

**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
Coordenação da Graduação em Engenharia Elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Absorvedores Eletromagnéticos para Uso em Câmaras
Anecóicas**

Jerônimo Silva Rocha
jeronimo@dee.ufcg.edu.br

Orientador:
Marcelo Sampaio de Alencar

Campina Grande, março de 2006

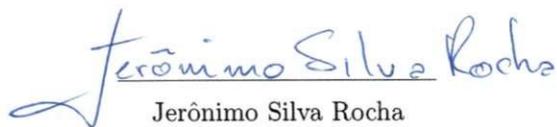


Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Absorvedores Eletromagnéticos para Uso em Câmaras Anecóicas


Jerônimo Silva Rocha

Jerônimo Silva Rocha
Aluno



Marcelo Sampaio de Alencar
Orientador

Campina Grande, 2006

Agradecimentos

A Deus pela generosidade com que tem me presenteado e pelas inúmeras vitórias alcançadas.
À minha família que tem acompanhado pacientemente minha longa jornada da graduação, mostrando compreensão nos momentos mais necessários.

Ao professor Marcelo Sampaio de Alencar pela orientação e amizade.

Às pessoas que contribuíram para realização deste trabalho: Erik Farias da Silva e Paulo Ribeiro Lins Júnior, graduandos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, à Shayenne Diniz da Nóbrega, graduada em Engenharia de Materiais pelo Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG.

E à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

1	Introdução	1
2	Compatibilidade e Interferência Eletromagnética	2
2.1	Compatibilidade Eletromagnética	2
2.2	Interferência Eletromagnética	2
2.3	Fontes de Interferência Eletromagnética	3
2.4	Emissão e Susceptibilidade	3
2.5	Ensaio de CEM/IEM	4
2.6	Normas	6
3	Câmaras Anecóicas	8
3.1	Câmaras Anecóicas	8
3.2	Desempenho de Câmaras Anecóicas	9
3.3	Absorvedores	9
3.4	Crítérios para Refletividade de Absorvedores	11
3.5	Projeto de Câmaras Anecóicas	12
4	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética	13
4.1	Materiais Absorvedores	13
4.2	Caracterização de Materiais Absorvedores	14
4.3	Técnicas de Medição da Refletividade	15
4.3.1	Arco NRL	16
4.3.2	Inserção entre Antenas	16
5	Etapa Experimental	18
5.1	Caracterização dos Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética	18
5.1.1	Testes com a Técnica do Arco NRL	18
5.1.2	Testes com a Técnica da Inserção entre Antenas	19
5.2	Resultados Obtidos	19
6	Conclusão	25

Lista de Figuras

2.1	Esquema de medição em uma área aberta livre.	5
2.2	Esquema de medição em uma câmara de reverberação.	5
2.3	Esquema de medição em uma câmara anecóica.	6
3.1	Câmaras anecóicas.	8
3.2	Câmaras semi-anecóicas.	9
3.3	Arranjos de absorvedores com pirâmides: (a) convencionais e (b) rotacionadas.	10
3.4	Arranjos de absorvedores com cunhas: (a) convencionais e (b) arranjo híbrido.	10
3.5	Arranjos de absorvedores: (a) telhas de ferrite e (b) grade de ferrite.	11
3.6	Absorvedores híbridos.	11
4.1	Estrutura cúbica (a) de face centrada, (b) de corpo centrado.	13
4.2	Estrutura hexagonal.	14
4.3	Esquema de montagem do arco NRL.	16
4.4	Esquema de montagem da técnica da inserção entre antenas.	17
5.1	Resultados obtidos com a técnica do arco NRL.	20
5.2	Resultados obtidos com a técnica do arco NRL.	20
5.3	Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-F.	21
5.4	Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-NF-F.	21
5.5	Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-F-G.	22
5.6	Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-G.	22
5.7	Resultados da técnica da inserção entre antenas para as maiores concentrações.	23
5.8	Resultados da técnica da inserção entre antenas para a mistura ES-G II com duas e três demãos.	24

Lista de Tabelas

3.1	Critérios de refletividade para absorvedores.	12
5.1	Proporções usadas na Técnica do Arco NRL	19
5.2	Proporções usadas no Método da Inserção Entre Antenas	19
5.3	Transmissibilidade obtida com o método da inserção entre antenas	23

GLOSSÁRIO

ABRICEM – Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética

Anatel – Agência Nacional de Telecomunicações

CCC – estrutura Cúbica de Corpo Centrado

CEM – Compatibilidade Eletromagnética

CFC – estrutura Cúbica de Face Centrada

CISPR – *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*

ES – Esmalte Sintético

MARE – Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

F – Ferrite

FCC – *Federal Communication Commission*

G – Grafite

IEM – Interferência Eletromagnética

LEMA – Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados

LISN – Rede de Estabilização de Impedâncias

NF – Negro de Fumo

NRL – *Naval Research Laboratory*

OATS – Área Aberta Livre

RCS – *Radar Cross Section*

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

Capítulo 1

Introdução

Equipamentos eletroeletrônicos emitem campos eletromagnéticos que não fazem parte do seu projeto, para o ambiente em que estão inseridos. Esses campos eletromagnéticos podem apresentar níveis de energia capazes de influenciar o funcionamento de outros equipamentos presentes no ambiente.

