãos, 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, critérios de seleção da condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para os tubos e valores de reflexão medidos em Arco NRL dos tubos.

4.1 Ganho de massa do papel celulósico com aplicação de negro de fumo

O gráfico da Figura 4.1 apresenta os valores de gramatura (g/m^2) do papel celulósico sem aplicação de poliuretano (branco) e dos lotes obtidos com o processo de impregnação de negro de fumo, aplicado com pistola de pintura. Pode-se observar que o valor da gramatura do branco é o menor de todos, igual a 82 g/m^2 , sendo que os todos os valores de gramatura dos lotes impregnados estão acima do branco, mostrando que o papel ganhou massa durante o processo de impregnação.

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.1 que o lote 25 cm – 2 demãos possui valor de gramatura igual a 140 g/m^2 , isto é, um aumento de 70% em relação ao branco. O lote 25 cm – 4 demãos possui valor de gramatura igual a 183 g/m^2 , 123% acima do branco. Uma comparação entre os lotes 25 cm – 2 demãos, 25 cm – 4 demãos, mostra uma diferença de 30%. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.1 que o lote 30 cm – 2 demãos possui um valor de gramatura igual a 123 g/m^2 , 12% abaixo do valor do lote 25 cm – 2 demãos. Esta diferença deve-se à maior distância de aplicação da tinta, que

foi dispersada no ar e por esse motivo não chegou ao papel. O lote 30 cm – 4 demãos possui um valor de gramatura igual a 161 g/m^2 , 23% acima do lote 30 cm – 2 demãos.

O lote 40 cm – 2 demãos possui um valor de gramatura igual a 113 g/m^2 , e o lote 40 cm – 4 demãos possui um valor igual a 127 g/m^2 , uma diferença de 12%. De todos os lotes de papel com negro de fumo, o lote que possui o maior valor de gramatura é o lote 25 cm – 4 demãos, justificado pela menor distância de aplicação e maior quantidade de demãos, e o lote com menor gramatura foi o lote 40 cm – 2 demãos, pela maior distância de aplicação e menor quantidade de demãos.

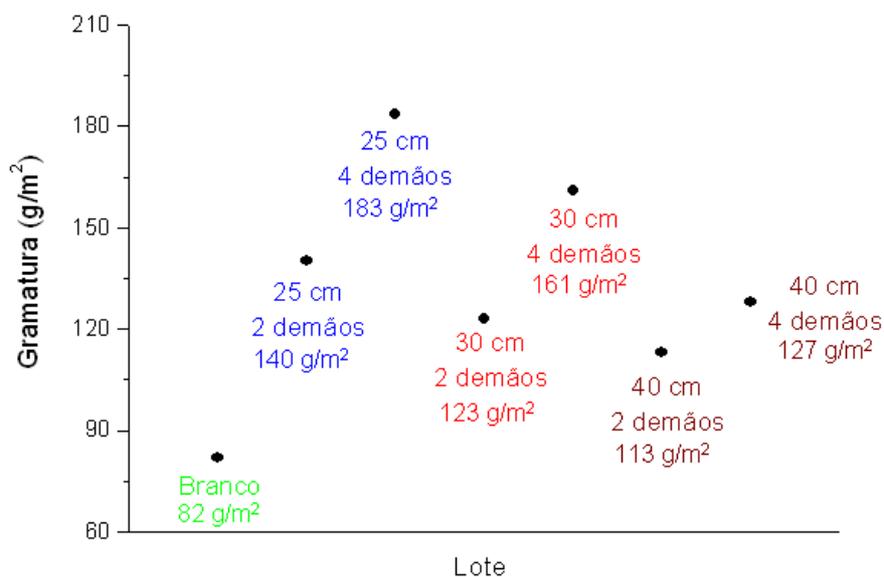


Figura 4.1. Gramatura dos lotes de papel celulósico impregnado com negro de fumo.

4.2 Parâmetros S

A seguir são apresentados e discutidos os valores obtidos dos parâmetros S para os lotes de papel celulósico sem e com aplicação de negro de fumo: 25 cm - 2 demãos, 25 cm – 4 demãos, 30 cm – 2 demãos, 30 cm – 4 demãos, 40 cm – 2 demãos, 40 cm – 4 demãos e branco (papel celulósico sem aplicação de negro de fumo).

4.2.1 Papel celulósico puro

O gráfico da Figura 4.2 mostra as curvas dos parâmetros S_{12} e S_{21} e a curva de referência sendo o ar atmosférico, relacionado com a energia transmitida através do papel celulósico puro. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.1 que as duas curvas possuem valores próximos, uma vez que praticamente se sobrepõem na escala utilizada no eixo Y. As duas curvas possuem um valor máximo de atenuação na frequência igual a 10,5 GHz (-0,14 dB – eixo Y à esquerda / 3,17% - eixo Y à direita) e valor mínimo em 12,4 GHz (-0,04 dB/0,91%). Estes valores demonstram que o papel celulósico possui um caráter transparente, isto é, a maior parte da radiação eletromagnética atravessa pelo material com um baixo valor de atenuação, uma vez que a máxima atenuação observada na frequência de 10,5 GHz equivale a 96,8% (100% - 3,17%) e a mínima em 12,4 GHz é equivalente a 99,0% (100% - 0,91%).

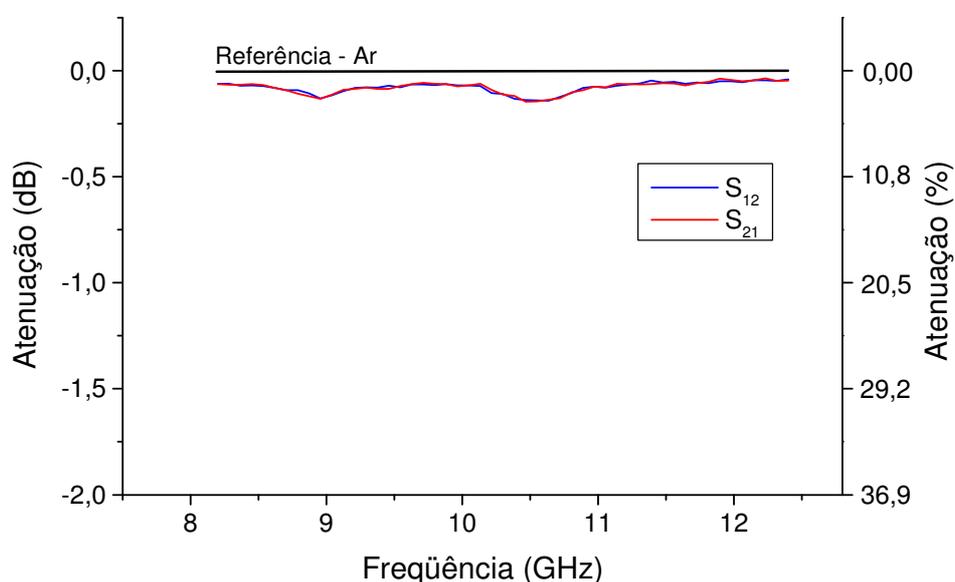


Figura 4.2. Curvas dos parâmetros S_{12} e S_{21} (energia transmitida) do papel celulósico puro.

A Tabela 4.1 mostra os valores médios de atenuação e a integral da área das curvas do gráfico da Figura 4.1, este último calculado até o valor de referência em 0 dB, entre 8,2 a 12,4 GHz. Os valores médios foram calculados pela soma dos 51 pontos da curva, dividido por 51. Pode-se observar pela Tabela 4.1 que o valor médio de atenuação em dB e a integral da área são iguais para os dois parâmetros (com 4 algarismos significativos), mostrando que o material possui o mesmo comportamento independente da porta utilizada na medida no Analisador de Redes Vetorial, isto é, se o sinal incide perpendicularmente à esquerda ou à direita do plano do papel.

Tabela 4.1. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} na faixa de freqüência entre 8,2 e 12,4 GHz para o papel celulósico puro.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB / %)	Integral da área
S_{12}	- 0,078 / 1,78	0,331
S_{21}	- 0,078 / 1,78	0,331

O gráfico da Figura 4.3 mostra as curvas dos parâmetros S_{11} e S_{22} , relacionadas com a energia refletida pelo papel celulósico puro. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.2 que as duas curvas possuem perfis semelhantes, com diferença máxima entre as curvas de 2,0 dB (9,0 GHz) e mínima de 0,0 dB (12,1 GHz). Se a curva medida do material estiver mais próxima da referência em 0 dB, maior é o caráter refletor do material, uma vez que a curva de referência em 0 dB é um material metálico (alumínio). Os valores das curvas S_{11} e S_{22} possuem valor médio de - 32 dB, o que evidencia um

caráter pouco refletor, uma vez que reflete em média cerca de 0,063% (equivalente a atenuação de -32 dB).

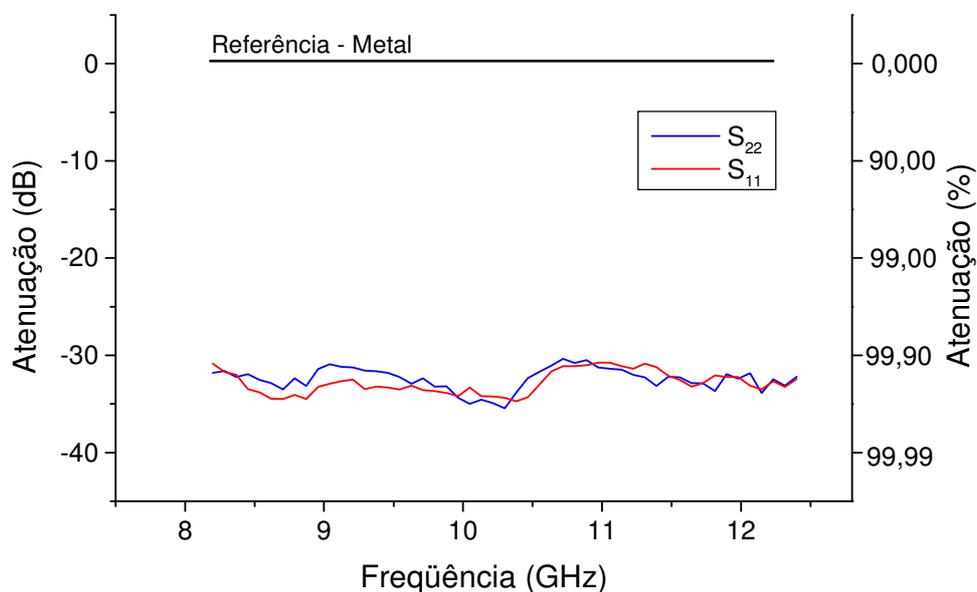


Figura 4.3. Curvas dos parâmetros S_{11} e S_{22} (energia refletida) do papel celulósico puro.

A Tabela 4.2 mostra os valores médios de atenuação e a integral da área das curvas do gráfico da Figura 4.3. Pode-se observar que embora os valores das curvas S_{11} e S_{22} do gráfico da Figura 4.3 tenham diferenças máximas de até 2,0 dB em 9,1 GHz, seus valores médios de atenuação (Tabela 4.2) estão próximos. Os valores obtidos da integral da área também são próximos, com diferença de 1,2%. Os valores calculados da Tabela 4.2 mostram que o material possui valores médios de reflexão similares de acordo com a porta utilizada no Analisador de Redes Vetorial (porta 1 ou 2). Assim, é possível inferir que o comportamento de energia transmitida (Figura 4.2) e refletida (Figura 4.3) pelo papel celulósico puro demonstra que o material possui transmissão e reflexão independente da direção de incidência da onda eletromagnética (incidência perpendicular à esquerda ou à direita em relação ao plano do papel).

Tabela 4.2. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} na faixa de freqüência entre 8,2 e 12,4 GHz para o papel celulósico puro.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB / %)	Integral da área
S_{11}	- 32,81 / 99,94	137,9
S_{22}	- 32,42 / 99,94	136,2

A partir dos valores dos parâmetros S, é possível calcular a energia absorvida pelo material, conforme descrito em 3.2.5. O gráfico da Figura 4.4 mostra os valores obtidos de energia absorvida pelo papel celulósico puro, com valor médio de -0,076 dB / 1,76% na faixa de freqüências entre 8,2-12,4 GHz e valor máximo de -0,14 dB / 3,17% em 10,5 GHz. A integral da área fornece o valor igual a 0,3219. Estes valores demonstram o caráter transparente do papel celulósico puro, uma vez que o valor médio de energia absorvida é baixo, da ordem de 1,74%.

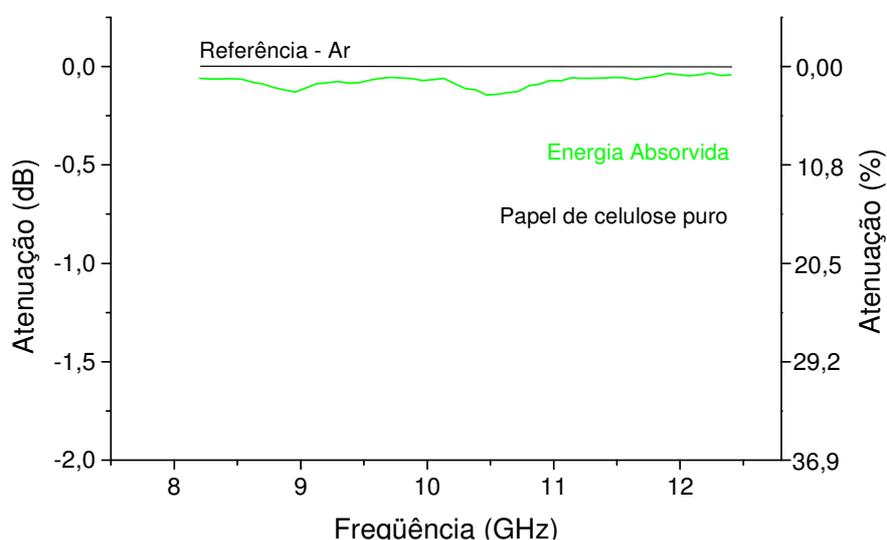


Figura 4.4. Curva de energia absorvida do papel celulósico puro.