O ambiente eletromagnético pode ser definido por vários elementos, tais como a rede de energia elétrica, o tipo de edificação e equipamentos eletro-eletrônicos instalados. O ambiente eletromagnético pode ser alterado à medida que ocorrerem reformulações no **layout** dos equipamentos, na edificação e, principalmente, na instalação elétrica. A falta de compatibilidade eletromagnética acontece, por exemplo, quando as imagens de um televisor são afetadas pelo ruído induzido por um liquidificador ou outros equipamentos elétricos através da rede elétrica. Observe que este tipo de interferência pode ter conseqüências bem mais graves no caso de um marca-passo ou de equipamentos médicos, por exemplo.

É importante estudar os efeitos desses distúrbios e tentar minimizá-los. Esses estudos são, geralmente efetuados em câmaras especiais para esse tipo de teste, essas câmaras são conhecidas como câmaras anecóicas.

Este trabalho é parte de um projeto maior que é a construção de uma câmara anecóica para testes de compatibilidade eletromagnética, para o Laboratório de Comunicações (Labcom) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Capítulo 2

Compatibilidade e Interferência Eletromagnética

2.1 Compatibilidade Eletromagnética

Compatibilidade Eletromagnética é definida pela International Electrotechnical Commission (IEC) como a capacidade de um equipamento funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético sem introduzir ruído eletromagnético que cause distúrbios no funcionamento de outros equipamentos.

Afirmar que um dispositivo é compatível eletromagneticamente com outros dispositivos é garantir três características desse equipamento durante seu funcionamento [Fontgalland 2004]:

- que o nível de ruído eletromagnético proveniente desse dispositivo não cause interferência no funcionamento de outros equipamentos eletro-eletrônicos;
- que esse dispositivo não provoque auto-interferência;
- que esse equipamento não seja susceptível à interferência de outros equipamentos.

A crescente utilização de equipamentos eletro-eletrônicos, operando em frequências cada vez mais elevadas faz com que campos eletromagnéticos estejam presentes em quase todos os ambientes. Garantir que haja Compatibilidade Eletromagnética (CEM) entre equipamentos é uma tarefa importante a fim de prover seu correto funcionamento.

A natureza dos equipamentos eletro-eletrônicos é variada, uma das principais diferenças é justamente a necessidade ou não, de campos eletromagnéticos para seu funcionamento. Na maioria dos eletro-eletrônicos não é necessária a emissão ou recepção de ondas eletromagnéticas para que estes realizem suas funções, ao contrário, o campo gerado ou recebido, dependendo da intensidade, pode ser nocivo ao seu funcionamento.

2.2 Interferência Eletromagnética

A Interferência Eletromagnética (IEM) é caracterizada por uma perturbação eletromagnética que se propaga tanto no ar quanto por outros meios como a rede de distribuição de energia elétrica. Essa perturbação pode provocar degradação no desempenho de equipamentos.

Circuitos eletrônicos em geral produzem campos eletromagnéticos ao seu redor. Como consequência, há a transferência de energia eletromagnética entre o equipamento que gera a perturbação (fonte) e o equipamento que recebe a interferência (vítima), que pode ocorrer por indução, irradiação, condução ou efeitos combinados. Em todos os casos existe o envolvimento

de uma fonte de energia eletromagnética, um dispositivo que responde a esta energia e um caminho de transmissão que permite à energia fluir entre estes equipamentos.

A IEM é responsável por diversos tipos de problemas em equipamentos eletrônicos, dentre eles podem ser citados, falhas na comunicação entre dispositivos de uma rede de computadores, alarmes acionados sem motivo aparente, falhas esporádicas aleatórias e queima de circuitos eletrônicos [PAUL 1992, Ferreira e Faccione 2002].

2.3 Fontes de Interferência Eletromagnética

As fontes de IEM podem ser naturais e não-naturais. Exemplos de fontes naturais são ruídos atmosféricos decorrentes de descargas elétricas e ruídos cósmicos provocados por explosões no Sol. No caso de raios atingirem a rede de distribuição de energia elétrica, por exemplo, o distúrbio é propagado pelos fios até atingirem os equipamentos instalados nessa rede, podendo provocar diversos danos.

As fontes de IEM não-naturais são geradas tanto dentro de um ambiente predial como fora dele, por acionamentos de cargas indutivas como motores elétricos, equipamentos médicos, aparelhos de microondas, equipamentos de comunicação, entre outras.

Um ambiente com diversos equipamentos instalados está sujeito à IEM gerada por esses equipamentos, originadas em salas e prédios vizinhos ou em subestações de energia próximas. Os efeitos podem ser simples como ruído apresentado em um monitor de vídeo, danos irreparáveis como a perda de informações ou queima de unidades de disco rígidos de computadores.

Um ambiente eletromagnético não está restrito apenas a campos eletromagnéticos, mas também a sinais ruidosos na rede de distribuição de energia elétrica. Por exemplo, um equipamento eletrônico pode não estar sujeito a campos eletromagnéticos gerados por um outro equipamento próximo, mas pode sofrer uma interferência devido aos ruídos propagados na rede de alimentação elétrica. Portanto, fontes e receptores de IEM sempre existirão.

As causas básicas de IEM podem ser agrupadas em diversas categorias, desde efeitos de ruído externo, emissões espúrias de transmissores, variações de tensão na rede de alimentação de energia elétrica, transientes elétricos e até descargas eletrostáticas [Ferreira e Faccione 2002].

2.4 Emissão e Susceptibilidade

Os níveis de IEM são internacionalmente regulamentados por normas. A compatibilidade que um equipamento eletrônico deve apresentar com outros equipamentos é estabelecida pelos limites da sua capacidade de emissão de ruídos e pelos limites de tolerância à captação de ruídos, chamada de susceptibilidade. Imunidade é uma questão relacionada à interferência externa que pode prejudicar o funcionamento de um equipamento. Pode-se empregar o termo susceptibilidade em vez de imunidade. Susceptibilidade é definida como sendo a inabilidade de um dispositivo, equipamento ou sistema, desempenhar seu funcionamento sem degradação na presença de um distúrbio eletromagnético. Esses dois termos, na realidade, se referem ao mesmo efeito. Um equipamento estará susceptível acima de um certo nível de IEM e imune abaixo desse nível [PAUL 1992].

Assim, dependendo do meio de acoplamento, pode-se classificar os problemas de compatibilidade eletromagnética como [PAUL 1992]:

- Emissão Irradiada;
- Susceptibilidade Irradiada;
- Emissão Conduzida;

- Susceptibilidade Conduzida.
- Emissão Induzida;
- Susceptibilidade Induzida;

Emissão Irradiada

Um sistema apresenta Emissão Irradiada quando apresenta sinais irradiados que não fazem parte do projeto do sistema. Nesse caso, gabinetes, cabos de conexão, conectores e demais partes metálicas do sistema podem funcionar como antenas que irradiam energia eletromagnética. Como consequência, o ambiente eletromagnético no qual está inserido esse sistema fica eletromagneticamente poluído.

Susceptibilidade Irradiada

Susceptibilidade Irradiada acontece quando um determinado sistema apresenta uma configuração tal que seus componentes possuam a capacidade de captar ondas eletromagnéticas presentes no seu ambiente de funcionamento. Nesse sistema existe pelo menos um receptor em potencial, cujo funcionamento é afetado de alguma forma pela influência da energia eletromagnética interferente.

Emissão Conduzida

Ocorre quando os cabos de conexão, de aterramento, de energia elétrica e/ou de comunicações, conduzem correntes de interferência do equipamento para outro. Esta interferência pode contaminar toda a rede.

Susceptibilidade Conduzida

Susceptibilidade Conduzida existe quando um determinado equipamento recebe sinais interferentes por intermédio dos cabos de conexão e sofre alterações no seu funcionamento normal.

Emissão Induzida

Emissão Induzida ocorre quando um equipamento estando nas proximidades de outros equipamentos, induz campos eletromagnéticos nesses outros equipamentos causando alterações em seu funcionamento.

Susceptibilidade Induzida

Ocorre quando um equipamento apresenta problemas de funcionamento por causa de campos eletromagnéticos induzidos por outros equipamentos que estejam nas proximidades.

2.5 Ensaios de CEM/IEM

Existem ensaios que são realizados para determinar níveis de CEM/IEM de determinados equipamentos ou dispositivos, testando sua susceptibilidade à interferência externa, e testando sua capacidade de emitir ruídos para o ambiente à sua volta. Esses ensaios devem garantir principalmente:

- Repetibilidade nas medições, de forma a conferir validade aos resultados;

- Ausência de perturbações eletromagnéticas externas que produzam erros nos resultados.