A partir dos valores médios das curvas dos parâmetros S_{11}/S_{22} , S_{12}/S_{21} e energia absorvida na faixa de freqüências entre 8,2 e 12,4 GHz, é possível quantificar o balanço

de energia da energia transmitida (S_{12}/S_{21}), refletida (S_{11}/S_{22}) e absorvida, mostrado na Figura 4.5. O valor mostrado da energia transmitida na Figura 4.5 foi obtido a partir do valor médio entre os parâmetros S_{12}/S_{21} (Tabela 4.1) e o valor de energia refletida na Figura 4.5 foi obtido a partir do valor médio entre os parâmetros S_{11}/S_{22} (Tabela 4.2).

Pode-se observar pela Figura 4.5 que a energia refletida pelo papel celulósico puro é igual a 0,06% da energia incidente, sendo que 98,2% da energia é transmitida e 1,74% da energia é absorvida pelo papel. Os valores obtidos para o papel celulósico puro permitem que o mesmo possa ser utilizado eficientemente como substrato para materiais absorvedores de radiação eletromagnética, uma vez que possui baixo valor de energia absorvida, alto valor de energia transmitida e principalmente, baixo valor de energia refletida, uma vez que um alto valor de energia refletida faz com que a onda eletromagnética não penetre efetivamente no material.

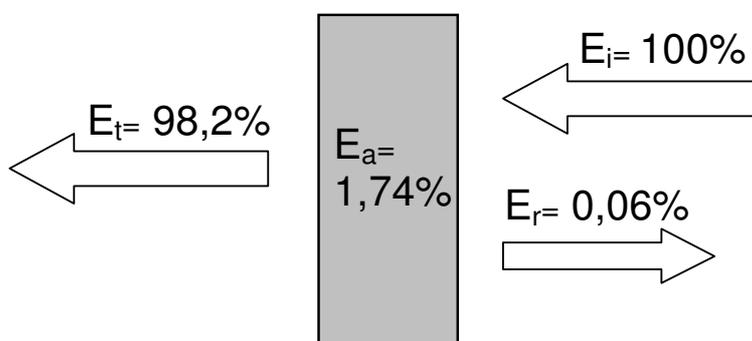


Figura 4.5. Balanço de energia para o papel celulósico puro (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz).

4.2.2 Aplicação de uma e duas demãos a 25 cm de distância

Os gráficos das Figuras 4.6 e 4.7 mostram as curvas dos parâmetros S_{12} e S_{21} para o papel celulósico com aplicação de negro de fumo a 25 cm de distância, com 2 demãos e 4 demãos, respectivamente.

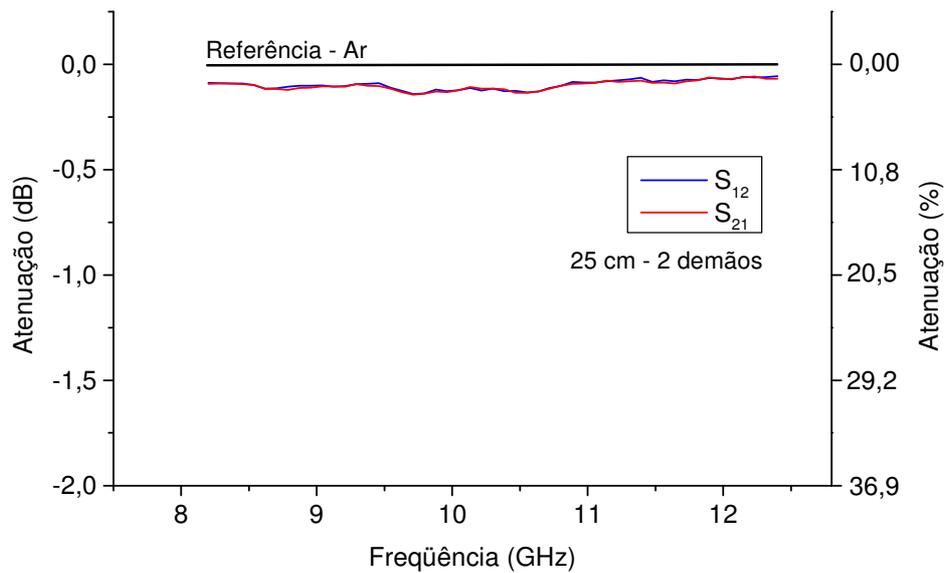


Figura 4.6. Curvas de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 2 demãos).

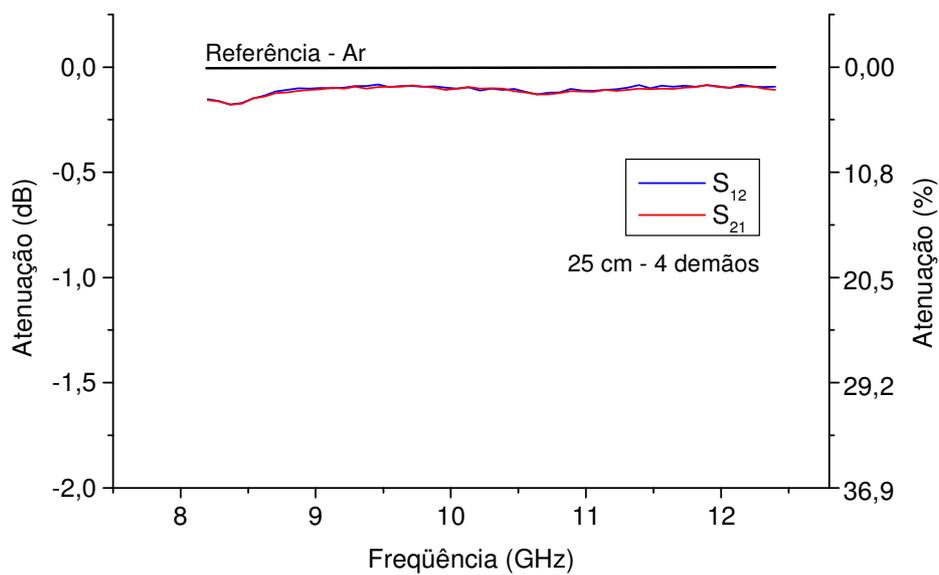


Figura 4.7. Curvas de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 4 demãos).

Primeiramente, pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.6 que as curvas S_{12} e S_{21} praticamente se sobrepõem, com diferença máxima da ordem de 0,02 dB / 0,45%. Isso demonstra que a transmissão da onda eletromagnética através do papel celulósico com negro de fumo não depende da direção da onda eletromagnética incidente, sendo praticamente iguais nas duas direções (incidência perpendicular à esquerda ou à direita em relação ao plano do papel). O mesmo comportamento é observado para o gráfico da Figura 4.7, isto é, as diferenças entre as curvas S_{12} e S_{21} são da ordem de 0,02 dB / 0,45%.

A Tabela 4.3 mostra os valores médios calculados da atenuação em decibéis (dB) e a integral das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) dos gráficos das Figuras 4.6 e 4.7. Pode-se observar pelos dados da Tabela 4.3 que os valores médios de atenuação para o lote 25 cm – 2 demãos são inferiores em relação aos valores médios do lote 25 cm – 4 demãos, em média 10%. Quanto mais próxima a curva de uma medida está da referência em uma medida de transmissão, sendo que a referência é o ar, maior é o caráter transmissor do material. Uma vez que os valores médios do lote 25 cm – 2 demãos são inferiores em relação ao lote 25 cm - 4 demãos, isto significa que o lote 25 cm - 2 demãos possui uma transmissão maior da energia da onda eletromagnética. Isto é comprovado pelos valores da integral da área, onde o lote 25 cm – 2 demãos possui uma área menor em relação ao lote 25 cm – 4 demãos, em torno de 10%, devido à maior gramatura do lote 25 cm – 4 demãos.

Tabela 4.3. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB / %) (25 cm – 2 demãos)	Valor médio da atenuação (dB / %) (25 cm – 4 demãos)	Integral da área (25 cm – 2 demãos)	Integral da área (25 cm – 4 demãos)
S_{12}	-0,096 / 2,18	-0,106 / 2,41	0,407	0,445
S_{21}	-0,100 / 2,27	-0,111 / 2,52	0,423	0,465

Os gráficos das Figuras 4.8 e 4.9 mostram as curvas dos parâmetros S_{11} e S_{22} para o papel celulósico com aplicação de negro de fumo a 25 cm de distância, com 2 demãos e 4 demãos, respectivamente. Diferentemente do gráfico da Figura 4.7, onde a máxima diferença entre as curvas é de 0,02 dB / 0,45%, no gráfico da Figura 4.8 a diferença máxima é de 1,3 dB / 25,8%. O mesmo comportamento foi observado no gráfico da Figura 4.9 em relação ao gráfico da Figura 4.7, isto é, uma maior diferença entre os dois parâmetros, sendo que no gráfico da Figura 4.9 a diferença observada foi de no máximo 0,8 dB / 16,8%.

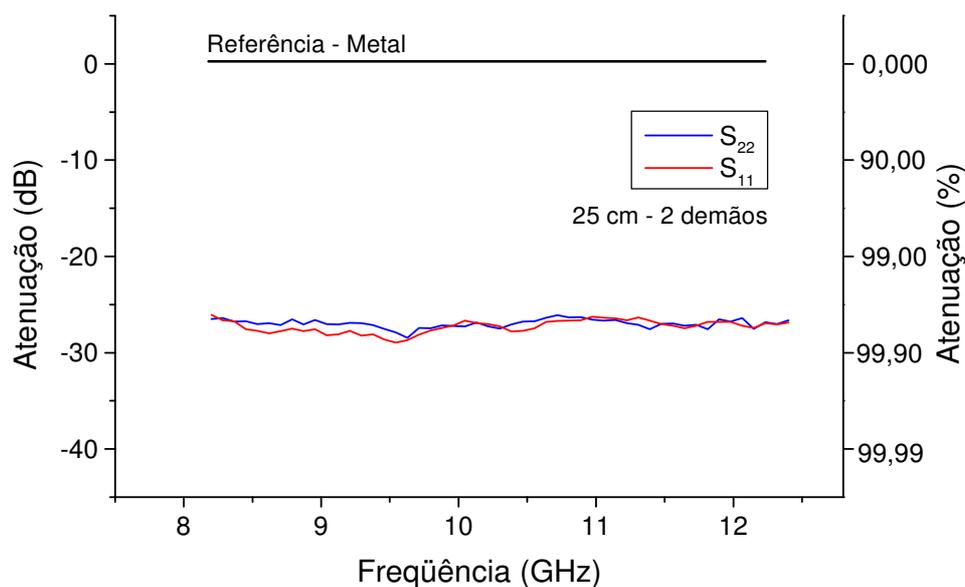


Figura 4.8. Curvas de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 2 demãos).

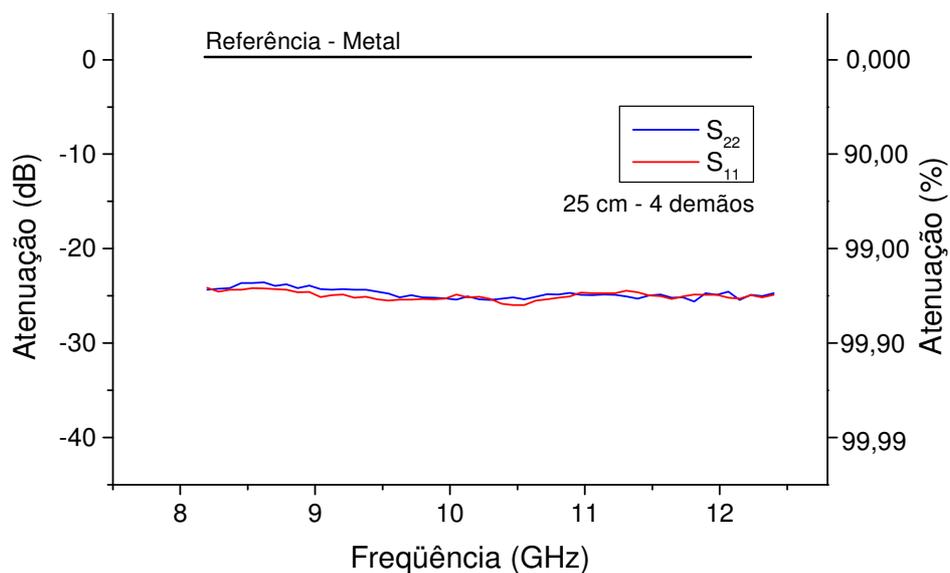


Figura 4.9. Curvas de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (25 cm – 4 demãos).

A Tabela 4.4 apresneta os valores médios calculados da atenuação em decibéis (dB) e a integral das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) dos gráficos das

Figuras 4.8 e 4.9. Pode-se observar pela Tabela 4.4 que os valores médios entre os parâmetros S_{11} e S_{22} mostram que para o lote 25 cm – 2 demãos seu valor é igual a -27,1 dB, enquanto que para o lote 25 cm – 4 demãos o valor está em torno de -24,8 dB.