Existem vários ambientes de testes para realização destes ensaios, dentre os quais é possível citar:

- Área aberta livre (OATS) - uma área aberta livre de obstáculos para evitar reflexões, exceto as do chão, a Figura 2.1 mostra o esquema de medição, d é a distância de medição;

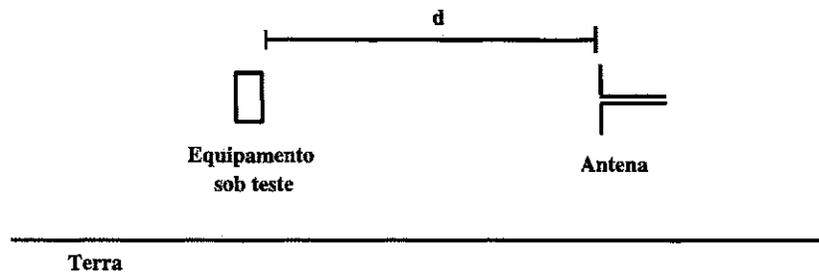


Figura 2.1: Esquema de medição em uma área aberta livre.

- Câmaras de reverberação - salas especialmente projetadas para que, em seu interior, as reflexões em suas paredes sejam maximizadas, a Figura 2.2 mostra o esquema de medição em uma câmara de reverberação;

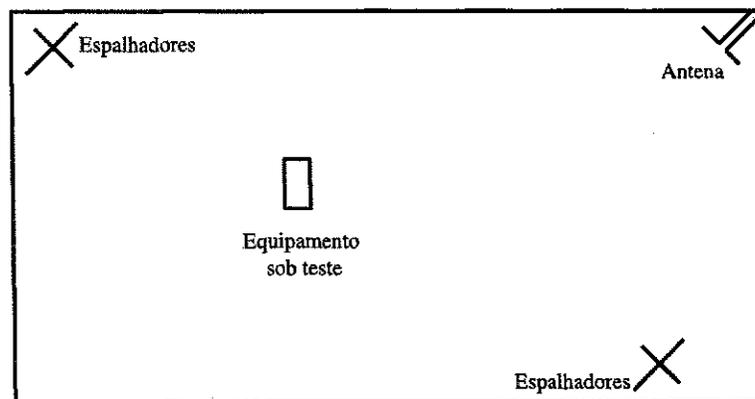


Figura 2.2: Esquema de medição em uma câmara de reverberação.

- Câmaras Anecóicas e Semi-anecóicas - salas projetadas de forma que as reflexões em seu interior sejam minimizadas, a Figura 2.3 mostra o esquema de medição em uma câmara anecóica.

Uma descrição mais detalhada sobre câmaras anecóicas é apresentada no próximo capítulo. As câmaras de reverberação não são descritas por não fazerem parte do escopo deste trabalho.

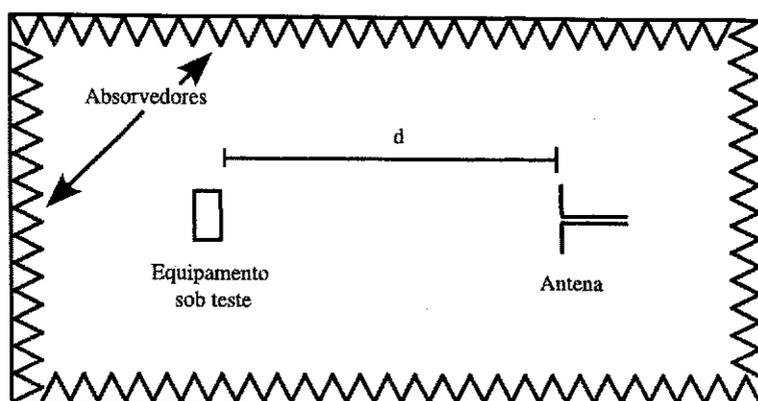


Figura 2.3: Esquema de medição em uma câmara anecóica.

2.6 Normas

Internacionalmente são adotadas normas e recomendações impostas por agências governamentais a fim de regulamentar limites para controle da poluição eletromagnética. Além das agências governamentais, os fabricantes de equipamentos fazem suas recomendações para que o usuário obtenha o melhor funcionamento de seus produtos.

As principais normas internacionais de CEM são as normas do CISPR (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*) que é responsável pela normatização da CEM na Europa e as normas da FCC (*Federal Communication Commission*) que estabelece as normas nos Estados Unidos [Krzyszak 2003].