Os valores mostram que o lote 25 cm – 4 demãos possui um caráter mais refletor em relação ao lote 25 cm – 2 demãos, em torno de 2,3 dB (27,1 dB – 24,8 dB), em média, sendo equivalente a 41%. Assim, o lote 25 cm – 4 demãos reflete 41% a mais da energia da onda eletromagnética em relação ao lote 25 cm – 2 demãos, uma vez que o lote 25 cm – 4 demãos possui uma gramatura maior, igual a 183 g/m², em relação ao lote 25 cm – 2 demãos, com gramatura igual a 140 g/m². Os valores das integrais das áreas também refletem esse comportamento, sendo que entre os lotes a diferença é de 9,0%, em média.

Tabela 4.4. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB/%) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB / %) (25 cm – 2 demãos)	Valor médio da atenuação (dB) (25 cm – 4 demãos)	Integral da área (25 cm – 2 demãos)	Integral da área (25 cm – 4 demãos)
S_{11}	-27,28 / 99,81	-24,98 / 99,68	114,6	104,9
S_{22}	-26,96 / 99,79	-24,75 / 99,66	113,2	103,9

O gráfico da Figura 4.10 mostra os valores calculados de energia absorvida pelos lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos, a partir dos valores médios de S_{11}/S_{22} e S_{12}/S_{21} dos gráficos das Figuras 4.8 e 4.9. Pode-se observar não há uma

separação distinta entre os valores de energia absorvida dos dois lotes ao longo de toda a faixa de frequência, isto é, em uma faixa de frequências é observado que a energia absorvida do lote 25 cm – 4 demãos é inferior em relação ao lote 25 cm – 2 demãos (9,3 GHz – 10,6 GHz), enquanto que em frequências abaixo de 9,4 GHz e acima de 10,6 GHz é observado o contrário.

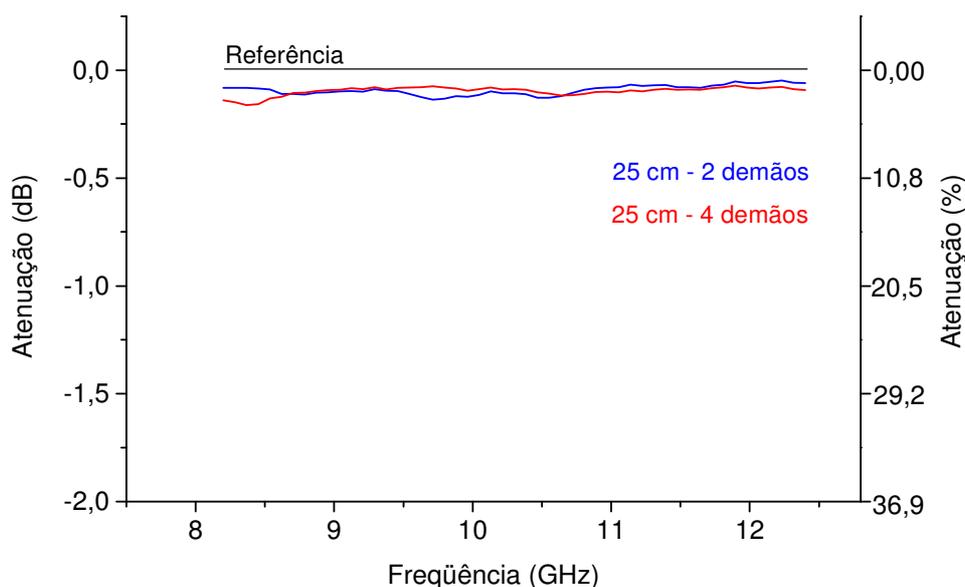


Figura 4.10. Curvas dos valores calculados de energia absorvida para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos.

A Tabela 4.5 mostra os valores calculados de valor médio de atenuação e a integral da área para o gráfico da Figura 4.10. Pode-se observar a partir da Tabela 4.5 que os valores calculados para o lote 25 cm – 4 demãos apresentam valores superiores em relação ao lote 25 cm – 2 demãos (4,5%, em média).

Tabela 4.5. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Lote	Valor médio da atenuação (dB / %)	Integral da área
25 cm – 2 demãos	-0,091 / 2,07	0,3879
25 cm – 4 demãos	-0,096 / 2,18	0,4056

O fato do lote 25 cm – 4 demãos apresentar valores médios de atenuação cerca de 4,5% superior em relação ao lote 25 cm – 2 demãos se deve a maior concentração em negro de fumo no papel celulósico, como foi mostrado pela sua maior gramatura. Em termos de desempenho como MARE, primeiramente considera-se que os dois lotes possuem desempenho similar, uma vez que seus valores de energia absorvida são próximos. Mas uma propriedade de grande importância para o bom desempenho de um MARE está ligado à capacidade da onda eletromagnética penetrar no material, isto é, ao seu coeficiente de reflexão. É desejável que um MARE tenha um baixo coeficiente de reflexão, pois assim a onda eletromagnética consegue penetrar mais efetivamente na estrutura do material reduzindo assim, a quantidade de energia refletida pelo material. A partir dos valores médios de S_{11}/S_{22} , S_{12}/S_{21} e valor calculado de energia absorvida na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz, é possível quantificar o balanço de energia da energia transmitida (S_{12}/S_{21}), refletida (S_{11}/S_{22}) e absorvida, mostrado na Figura 4.11. Pode-se observar pela Figura 4.11 que a energia refletida pelo lote 25 cm – 2 demãos possui uma reflexão de 0,19%, transmissão de 97,7% e absorção de 2,11%. O lote 25 cm – 4 demãos possui uma reflexão maior em relação ao lote 25 cm – 2 demãos, igual a 0,32%, menor transmissão, igual a 97,5% e maior absorção, igual a 2,18%.

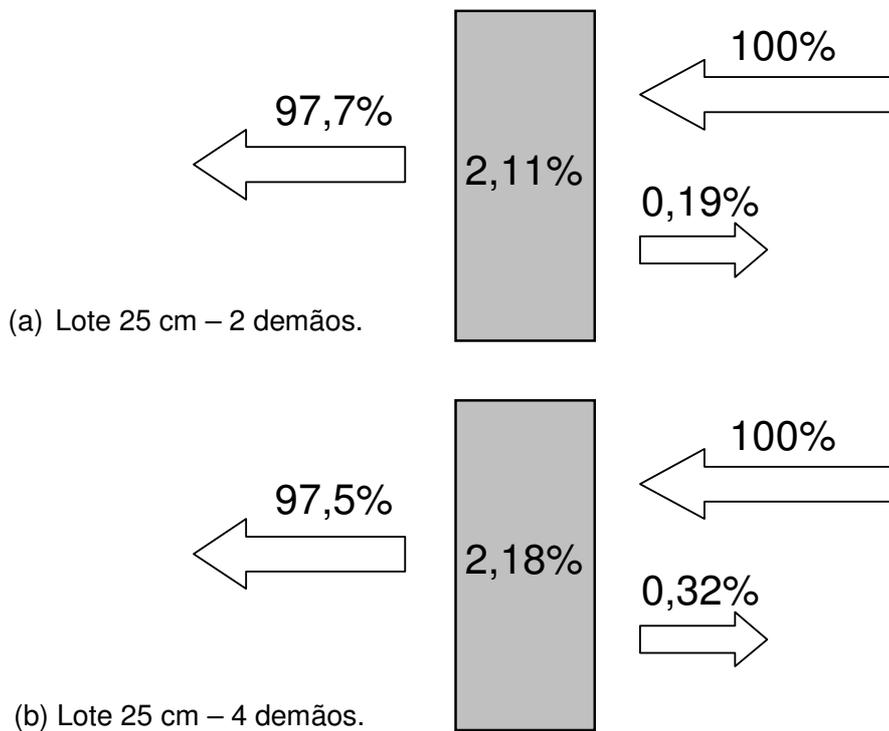


Figura 4.11. Balanço de energia para os lotes (a) 25 cm – 2 demãos e (b) 25 cm – 4 demãos (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz).

4.2.3 Aplicação de duas e quatro demãos a 30 cm de distância

Os gráficos das Figuras 4.12 e 4.13 mostram as curvas dos parâmetros S_{12} e S_{21} para o papel celulósico com aplicação de negro de fumo a 30 cm de distância, com 2 demãos e 4 demãos, respectivamente. O comportamento observado para os gráficos das Figuras 4.11 e 4.12 é o mesmo observado para os gráficos das Figuras 4.6 e 4.7, isto é, diferenças pequenas entre as atenuações dos parâmetros S_{12}/S_{21} , da ordem de 0,02 dB/0,45%, mostrando que a transmissão da onda eletromagnética é independente da direção da onda eletromagnética incidente em relação ao plano perpendicular do papel celulósico.

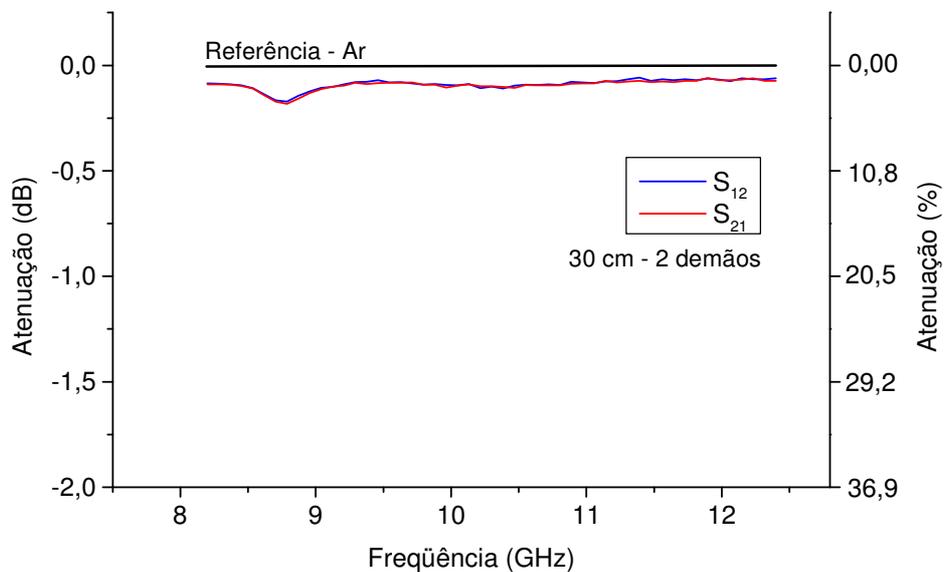


Figura 4.12. Curvas de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm - 2 demãos).

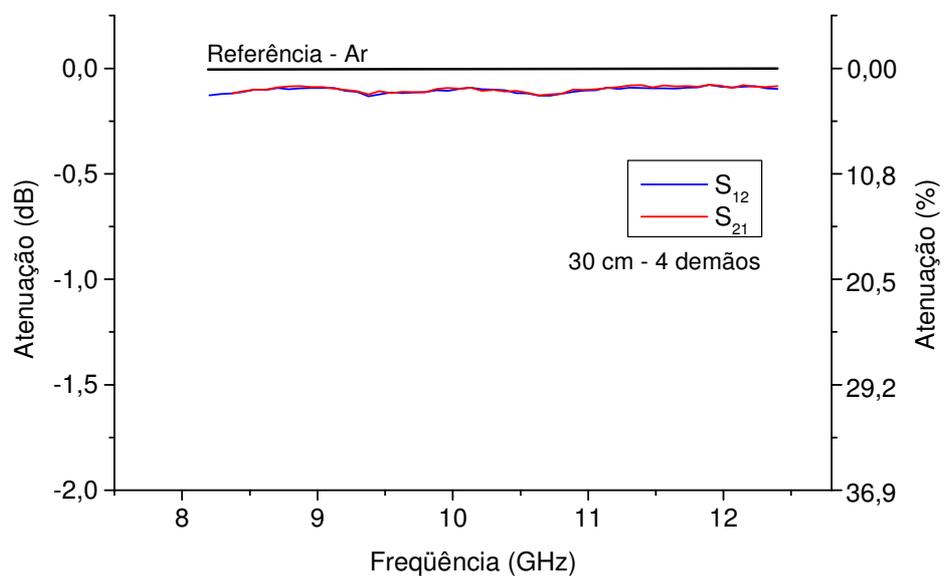


Figura 4.13. Curvas de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm - 4 demãos).

A Tabela 4.6 mostra os valores médios calculados da atenuação em decibéis (dB) e a integral das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) dos gráficos das Figuras 4.12 e 4.13. Comparando os valores da Tabela 4.6 e Tabela 4.3, pode-se observar que o valor médio de atenuação entre os lotes 25 cm – 2 demãos e 30 cm – 2 demãos apresenta uma diferença de 7,7%, sendo que o lote 30 cm – 2 demãos possui um valor médio de atenuação inferior em relação ao lote 25 cm – 2 demãos. O mesmo comportamento é observado entre os lotes 25 cm - 4 demãos e 30 cm – 4 demãos, onde o valor médio de atenuação do lote 30 cm – 4 demãos é 7,3% inferior em relação ao lote 25 cm – 4 demãos. Este comportamento está ligado ao fato que os lotes 30 cm com duas e quatro demãos possuem uma gramatura inferior em relação aos lotes 25 cm com duas e quatro demãos, respectivamente, ou seja, uma maior distância de aplicação da pintura resulta em menor quantidade de negro de fumo impregnado, com conseqüente redução na transmissão da onda eletromagnética.

Tabela 4.6. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB / %) (30 cm – 2 demãos)	Valor médio da atenuação (dB / %) (30 cm – 4 demãos)	Integral da área (30 cm – 2 demãos)	Integral da área (30 cm – 4 demãos)
S_{12}	-0,089 / 2,02	-0,103 / 2,34	0,375	0,433
S_{21}	-0,093 / 2,11	-0,098 / 2,23	0,392	0,405

Os gráficos das Figuras 4.14 e 4.15 mostram as curvas dos parâmetros S_{11} e S_{22} para o papel celulósico com aplicação de negro de fumo a 30 cm de distância, com 2

demãos e 4 demãos, respectivamente. Pode-se observar pelos gráficos das Figuras 4.14 e 4.15 que os valores dos parâmetros S_{11} e S_{22} possuem uma maior variação em relação aos parâmetros S_{12} e S_{21} (Figuras 4.12 e 4.13). Este comportamento é idêntico ao observado para os lotes 25 cm com 2 e 4 demãos (Figuras 4.8 e 4.9).

A Tabela 4.7 mostra os valores médios de atenuação em decibéis e porcentagem (dB/%) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz. Comparando os valores da Tabela 4.7 com os valores da Tabela 4.4, pode-se observar que o valor médio de atenuação entre os lotes 25 cm – 2 demãos e 30 cm – 2 demãos possuem uma diferença de 4,4%, sendo que o lote 30 cm – 2 demãos possui um valor de atenuação maior, isto é, mais afastado da referência. Isto indica que a reflexão do lote 30 cm – 2 demãos é inferior em relação ao lote 25 cm – 2 demãos, uma vez que possui uma menor gramatura. Comparando os lotes 30 cm – 4 demãos (Tabela 4.7) e 25 cm – 4 demãos (Tabela 4.4), observa-se uma diferença de 3,8%, sendo que o lote 30 cm – 4 demãos apresenta uma menor reflexão, como observado na comparação entre os lotes 30 cm – 2 demãos e 25 cm – 2 demãos. Os valores calculados das áreas dos gráficos refletem essa diferença, isto é, maior área para os lotes da Tabela 4.7 em relação aos lotes da Tabela 4.4, uma vez que os lotes da Tabela 4.7 possuem uma reflexão menor.

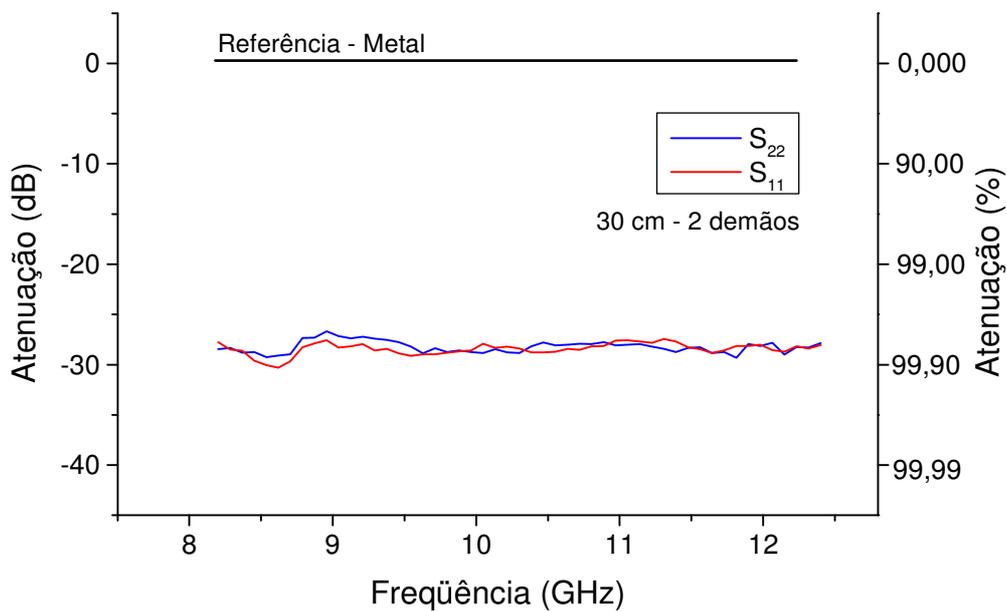


Figura 4.14. Curvas de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm - 2 demãos).

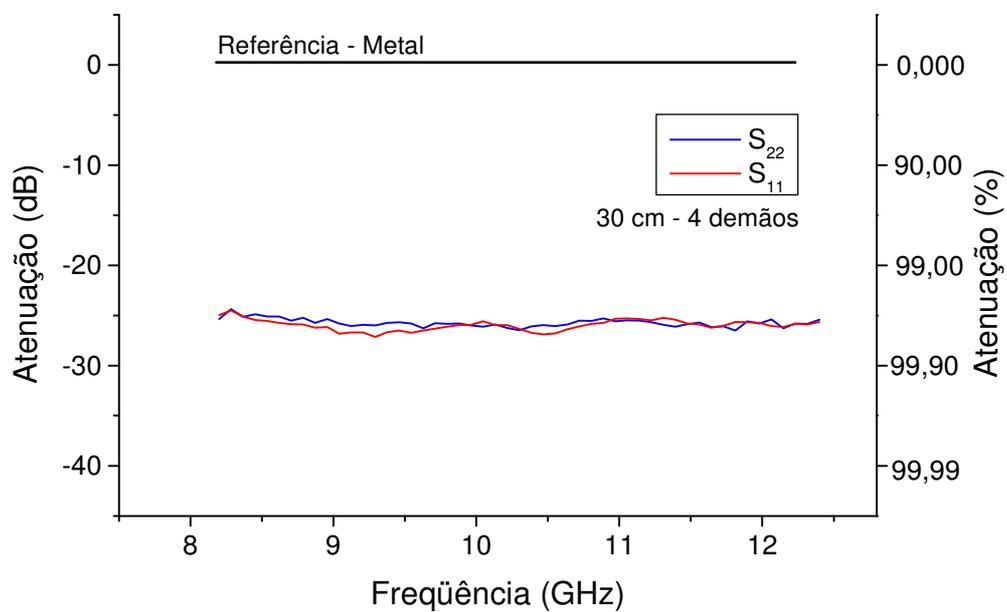


Figura 4.15. Curvas de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (30 cm - 4 demãos).

Tabela 4.7. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB / %) (30 cm – 2 demãos)	Valor médio da atenuação (dB / %) (30 cm – 4 demãos)	Integral da área (30 cm – 2 demãos)	Integral da área (30 cm – 4 demãos)
S_{11}	-28,43 / 99,85	-25,97 / 99,74	119,4	109,1
S_{22}	-28,22 / 99,84	-25,73 / 99,73	118,5	108,0

O gráfico da Figura 4.16 mostra os valores calculados de energia absorvida pelos lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, a partir dos valores médios de S_{11}/S_{22} e S_{12}/S_{21} dos gráficos das Figuras 4.14 e 4.15. Como observado nos lotes de 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos, não há uma separação distinta entre os valores de energia absorvida entre os dois lotes em toda a faixa de frequências, não sendo possível inferir a partir do gráfico qual lote possui um valor médio de energia absorvida maior ou menor.

A Tabela 4.8 apresenta os valores calculados de valor médio de atenuação e a integral da área para o gráfico da Figura 4.16. Pode-se observar pela Tabela 4.8 que os valores de atenuação para o lote 30 cm – 4 demãos são superiores em relação ao lote 30 cm – 2 demãos (4,5%). Comparando os valores obtidos dos lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos (Tabela 4.8) com os lotes 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos (Tabela 4.5), pode-se observar que os valores da Tabela 4.8 são inferiores em relação aos valores da Tabela 4.5, mostrando que a energia absorvida para os lotes 30 cm são inferiores. Isto está relacionado com a quantidade de negro de fumo, sendo que os lotes

30 cm possuem gramatura inferior em relação aos lotes 25 cm, por esse motivo exibem energia absorvida inferior (lotes 30 cm).

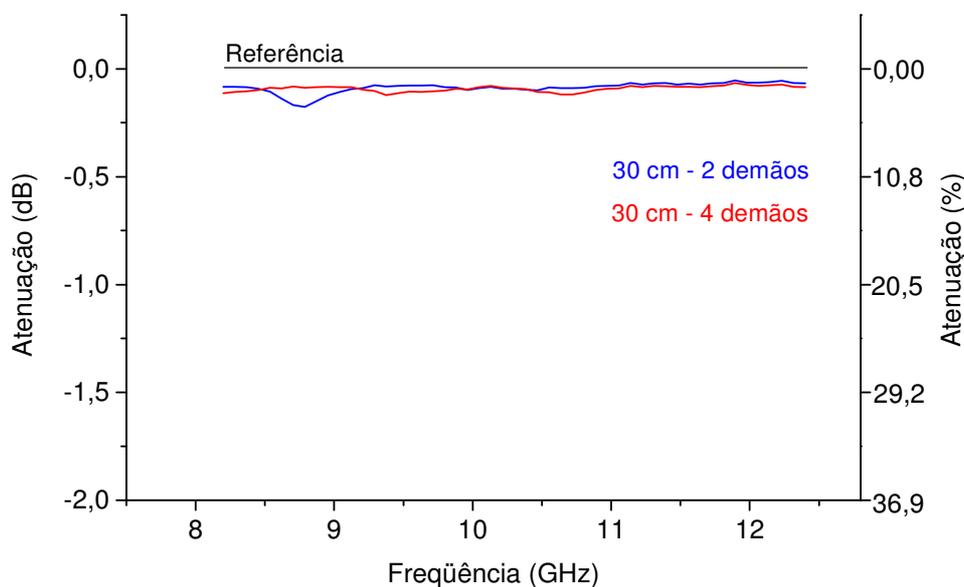


Figura 4.16. Curvas dos valores calculados de energia absorvida para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos.

Tabela 4.8. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB / %) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Lote	Valor médio da atenuação (dB / %)	Integral da área
30 cm – 2 demãos	-0,086 / 1,96	0,3659
30 cm – 4 demãos	-0,092 / 2,09	0,3866

A partir dos valores médios de S_{11}/S_{22} , S_{12}/S_{21} e valor calculado de energia absorvida na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz, é possível quantificar o balanço de energia das energias transmitidas (S_{12}/S_{21}), refletida (S_{11}/S_{22}) e absorvida, como apresentado na Figura 4.17. O lote 30 cm – 4 demãos possui um valor de energia absorvida igual a 2,04%, valor superior em relação ao lote 30 cm – 2 demãos (1,96%), sendo que este comportamento de maior absorção de energia se deve à maior gramatura do lote 30 cm – 4 demãos, o que resulta em maior absorção. Entretanto, a reflexão aumenta, sendo que o lote 30 cm – 4 demãos apresenta um valor 85,7% superior (0,26%) em relação ao lote 30 cm – 2 demãos (0,14%).

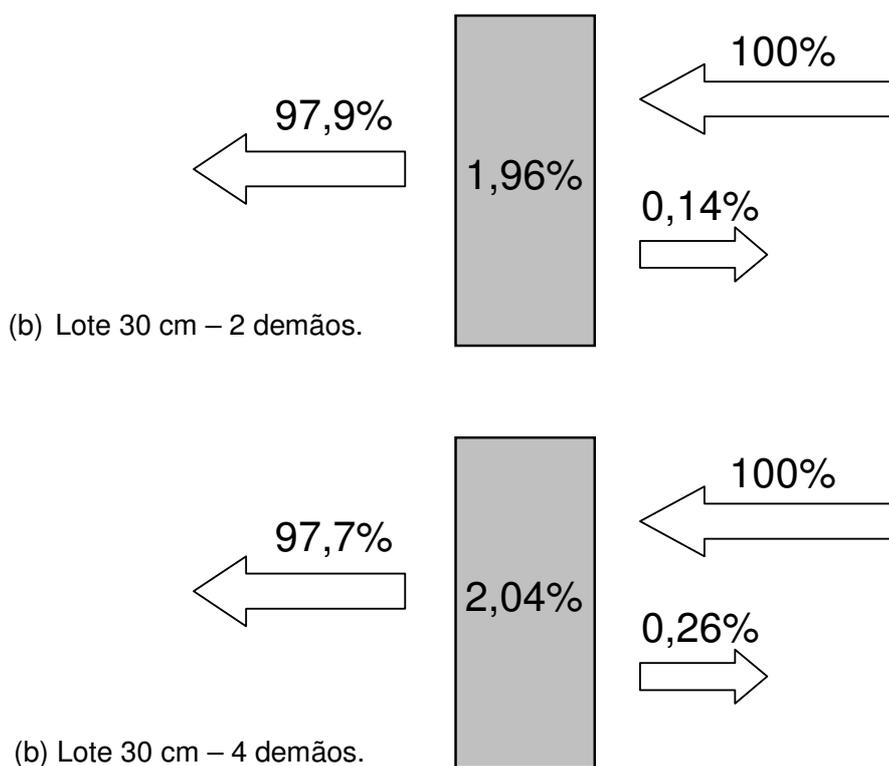


Figura 4.17. Balanço de energia para os lotes (a) 30 cm – 2 demãos e (b) 30 cm – 4 demãos (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz).