São adotadas por esses órgãos de regulamentação, duas classes de equipamentos: equipamentos para fins comerciais e equipamentos para fins militares. Os limites de CEM/IEM para essas duas classes são diferentes.

Os limites regulamentados pela FCC para a IEM são divididos em duas categorias: IEM conduzida e IEM irradiada. A IEM conduzida é medida na faixa 450 kHz a 30 MHz usando um dispositivo que impede a entrada de ruído proveniente da rede de alimentação elétrica e mantém a impedância vista pelo equipamento constante na faixa de frequências da medição, esse equipamento é conhecido como rede de estabilização de impedâncias (LISN). A IEM irradiada é medida na faixa 30 MHz a 40 GHz e as medições devem ser realizadas em câmaras anecóicas ou OATS, levando em consideração a intensidade e polarização (vertical e horizontal) dos campos elétricos.

O CISPR adota uma divisão similar mudando as faixas de frequências de medição para as duas categorias. Para medições da IEM conduzida, os testes são feitos na faixa 150 kHz a 30 MHz. Para a IEM irradiada a faixa adotada é 30 MHz a 3 THz.

Os limites regulamentados para equipamentos militares são mais rigorosos e as faixas adotadas para medições são: DC a 26 GHz para IEM conduzida e 30 Hz a 40 GHz para IEM irradiada [PAUL 1992].

Para medição da IEM irradiada são adotadas três distâncias de medição de acordo com o rigor exigido pelo tipo de equipamento sob teste:

- 10 metros → Equipamentos Classe A;
- 3 metros → Equipamentos Classe B;
- 1 metro → Equipamentos para fins militares.

No Brasil diversas comissões foram estabelecidas pela Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética (ABRICEM) a fim de estabelecer os requisitos técnicos e normas para CEM/IEM. As normas brasileiras publicadas foram obtidas de versões traduzidas e adaptadas das normas européias do CISPR. A Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) publicou uma resolução (Resolução 237 - novembro/2000) relativa à certificação de equipamentos de telecomunicação considerando os aspectos de emissão, imunidade [ABRICEM 2005].

Capítulo 3

Câmaras Anecóicas

3.1 Câmaras Anecóicas

A idéia fundamental da câmara anecóica é simular o espaço livre em uma sala com espaço limitado.

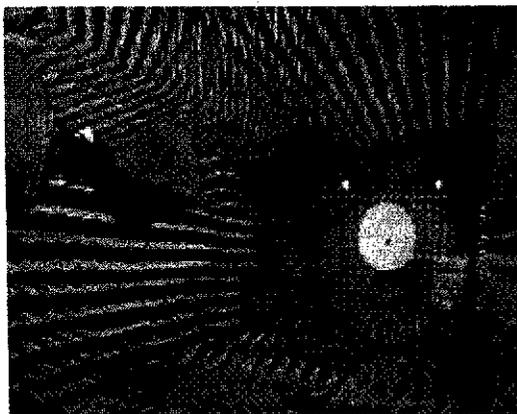
Fisicamente, uma câmara anecóica é uma sala com paredes, teto e piso metálicos, revestidos internamente com estruturas absorvedoras de radiação eletromagnética. Esses absorvedores são devidos à necessidade de minimizar reflexões no interior da câmara. As paredes metálicas funcionam como blindagem eletromagnética para prevenir a entrada de radiação na câmara.

Para simular o espaço livre, as dimensões da câmara têm que ser grandes comparadas com o comprimento de onda usado nas medições.

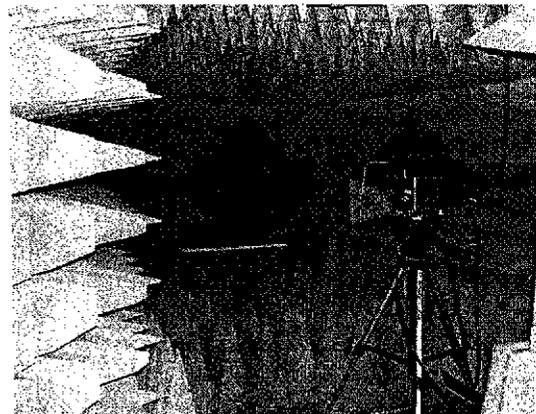
Uma câmara semi-aneecóica simula uma área aberta livre (OATS), em que não há reflexões nas paredes e no teto, com piso condutor. Por isso, distintamente de câmaras anecóicas, as câmaras semi-aneecóicas não utilizam absorvedores no piso, que deve ser virtualmente um plano condutor ideal [Holloway e Kuester 1994].