4.2.4 Aplicação de duas e quatro demãos a 40 cm de distância

Os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19 mostram as curvas dos parâmetros S_{12} e S_{21} para o papel celulósico com aplicação de negro de fumo a 40 cm de distância, com 2 demãos e 4 demãos, respectivamente. Assim como observado nos lotes 25 cm e 30 cm (2 e 4 demãos), as curvas de S_{12} e S_{21} para o lote 40 cm não apresentam diferenças significativas, da ordem de 0,01 dB / 0,23%. Isso demonstra que a transmissão da onda eletromagnética através do papel celulósico com negro de fumo não depende da direção da onda eletromagnética incidente, sendo praticamente iguais nas duas direções (incidência perpendicular do sinal à esquerda ou à direita do plano do papel).

A Tabela 4.9 mostra os valores médios calculados da atenuação em decibéis e porcentagem (dB/%) e a integral das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) dos gráficos das Figuras 4.18 e 4.19. Comparando os valores de duas demãos entre a Tabela 4.9 (Lote 40 cm), Tabela 4.6 (Lote 30 cm) e Tabela 4.3 (Lote 25 cm), pode-se observar que o lote 40 cm – 2 demãos possui valor médio de atenuação (média entre S_{12} e S_{21}) igual a -0,088 dB, o lote 30 cm – 2 demãos possui valor médio de atenuação igual a -0,091 dB e o lote 25 cm – 2 demãos o valor igual a -0,098 dB. A comparação desses dados mostra que conforme a distância de aplicação é diminuída, maior é a atenuação. Os dados da integral da área também estão diretamente relacionados com os valores de atenuação, isto é, quanto maior o valor médio de atenuação, maior será o valor da integral da área. Adicionalmente, a gramatura do lote 25 cm – 2 demãos (140 g/m²) é maior em relação ao lote 30 cm – 2 demãos (123 g/m²), que por sua vez é maior em relação ao lote 40 cm – 2 demãos (113 g/m²). Assim, os dados de transmissão estão coerentes com os valores de gramatura do papel celulósico com negro de fumo, isto é, quanto maior a gramatura, menor é a transmissão observada.

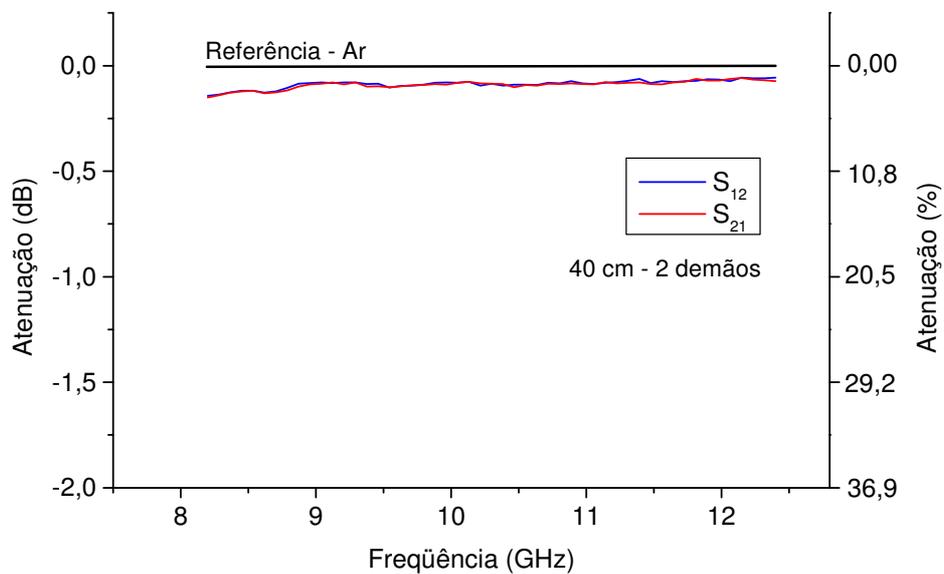


Figura 4.18. Curvas de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm - 2 demãos).

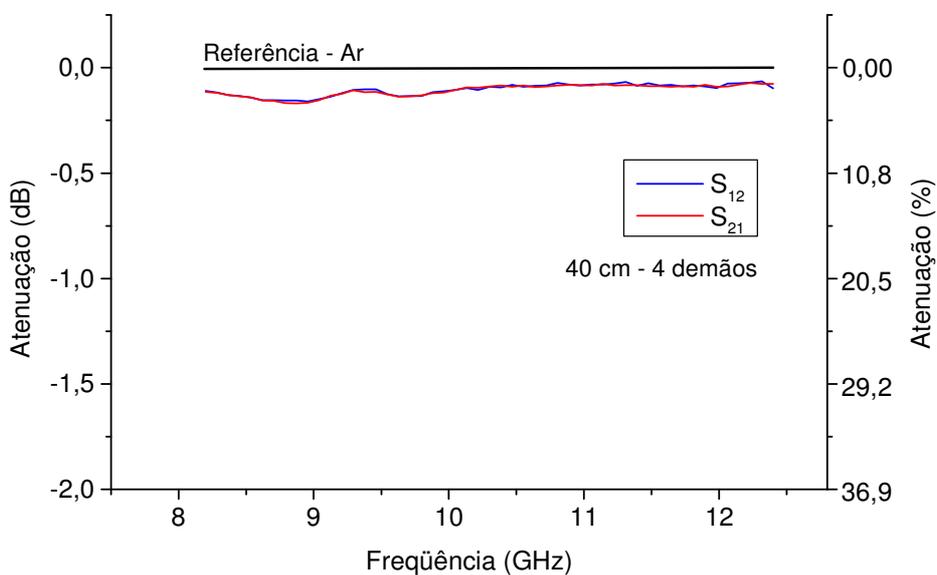


Figura 4.19. Curvas de energia transmitida (parâmetros S_{12} e S_{21}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm - 4 demãos).

Tabela 4.9. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB/%) e integral da área das curvas S_{12} e S_{21} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB/%) (40 cm – 2 demãos)	Valor médio da atenuação (dB/%) (40 cm – 4 demãos)	Integral da área (40 cm – 2 demãos)	Integral da área (40 cm – 4 demãos)
S_{12}	-0,086 / 1,96	-0,104 / 2,36	0,362	0,438
S_{21}	-0,090 / 2,05	-0,107 / 2,43	0,378	0,451

Os gráficos das Figuras 4.20 e 4.21 mostram as curvas dos parâmetros S_{11} e S_{22} para o papel celulósico com aplicação de negro de fumo a 40 cm de distância, com 2 demãos e 4 demãos, respectivamente. Assim como observado para os lotes 25 cm (Figuras 4.8 e 4.9) e 30 cm (Figura 4.14 e 4.15), o lote 40 cm apresenta valores dos parâmetros S_{11} e S_{22} com maior variação dos seus dados em função da frequência em relação aos parâmetros S_{12} e S_{21} . A Tabela 4.10 apresenta os valores médios calculados da atenuação em decibéis e porcentagem (dB/%) e a integral das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) dos gráficos das Figuras 4.18 e 4.19.

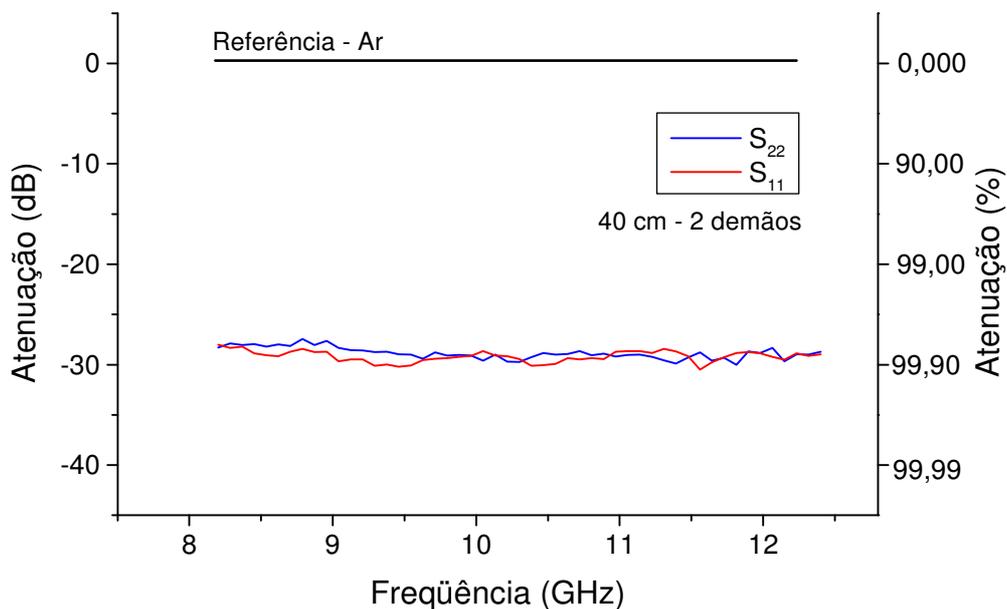


Figura 4.20. Curvas de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm - 2 demãos).

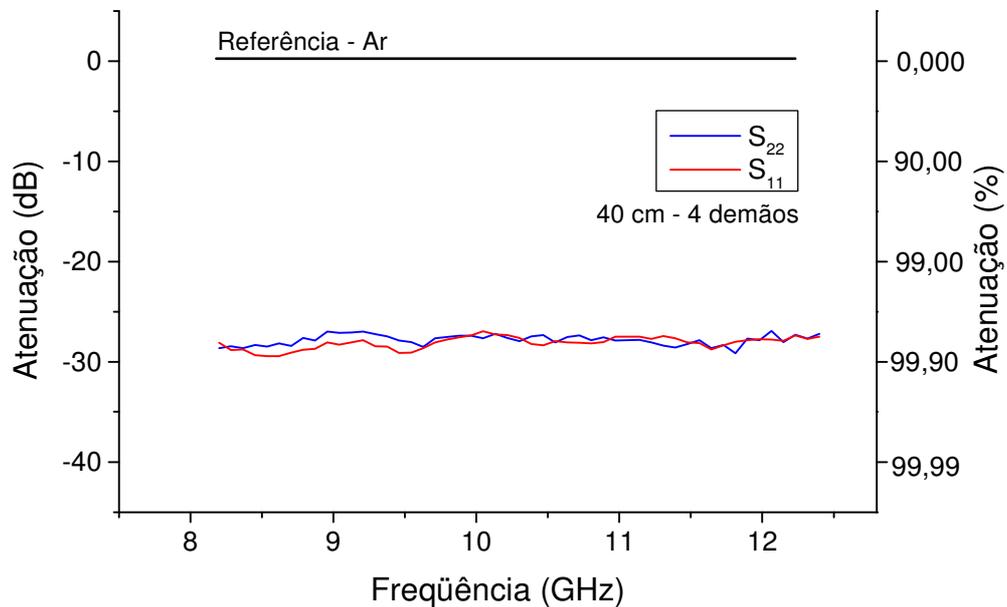


Figura 4.21. Curvas de energia refletida (parâmetros S_{11} e S_{22}) do papel celulósico com aplicação de negro de fumo (40 cm - 4 demãos).

Comparando os valores de duas demãos entre a Tabela 4.10 (Lote 40 cm), Tabela 4.7 (Lote 30 cm) e Tabela 4.4 (Lote 25 cm), pode-se observar que o lote 40 cm – 2 demãos possui valor médio de atenuação (média entre S_{11} e S_{22}) igual a -29,01 dB (99,87%), o lote 30 cm – 2 demãos possui valor médio de atenuação igual a -28,32 dB (99,85%) e o lote 25 cm – 2 demãos o valor igual a -27,12 dB (99,80%), isto é, conforme aumenta a distância de aplicação, maior é a atenuação. Quanto mais próximo da curva de referência em 0 dB estiver a medida de um material, maior é o seu caráter refletor, uma vez que a curva em 0 dB é a medida de um material metálico (100% refletor). Os dados da integral da área também estão diretamente relacionados com os valores de atenuação, isto é, quanto maior o valor médio de atenuação, maior será o valor da integral da área. Adicionalmente, a gramatura do lote 25 cm – 2 demãos (183 g/m²) é maior em relação ao lote 30 cm – 2 demãos (161 g/m²), que por sua vez é maior em relação ao lote 40 cm – 2 demãos (127 g/m²). Assim, os dados de transmissão estão coerentes com os valores de gramatura do papel celulósico com negro de fumo, isto é, quanto maior a gramatura, maior é a reflexão observada.

Tabela 4.10. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Parâmetro	Valor médio da atenuação (dB/%) (40 cm – 2 demãos)	Valor médio da atenuação (dB/%) (40 cm – 4 demãos)	Integral da área (40 cm – 2 demãos)	Integral da área (40 cm – 4 demãos)
S_{11}	-29,18 / 99,87	-28,11 / 99,84	122,6	118,1
S_{22}	-28,85 / 99,86	-27,81 / 99,83	121,2	116,8

O gráfico da Figura 4.22 mostra os valores calculados de energia absorvida pelos lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, a partir dos valores médios de S_{11}/S_{22} e S_{12}/S_{21} dos gráficos das Figuras 4.20 e 4.21. Diferentemente como observado nos lotes de 25 cm e 30 cm com duas e quatro demãos, pode-se observar que é possível diferenciar os valores de energia absorvida dos lotes 40 cm – 2 demãos do lote 40 cm – 4 demãos na maior parte das frequências (entre 8,35 GHz e 10,2 GHz).

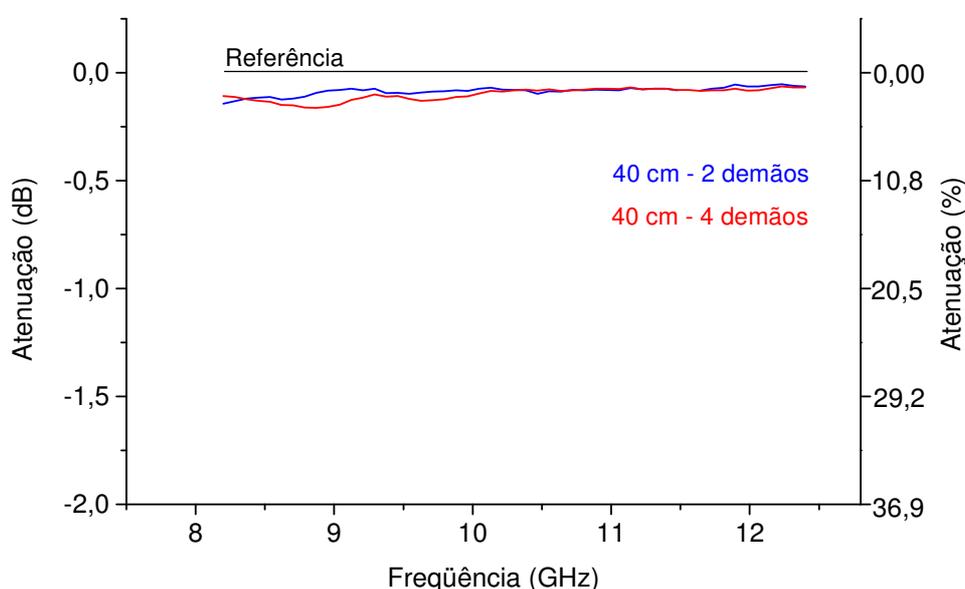


Figura 4.22. Curvas dos valores calculados de energia absorvida para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos.

A Tabela 4.11 mostra os valores calculados de valor médio de atenuação e a integral da área para o gráfico da Figura 4.22. Comparando os dados da Tabela 4.11 para os sistemas 25 cm e 30 cm ambos com 2 demãos, pode-se observar que o lote 40 cm – 2 demãos possui um valor de energia absorvida (-0,085 dB/1,93%, integral da área 0,3502) inferior ao lote 30 cm – 2 demãos da Tabela 4.8 (-0,086 dB/1,96%, integral da área 0,3659), que por sua vez é inferior ao lote 25 cm – 2 demãos da Tabela 4.5

(- 0,091 dB/2,07% – integral da área 0,3879). Assim, pode-se observar que quanto menor a distância de aplicação do negro de fumo para os lotes com 2 demãos, maior é o valor médio de energia absorvida e maior é a integral da área, uma vez que houve um aumento na gramatura do papel com negro de fumo.

Entretanto, os sistemas envolvendo 4 demãos apresentam uma tendência diferente. O lote 25 cm – 4 demãos apresenta um valor médio de atenuação igual a -0,096 dB/2,18%, e o lote 30 cm – 4 demãos o valor médio de atenuação igual a -0,092/2,09%, ou seja, uma diminuição no valor de energia absorvida em função da diminuição da gramatura, como foi observado para a condição de aplicação de 2 demãos. A diferença na tendência é observada no lote 40 cm – 4 demãos, que apresenta valor médio de atenuação (-0,100 dB/2,27%) superior em relação aos lotes 25 cm – 4 demãos (-0,091 dB/2,07%) e 30 cm – 4 demãos (-0,092 dB/2,09%). Esta diferença na tendência está relacionada com a concentração de negro de fumo no lote 40 cm – 4 demãos, que permite a maior entrada da energia da onda eletromagnética, comprovado pelo valor de energia refletida igual a 0,15%, inferior em relação aos lotes 30 cm – 4 demãos (0,26%) e 25 cm – 4 demãos (0,32%).

Tabela 4.11. Valor médio de atenuação em decibéis e porcentagem (dB) e integral da área das curvas S_{11} e S_{22} (até valor de referência em 0 dB) para os lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, na faixa de frequência entre 8,2 e 12,4 GHz.

Lote	Valor médio da atenuação (dB/%)	Integral da área
40 cm – 2 demãos	-0,085 / 1,93	0,3502
40 cm – 4 demãos	-0,100 / 2,27	0,4222

A partir dos valores médios de S_{11}/S_{22} , S_{12}/S_{21} e valor calculado de energia absorvida na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz, é possível quantificar o balanço de energia da energia transmitida (S_{12}/S_{21}), refletida (S_{11}/S_{22}) e absorvida, apresentado na Figura 4.23. Pode-se observar pela Figura 4.23 que a energia refletida pelo lote 40 cm – 4 demãos possui uma reflexão de 0,15%, transmissão de 97,6% e absorção de 2,27%.

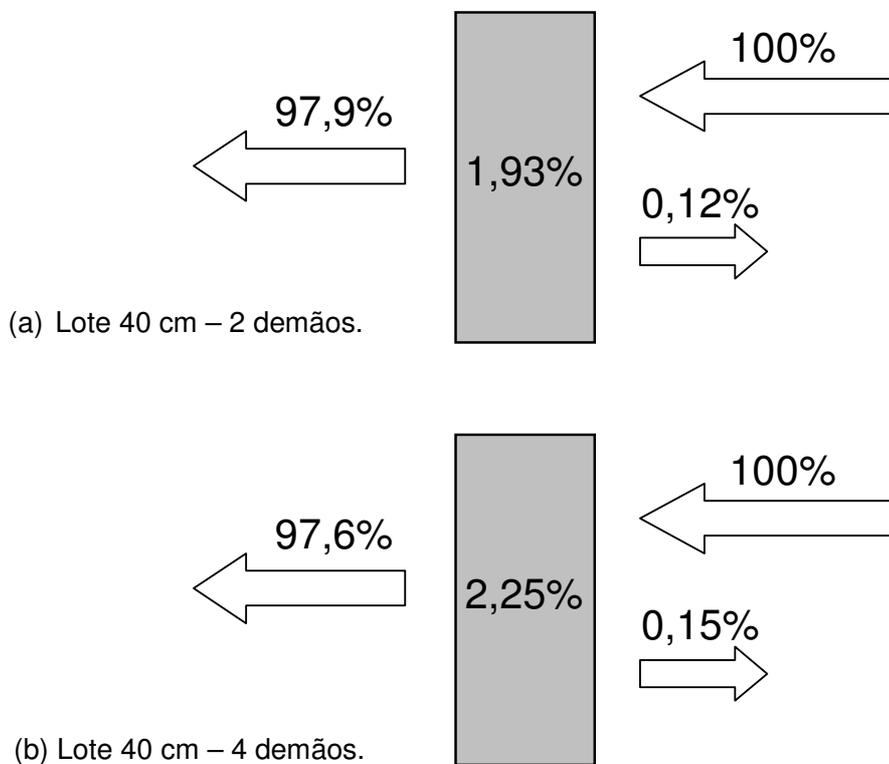


Figura 4.23. Balanço de energia para os lotes (a) 40 cm – 2 demãos e (b) 40 cm – 4 demãos (valores médios na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz).

4.2.5 Tendências observadas dos parâmetros S e energia absorvida

Para fins de melhor visualização das tendências observadas com todos os lotes discutidos anteriormente, este item traz resumidamente e esquematicamente as tendências dos parâmetros S e energia absorvida. O gráfico da Figura 4.24 apresenta a tendência observada dos parâmetros S para os lotes com aplicação de 2 demãos (25 cm, 30 cm e 40 cm), sendo os parâmetros S_{11}/S_{22} representado por E_r (energia refletida), os parâmetros S_{12}/S_{21} representado por E_t (energia transmitida) e a energia absorvida representada por E_a .

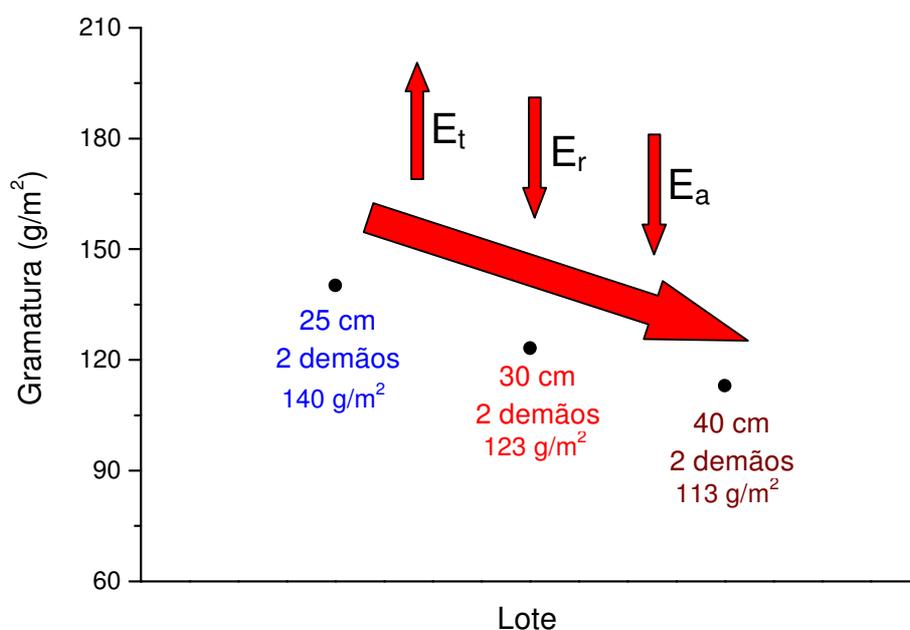


Figura 4.24. Tendência observada para os parâmetros S dos lotes com 2 demãos: E_r - energia refletida (S_{11}/S_{22}), E_t - energia transmitida (S_{12}/S_{21}) e E_a - energia absorvida.

Pode-se observar pelo esquema da Figura 4.24 que a tendência é de aumento dos valores de E_t e diminuição nos valores de E_r e E_a , na seguinte ordem (indicado pelas setas vermelhas): lote 25 cm – 2 demãos, lote 30 cm – 2 demãos e lote 40 cm – 2

demãos. Este comportamento encontra-se relacionado com a diminuição da gramatura (diminuição da concentração de negro de fumo), sendo que quanto mais concentrado é o lote, maior é a energia absorvida, com conseqüente aumento do coeficiente de reflexão e diminuição do coeficiente de transmissão. O gráfico da Figura 4.25 mostra a tendência observada dos parâmetros S para os lotes com aplicação de 4 demãos (25 cm e 30 cm), sendo os parâmetros S_{11}/S_{22} representado por E_r (energia refletida), os parâmetros S_{12}/S_{21} representado por E_t (energia transmitida). Assim como observado para os lotes com 2 demãos, os lotes com 4 demãos apresentam um aumento da energia transmitida e diminuição da energia refletida com a diminuição da gramatura.

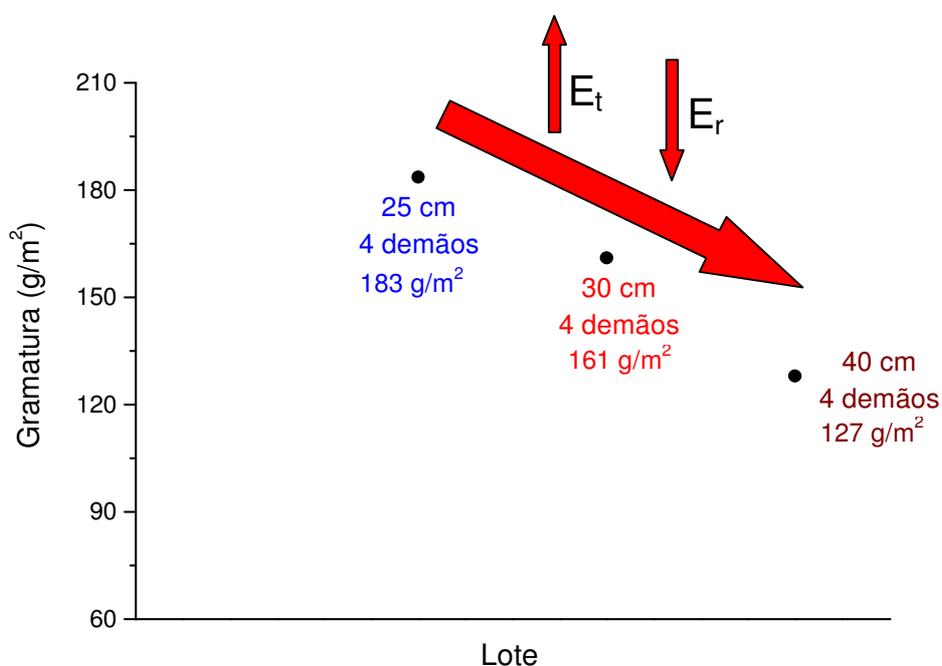


Figura 4.25. Tendência observada para os parâmetros S dos lotes com 4 demãos: E_r - energia refletida (S_{11}/S_{22}), E_t - energia transmitida (S_{12}/S_{21}).

Entretanto, diferentemente do comportamento observado com os lotes de 2 demãos, os lotes com 4 demãos apresentam um comportamento diferente em relação

ao parâmetro energia absorvida, isto é, os lotes com 4 demãos não apresentam uma queda no valor da energia absorvida com a diminuição da gramatura do papel celulósico com negro de fumo. A queda da energia absorvida é observada do lote 25 cm – 4 demãos para o lote 30 cm – 4 demãos, sendo que no lote 40 cm – 4 demãos é observado um aumento da energia absorvida (Figura 4.26). A explicação dessa tendência já foi discutida no item anterior (item “Aplicação de uma e duas demãos a 40 cm de distância”).