Bons resultados para câmaras anecóicas e semi-aneecóicas são obtidos facilmente em frequências acima de 300 MHz, contudo na faixa de 30 MHz a 300 MHz, são observadas altas discrepâncias com relação à comparação entre as medidas em seu interior e as medidas calculadas para uma OATS [Holloway e Kuester 1996]. Isso é devido ao comprimento de onda nessas frequências ser próximo das dimensões da câmara.

As Figuras 3.1 e 3.2 exemplificam câmaras anecóicas e semi-aneecóicas, respectivamente.

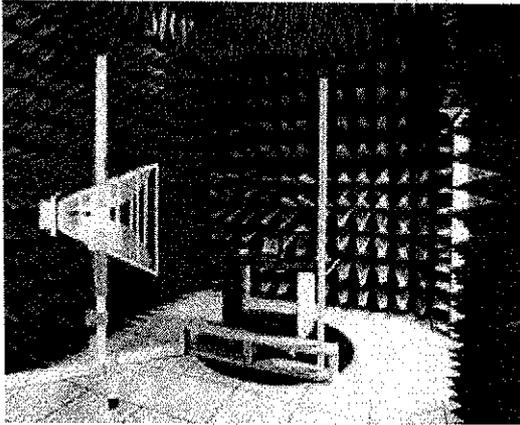


Fonte: <http://www.seaveyantenna.com>

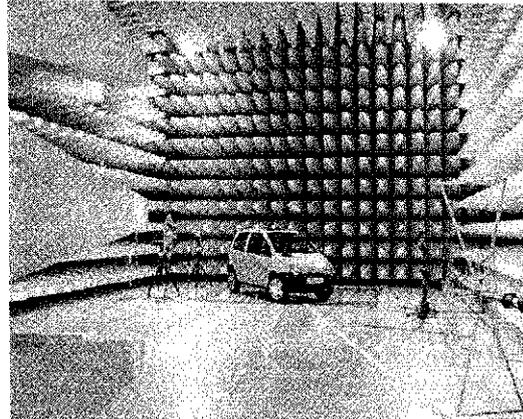


Fonte: <http://www.parkes.atnf.csiro.au>

Figura 3.1: Câmaras anecóicas.



Fonte: <http://wase.urz.uni-magdeburg.de>



Fonte: <http://www.us.tuv.com>

Figura 3.2: Câmaras semi-aneecóicas.

3.2 Desempenho de Câmaras Anecóicas

A primeira câmara anecóica foi construída por volta de 1950. Suas paredes eram feitas com bastões de cabelo animal impregnados com carbono. Esses absorvedores apresentavam 20 dB de absorção da radiação para um ângulo de incidência normal na faixa de 2,4 GHz a 10 GHz. Uma década depois, esses absorvedores foram substituídos por uma nova geração de absorvedores que apresentavam 40 dB de absorção, esses eram construídos em algum formato geométrico de forma a ampliar a absorção. Câmaras anecóicas construídas usando pirâmides de Poliuretano impregnado com grafite ou ferrite foram construídas no anos 1960 [Holloway et al. 1997].

O desempenho de uma câmara anecóica é determinado pela medida de uniformidade do campo medido em dezesseis pontos em uma superfície de teste, de 1,5 x 1,5 metros na faixa de 80 MHz a 1000 MHz. Se o campo medido variar menos que 6 dB em doze dos pontos, a câmara é considerada equivalente ao espaço livre e aceitável para testes de imunidade [Holloway et al. 1997]. Para testes de emissão o campo medido é comparado com o campo calculado para uma OATS, e a variação do campo medido em relação ao campo calculado não deve ultrapassar ± 4 dB. Os equipamentos usados nos testes, por exemplo as antenas, devem ser calibrados e não devem apresentar erros maiores que ± 1 dB [Holloway et al. 2002, Holloway e Kuester 1996].

A qualidade de uma câmara anecóica também pode ser descrita pela dimensão de sua zona de silêncio, região na qual o equipamento sob teste é posicionado na câmara, com variação do sinal abaixo de algum nível especificado. A dimensão desta zona é reduzida por reflexões nas paredes internas que podem ser diminuídas com o projeto adequado dos absorvedores que recobrem essas paredes [Valle 2000]. Assim é necessário não apenas recobrir a câmara com material absorvedor de radiação eletromagnética, os absorvedores devem ser projetados de forma que retenham o máximo possível da radiação incidente em sua superfície.

3.3 Absorvedores

As paredes metálicas de uma câmara anecóica são revestidas internamente com arranjos de absorvedores, geralmente cônicos piramidais que resultam em baixa reflexão da onda incidente para o interior da câmara.

Argumentos baseados em óptica geométrica ou óptica física são usados para explicar o baixo espalhamento do campo em altas frequências, ou seja, quando o comprimento de onda é pequeno comparado com o período do arranjo de absorvedores [Kuester e Holloway 1994].