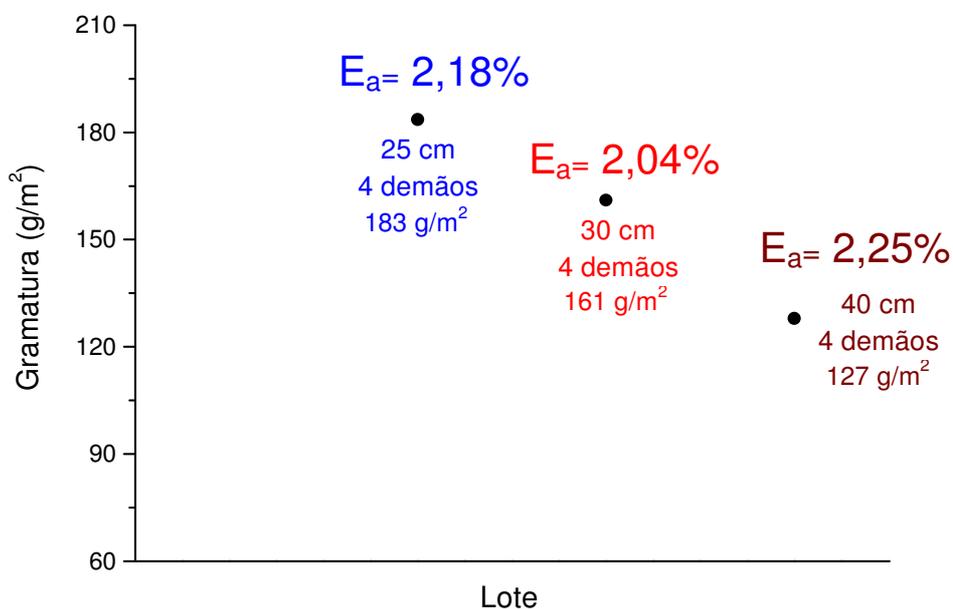


Figura 4.26. Tendência observada para E_a - energia absorvida dos lotes com 4 demãos.

4.3 Seleção da condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para os tubos

Foram manufaturados três lotes de tubos de papel celulósico impregnado com negro de fumo, a partir da análise dos resultados dos parâmetros S dos seis lotes (25 cm -2 demãos, 25 cm – 4 demãos, 30 cm – 2 demãos, 30 cm – 4 demãos, 40 cm – 2

demãos e 40 cm – 4 demãos). Não foram manufacturados seis lotes de tubos de papel com cada uma das seis condições de impregnação pois somente três condições são necessárias para estudar o comportamento de reflexão dos tubos. A escolha da condição de impregnação é baseada nos seguintes critérios, conforme discutido no item 3.2.3:

1) A interação da onda eletromagnética com os tubos absorvedores de radiação eletromagnética se dá principalmente por múltiplas reflexões da onda com as paredes dos tubos. Uma vez que a passagem da onda eletromagnética através das paredes de papel celulósico impregnado com negro de fumo faz com que a energia seja atenuada somente entre 1-2%, é importante que a onda eletromagnética seja capaz de penetrar efetivamente na estrutura do papel celulósico. Assim, é preciso que o papel celulósico impregnado com negro de fumo exiba um baixo valor do coeficiente de reflexão (parâmetros S_{11}/S_{22}).

2) O material deve possuir um alto valor de energia absorvida.

Baseado nos critérios acima e pela análise dos valores de energia refletida e absorvida mostrados na Figura 4.11 (lote 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos), Figura 4.17 (lote 30 cm – 2 demãos e 30 cm – 4 demãos) e Figura 4.23 (lotes 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos), o lote 40 cm – 2 demãos possui o menor valor médio de energia refletida, igual a 0,12%, e um valor de energia absorvida igual a 1,93%. O menor valor de energia refletida do lote 40 cm – 2 demãos deve-se ao menor valor de gramatura do lote, igual a 113 g/m². Os outros dois lotes foram escolhidos com base no maior valor médio de energia refletida (lote 25 cm – 4 demãos) e valor intermediário de energia refletida (25 cm – 2 demãos). A escolha dos dois lotes de 25 cm encontra-se

baseada na pior condição de reflexão (alta reflexão), bem como um valor intermediário, para efeito de comparação. A Tabela 4.12 mostra os valores de energia absorvida (em %) e refletida (em %) pelos lotes escolhidos de condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico.

Tabela 4.12. Lotes escolhidos de condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para a manufatura dos tubos.

Lote	Energia refletida (%)	Energia absorvida (%)
25 cm – 4 demãos	0,32	2,18
25 cm – 2 demãos	0,19	2,11
40 cm – 2 demãos	0,15	2,25

Em seguida foi aplicado o sistema de negro de fumo/poliuretano no papel celulósico com dimensões de 50 cm x 50 cm. Para cada lote foi aplicado o sistema de pintura em oito folhas de papel celulósico, para obtenção de oito tubos e montagem segundo o esquema da Figura 3.7. A gramatura do papel celulósico impregnado para cada lote foi igual para os oito tubos obtidos, com valores iguais aos apresentados na Figura 4.1.

4.4 Refletividade dos lotes de tubos – Arco NRL

O gráfico da Figura 4.27 apresenta as curvas de refletividade obtidas no arco NRL dos lotes de com o conjunto de tubos montado segundo o esquema da Figura 3.7: tubos branco (papel celulósico puro), 25 cm – 4 demãos, 25 cm – 2 demãos e 40 cm – 2 demãos. O ângulo entre a antena transmissora e receptora utilizado foi igual a 15°.

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.27 que a menor atenuação é observada para o lote de tubo branco (curva em verde), com valor médio de atenuação igual a -0,08 dB (1,82%). Este valor de atenuação está relacionado com a absorção e espalhamento da energia da onda eletromagnética que interage com a estrutura dos tubos. Como o papel celulósico puro possui alto valor de transmissão (98,2%), baixo coeficiente de reflexão (0,06%) e baixa absorção (1,74%), como mostrado na Figura 4,5, é observado que o valor obtido de reflexão no arco NRL é alto, ou seja, a maior parte do sinal retorna à antena receptora, sendo igual a 98,1% (100%-1,82%).

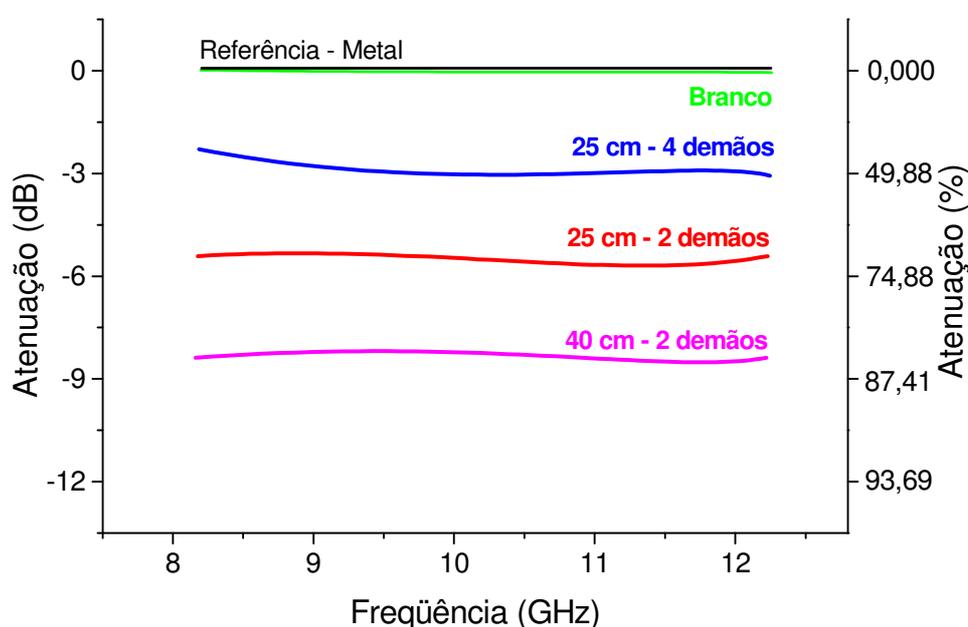


Figura 4.27 Curvas de refletividade no arco NRL dos lotes dos tubos branco (papel celulósico puro), 25 cm – 4 demãos, 25 cm – 2 demãos e 40 cm – 2 demãos.

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4.27 que a atenuação em ordem crescente é observada na seguinte ordem, com o respectivo valor médio da atenuação em dB e %: 25 cm – 4 demãos (-2,84 dB/48,0%), 25 cm – 2 demãos (-5,44 dB/71,4%) e 40 cm – 2 demãos (-8,20 dB/84,8%). Comparando os valores médios de atenuação da Figura 4.27 com os valores da Tabela 4.12, pode-se observar que o maior valor médio

de atenuação é observado para o lote 40 cm – 2 demãos, o lote que possui o menor valor de energia refletida e maior valor de energia absorvida. O menor valor médio de atenuação é observado para o lote 25 cm – 4 demãos, o lote que possui o maior valor de energia refletida (0,32%), e o valor intermediário de atenuação é observado para o lote 25 cm – 2 demãos, que possui valor intermediário de energia refletida (0,19%). Isto demonstra que o parâmetro energia refletida (S_{11}/S_{22}) governa a atenuação da energia da onda eletromagnética para estruturas onde há interação por múltiplas reflexões. Este comportamento é justificado pela maior absorção da energia da onda eletromagnética com materiais que possuam primeiramente baixo coeficiente de reflexão, ou seja, a onda eletromagnética consegue penetrar na estrutura do material e, em segundo plano, alto valor de energia absorvida, para que a energia seja efetivamente absorvida.

5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos no presente trabalho, é possível concluir:

- 1) Foi estabelecida uma metodologia de impregnação de papel celulósico com um sistema de negro de fumo e resina tipo poliuretânica, via pistola de pintura acoplada com ar comprimido.

- 2) Foram obtidos seis lotes de papel celulósico impregnado com negro de fumo e resina tipo poliuretânica, obtidos pela variação da distância de aplicação e número de demãos: 25 cm – 2 demãos, 25 cm – 4 demãos, 30 cm – 2 demãos, 30 cm – 4 demãos, 40 cm – 2 demãos e 40 cm – 4 demãos, sendo que o negro de fumo e a resina tipo poliuretânica permaneceram aderidas satisfatoriamente ao papel celulósico, permitindo que o material fosse manuseado sem perda do material impregnado.

- 3) A avaliação do comportamento eletromagnético do parâmetros S_{11}/S_{22} (energia refletida) para o papel celulósico impregnado com negro de fumo e resina poliuretânica demonstrou que para os lotes com 2 e 4 demãos quanto maior a distância de aplicação, menor é a energia refletida, uma vez que a concentração de negro de fumo e poliuretano é menor, favorecendo a entrada da onda eletromagnética no material, e conseqüentemente, a redução da reflexão. O número de demãos também possui influencia na energia refletida, sendo que para a mesma distância de aplicação, o menor número de demãos, diminui a reflexão.

4) A avaliação do comportamento eletromagnético do parâmetro S_{12}/S_{21} (energia transmitida), para o papel celulósico impregnado com negro de fumo e resina poliuretânica, demonstrou que para os lotes com 2 e 4 demãos, quanto maior a distância de aplicação, maior é a energia transmitida. Uma vez que a concentração de negro de fumo e poliuretano é menor, favorecendo a entrada da onda eletromagnética no material, e conseqüentemente, o aumento da transmissão. O número de demãos também possui influencia na energia transmitida, sendo que para a mesma distância de aplicação o menor número de demãos aumenta a transmissão.

5) A avaliação do comportamento eletromagnético do parâmetro energia absorvida para o papel celulósico impregnado com negro de fumo e resina poliuretânica demonstrou que para os lotes com 2 demãos quanto maior a distância de aplicação, menor é a energia absorvida, uma vez que distâncias maiores de aplicação possuem menor gramatura, isto é, menor quantidade de negro de fumo. Entretanto, para os lotes com 4 demãos a tendência foi diferente, sendo que para os lotes 25 cm – 4 demãos e 30 cm – 4 demãos houve uma diminuição na energia absorvida, sendo que para o lote 40 cm – 4 demãos houve um aumento, devido à sua concentração permitir a entrada mais efetiva da energia da onda eletromagnética no material.

6) Os critérios de seleção da condição de aplicação de negro de fumo no papel celulósico para os tubos, baseado no menor valor do coeficiente de reflexão (S_{11}/S_{22}) e maior coeficiente de absorção (E_a), foram utilizados para escolha de 3 formulações para a construção dos tubos, na seguinte ordem crescente de reflexão: 40 cm – 2 demãos, 25 cm – 2 demãos e 25 cm – 4 demãos. Os resultados obtidos dos tubos caracterizados no arco NRL demonstram que o menor valor de reflexão foi obtido de acordo com os

critérios de seleção, sendo que o lote 40 cm – 2 demãos possui valor médio de atenuação igual a -8,20 dB/84,8%, o lote 25 cm – 2 demãos um valor médio de -5,44 dB/71,4% e o lote 25 cm – 4 demãos um valor médio de -2,84 dB/48,0%. O resultado obtido comprova que o material deve possuir um baixo coeficiente de reflexão para permitir a entrada da onda eletromagnética na sua estrutura.

7) O tipo de geometria adotado para construção dos tubos é considerado satisfatório para a redução do coeficiente de reflexão, permitindo que o sinal da onda eletromagnética sofra múltiplas reflexões, aumentando assim, o número de interações da onda eletromagnética com as paredes dos tubos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar:

- 1) o desempenho eletromagnético de tubos absorvedores de radiação eletromagnética impregnados com negro de fumo com maior comprimento.
- 2) o desempenho eletromagnético de outros tipos de negro de fumo e matriz polimérica impregnados em substratos tipo papel celulósico.
- 3) o efeito de envelhecimento nas propriedades eletromagnéticas do papel celulósico impregnado com negro de fumo e matriz polimérica.
- 4) a utilização de outros tipos de papel como substratos.
- 5) o material na faixa de frequências de 50 MHz – 1000 MHz.
- 6) o material na faixa de frequências de 1 GHz – 40 GHz.
- 7) a utilização do material em câmaras anecóicas e ambientes externos.
- 8) a utilização do material na redução da interferência eletromagnética entre antenas transmissoras e receptoras em torres de telecomunicações.
- 9) o controle da dispersão do negro de fumo no sistema de impregnação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIYAR, R.P.R.C. Microwave absorbers based on hexaferrites; **Microwave and Optica Techonology Letters**. 23(5), pp. 321-323, Dec 5, 1999.

ALEKSEIEV, A.V. **Tecnologia “Stealth”**. X International Conference on Spin-Electronics and Gyrovectoelectrodynamics. 16-18 novembro, Firsanovka, Rússia, 2001.

ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações, **Plano de Destinação das Faixas de Frequência**, acessado e disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/pdf/Consulta/Consulta.Asp?intPagina=1&intLivro=0>>, dezembro de 2005.

BALAGEAS, D. **A Photothermal Tool for Electromagnetic Phenomena Characterization**. Rev. Gén. Therm, 37 (1998) 725-739.

BALAGEAS, D.; LEVESQUE, P. EMIR: A Photothermal Tool for Electromagnetic Phenomena Characterization. **Rev. Gén. Therm**, 37 - 1998 725-739.

BALANIS, C.A. **Advanced Engineering Electromagnetics**. New York, NY: John Wiley and Sons, 1989.

BISCARO, R.S. **Obtenção de Tintas Condutoras Utilizando Blendas de Poliuretano e Polianilina Dopada**. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2002.

BISCARO, R.S. **Obtenção de Tintas Condutoras Utilizando Blendas de Poliuretano e Polianilina Dopada**. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2002.

CABOT Co., USA. Technical Report S-39: Conductive Carbon Black in Plastics; 1998.

CNES, Centre National d'Etudes Spatiales, acessado e disponível em: <<http://www.cnes.com>>, julho de 2000.

DIAS, J.C. **Obtenção de Revestimentos Absorvedores de Radiação Eletromagnética (2-18 GHz)**. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2000.

DIAS, J.C. **Obtenção de Revestimentos Absorvedores de Radiação Eletromagnética (2-18 GHz)**. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2000.

DIAS, J.C.; REZENDE, M.C.; MARTIN, I.M.; SILVA, F.S.; MIGLIANO, A.C.C. **Processo para obtenção de revestimentos absorvedores de microondas (2-20 GHz) à base de poliuretanos e resinas epóxi aditados com partículas de carbono e ferritas**. PI 9805581, CTA,Dezembro, 1998.

DIAS, J.C.; SILVA, F.S.; REZENDE, M.C.; MARTIN, I.M. Absorvedores de radiação eletromagnética aplicados no setor aeronáutico. **Revista Ciência e Tecnologia**. 2000.

DORNHEIM, M. **F-117A Stealth Aircraft**. Aviation Week & Space Technology, Maio,1990.

EEONYX CORPORATION. World Wide Web: <<http://www.eeeonyx.com>> Acessado em março de 2007.

EMERSON, W. H. **Eletromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years**. IEEE Transactions on Antenas and Propagation. 21 (4), Julho, 383-388, 1973.

EMERSON, W. H. Eletromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years. **IEEE Transactions on Antenas and Propagation**. 21 (4), Julho, 383-388, 1973.

EMMERSON & CUMMING. World Wide Web: <http://www.eccosorb.com>. Acessado em março de 2008.

ETS LINDGREN, **EMC Testing**, acessado e disponível em: <<http://www.emctest.com>>, dezembro de 2005.

FAEZ, R.; MARTIN, I.M.; DE PAOLI, M.-A.; REZENDE, M.C. Influence of processing time and composition in the microwave absorption of EPDM/Pani blends. **Journal of Applied Polymer Science** 83 (2002) 1568-1575.

FAEZ, R.; MARTIN, I.M.; DE PAOLI, M.-A.; REZENDE, M.C. Microwave properties of EPDM/Pani-DBSA Blends. **Synthetic Metals** 119 (2001) 435-436.

FAEZ, R.; MARTIN, I.M.; DE PAOLI, M.-A.; REZENDE, M.C. Polímeros Condutores Intrínsecos e seu Potencial em Blindagem de Radiações Eletromagnéticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.10, nº 3, p. 130, 2000.

FAZENDA, J. M. R.; **Tintas e Vernizes – Ciência e Tecnologia**. Volume I; ABRAFATI - Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas e Vernizes; 1995a.

FAZENDA, J. M. R.; **Tintas e Vernizes – Ciência e Tecnologia**. Volume II; ABRAFATI Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas e Vernizes; 1995b.

FOLGUERAS, L. C. **Obtenção e Caracterização de Materiais Absorvedores de Microondas Flexíveis Impregnados com Polianilina**. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2005.

FREEMAN, T. **What is Imaging Radar?** Jet Propulsion Laboratory, acessado e disponível em: <<http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingradarv3.html>>, dezembro de 2005.

HOURQUEBIE, P.; OLMEDO, L. **Influence of structural parameters of conducting polymers on their microwave properties**. **Synthetic Metals** 65 (1994) 19-26.

HOURQUEBIE, P.; OLMEDO, L. Influence of structural parameters of conducting polymers on their microwave properties. **Synthetic Metals** 65 (1994) 19-26.

HOURQUEBIE, P.; OLMEDO, L.; JOUSSE, F. Microwave Properties of Conductive Polymers. **Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers**, v.3, Ed. Nalwa, H.S. John Wiley & Sons, 1997.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, **Laboratório de Integração e Testes - LIT**, acessado e disponível em: <<http://www.lit.inpe.br/>>, novembro de 2005.

INUI, T.; KONISKI, K.; ODA, K. Fabrications of broad-band RF- absorber composed of planar hexagonal ferrites. **IEEE Transactions on Magnetism**, 35 (5) 3148-3150, Part 1, Sep. 1999.

JOHNSON, R. N. **Radar-Absorbing Material: A Passive Role in an Active Scenario**. The International Countermeasure Handbook. 11th edition. 1992.

KAZANTSEV, Y.N.; APLETALIN, V.N.; SOLOSIN, V.S. ZUBOV. AS. **Advanced methods of measurements of reflections, back scattering, material characteristics, and some results of these measurements**. VI International Conference on Currentless Spin-Electronics, Moscou/Rússia, pp. 111-126, 1997.

KAZANTSEVA, N.E.; SHEVCHENKO, V.G.; TCHMUTIN, I.A.; PONOMARENKO, AT.; KLASON, C. **Control of electrodynamic and mechanical properties of highly filled magnetic fibers by changing processing conditions**. In: International Conference on Currentless Spin-Electronics, Moscou/Rússia, pp. 97-107, 1997.

KNOTT, E.F.; SHAEFFER, J.F.; TULEY, M.T. **Radar Cross Section, Its Prediction, Measurement and Reduction**. Artech House, Inc., p. 297, 1985.

LAIRD TECHNOLOGIES . World Wide Web: <http://www.lairdtech.com>>. Acessado em março de 2008.

LAX, B.; BUTTON, K. J. **Microwave Ferrites and Ferrimagnetics**. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1962.

LEE, S.M. **International Encyclopedia of Composites**. vol.6, VHC Publishers, New York, 1991.

LEHMAN. Disponível em: <<http://www.lehman-inc.com>>. Acesso em: março, 2008.

LIU, C.C.; WALTERS, A.B.; VANNICE, M. A. Measurement of electrical properties of a carbon black. **Carbon**, 33, nº12, 1699-1708, 1995.

LOCK, E.H.; SHCHEGLOV, V.I.; VASHKOVSKY, AV.; ZUBKOV, V.I. **Propagation of magnetostatic volume waves in ferrite films with a strip domain structure**. In: VI International Conference on Currentless Spin-Electronics, Moscou/Rússia, pp. 40-44, 1997.

MIACCI, M. A. S. **Determinação experimental do espalhamento monoestático de microondas por alvos de geometrias simples**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

MIACCI, M. A. S. **Sistemas de controle, aquisição e análise, para condição de campo distante para utilização em campo de antenas em câmara anecóica**. São José dos Campos: UNIVAP, 1999. (Trabalho de Graduação).

MIKHAILOVSKI, L.; CHEPARIN, V.; SEREBRIANNIKOV, S.; KITAYTSEV, A; SHILENKOVA, A; EREMTSOVA, L. **Hexaferrites for radioabsorbing materials**. In: VI International Conference on Currentless Spin-Electronics, Moscou/Rússia, pp. 93- 96, 1997.

MIKHAILOVSKY, L. K. **Radioabsorbing Currentless (spin) Media, Materials and Coatings**. Proceedings VIII International Conference on Spin Electronics – Section of International Conference on Gyromagnetic Electronics and Electrodynamics. Moscow – Rússia 1999.

NOHARA, E. L et. al. CTA/IAE/AMR – Centro Técnico Aeroespacial / Instituto de Aeronáutica e Espaço / Divisão de Materiais (São José dos Campos). “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. **Patente INPI - PI0100772-6. 2000.**

NOHARA, E. L. et. al. CTA/IAE/AMR – Centro Técnico Aeroespacial / Instituto de Aeronáutica e Espaço / Divisão de Materiais (São José dos Campos). Processamento de ferritas à base de Bário (Ba), Chumbo (Pb), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Escândio (Sc), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Titânio e Zinco (Zn) pelo processo de metalurgia do pó, visando aplicações de blindagem eletromagnética na faixa de 2-40 GHz nas áreas aeroespacial e afins. **Patente INPI - PI9907616. 2001.**

NOHARA, E. L. **Flight Test Principles and Practice.** Continuing Professional Development in Aerospace Course (CPDA)/University of Bristol/QinetiQ, Boscombe Down Facilities – United Kingdom Ministry of Defense. Notas de aulas, novembro 2005.

NOHARA, E. L. Materiais Absorvedores De Radiação (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos. **Tese (Doutorado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos. 2003.**

NOHARA, E. L. Relatório das atividades de estágio no Moscow Power Engineering Institute. Divisão de Materiais / Instituto de Aeronáutica e Espaço / Centro Técnico Aeroespacial. 2001.

NOHARA, E. L. **Stealth Aircrafts.** Aircraft Company MIG – Mikoyan and Gurevich. Moscow, Russia. Notas de aulas, maio de 2002.

NOHARA, E. L.; MARTIN, I.M.; REZENDE, M.C. Influência do Tamanho de Partícula de Ferritas MnZn na Absorção de Microondas (8-12 GHz). **IX Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica.** João Pessoa – Paraíba, 7-11 Agosto, 2000.

NOHARA, E. L.; MARTIN, I.M.; REZENDE, M.C. Processamento e Caracterização de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Baseados em Ferritas de Microondas. **47º Congresso Brasileiro de Cerâmica,** 15 a 18 de junho de 2003, João Pessoa - PB.

NOHARA, E. L.; REZENDE, M.C. Materiais Absorvedores de Radiação (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos

Magnéticos. **3º relatório anual de atividades de doutorado** – descrição das atividades desenvolvidas na Rússia, FAPESP, 10 de agosto de 2002.

PEREIRA, J. J. Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de microondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda X. **Tese de Mestrado**. Universidade de Taubaté, 2007.

PEREIRA, J.J. **Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Microondas via Medidas de Permissividade e Permeabilidade Complexas na Banda X**. Tese de Mestrado. Universidade de Taubaté, 2007.

SAAB, **Signature Management**, acessado e disponível em: <<http://www.saab.se>>, novembro de 2005.

SCHOEMANN, E.; Advances in ferrite microwave materials and devices. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**; 209 (1-2) 15-20; Feb. 2000.

SILVA, F. S. **Obtenção de Estruturas Híbridas Absorvedoras de Radiação Eletromagnética na Faixa de Microondas Aplicadas no Setor Aeronáutico (8-12 GHz)**. 2000. 107f.. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

SILVA, F.S. Obtenção de Estruturas Híbridas Absorvedoras de Radiação Eletromagnética na Faixa de Microondas Aplicadas no Setor Aeronáutico (8-12 GHz). **Tese (Mestrado em Ciências)**, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2000.

SLEMING, W. J. **An Introduction to Microwave Absorbent Materials**. Technical Reference from Plessey Materials. 1998.

STONIER, R. A. **Stealth Aircraft and Technology from World War II to the Gulf**. SAMPE Journal, 27(4), 9-17, 1991.

STONIER, R.A. Stealth Aircraft and Technology from World War II to the Gulf: Part II - Applications and Design. **Sampe Journal**, v.27, n. 5, p 9-18, 1991.

SWEDISH NAVY, **Marinen / Visbyklass**, acessado e disponível em:
<<http://www.marinen.mil.se/article.php?id=2596>>, dezembro de 2005.

UFIMTSEV, P.Y. Comments on diffraction principles and limitations of RCS reduction techniques. *Proceedings of the IEEE*, sl,v. 84, n.12, 1828-1851, dez, 1996.

US NAVY, **Surface Ship Images**, acessado e disponível em
<<http://www.chinfo.navy.mil/navpalib/images/ima-ship10.html>>, dezembro de 2005.