A idéia dos absorvedores é que a geometria dos cones feitos com materiais absorvedores de radiação eletromagnética, resulta em uma onda incidente refletindo algumas vezes nas faces dos absorvedores adjacentes. Desde que estas pirâmides sejam relativamente grandes em relação ao comprimento de onda, suas faces refletem a onda entre os absorvedores. Em cada reflexão, parte da energia da onda é absorvida pelos cones. Como o número de reflexões é alto, a onda que reflete para o interior da câmara apresenta baixa energia.

As Figuras 3.3 a 3.6 apresentam os formatos mais utilizados na confecção dos absorvedores. Os absorvedores mostrados nas figuras são, geralmente, fabricados com espuma de Poliuretano impregnada com algum material absorvedor de radiação eletromagnética.

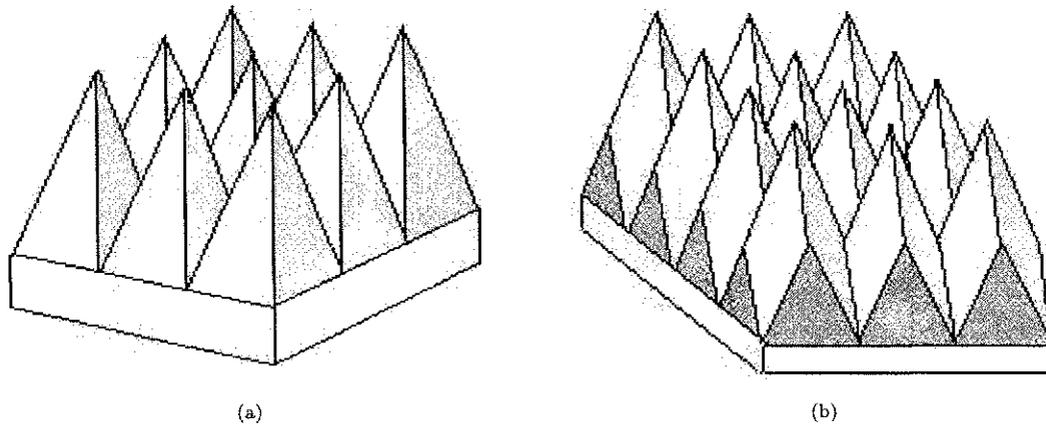


Figura 3.3: Arranjos de absorvedores com pirâmides: (a) convencionais e (b) rotacionadas.

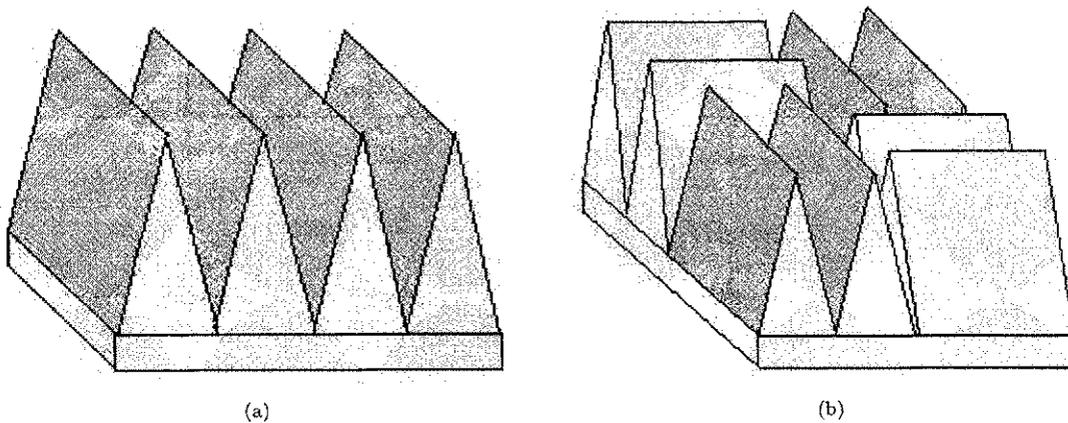


Figura 3.4: Arranjos de absorvedores com cunhas: (a) convencionais e (b) arranjo híbrido.

É comum a utilização de absorvedores híbridos, principalmente os que empregam as estruturas cônicas sobre telhas ou grades de ferrite, como mostra a Figura 3.6. Nesse tipo de absorvedor a onda que atravessa os cones é absorvida pela telha de ferrite, e viaja dentro desse absorvedor até ser refletida pela parede metálica da câmara. A porção da onda refletida pela parede é absorvida novamente pela telha de ferrite e a parte que chega aos absorvedores cônicos sofre novamente sucessivas reflexões, diminuindo ainda mais a onda que é refletida para o interior da câmara [Holloway et al. 1997].

As telhas de ferrite foram desenvolvidas no Japão nos anos 1960 como alternativa às pirâmides à base de Poliuretano, no projeto de câmaras anecóicas para a faixa de 30 MHz a 600 MHz.

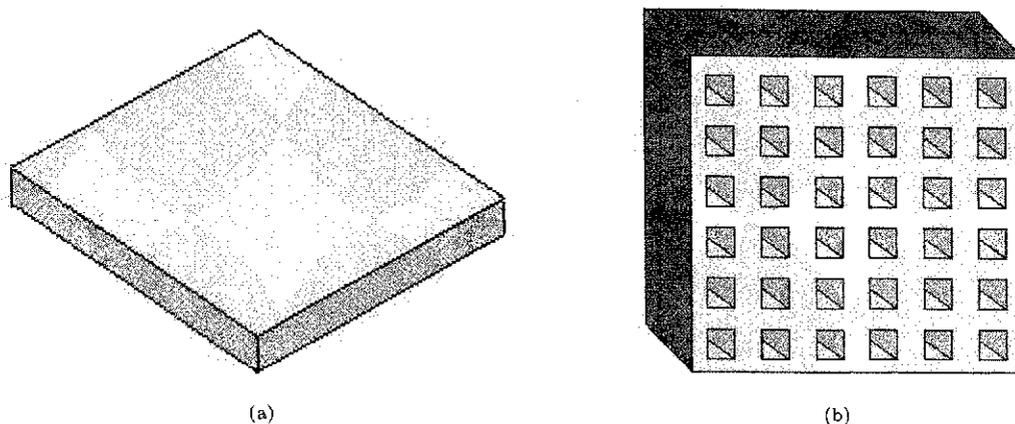


Figura 3.5: Arranjos de absorvedores: (a) telhas de ferrite e (b) grade de ferrite.

Essa faixa exigia maiores dimensões dos absorvedores piramidais.

A combinação de absorvedores cônicos com telhas de ferrite foi desenvolvida nos anos 1990 de forma que os absorvedores híbridos obtidos trabalhassem na faixa de 30 MHz a 1000 MHz, e também que fossem compactos em relação às pirâmides convencionais.

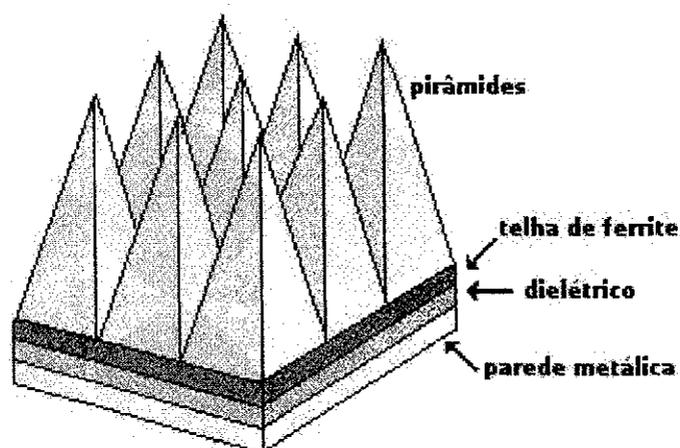


Figura 3.6: Absorvedores híbridos.

3.4 Critérios para Refletividade de Absorvedores

Para testes de imunidade de produtos comerciais especificados na norma IEC-1000-4-3, os absorvedores devem apresentar menos que -18 dB de reflexão para ângulo normal de incidência da onda, na faixa de 80 MHz a 1000 MHz.

Para testes de emissão, os critérios são mais exigentes. Os absorvedores devem apresentar refletividades diferentes tanto para o ângulo de incidência, quanto para a distância de medição. Para ensaios de emissão de equipamentos comerciais com distância de três metros, os valores da refletividade para incidência normal e 45° devem ser menores que -18 dB e -12 dB, respectivamente. Para distância de dez metros os valores devem ser menores que -20 dB e -15 dB, para incidência normal e 45°, respectivamente [Holloway et al. 1997].

Para testes de equipamentos militares, a refletividade apresentada pelos absorvedores deve ser menor que -6 dB e -10 dB para as faixas de frequência 50 MHz a 250 MHz e acima de 250 MHz, respectivamente.

A Tabela 3.1 resume esses critérios.

Tabela 3.1: Critérios de refletividade para absorvedores.

Aplicação da Câmara	Refletividade (dB)	Incidência (°)	Faixa (MHz)
Testes Militares	-6	90	50 a 250
	-10	45	acima de 250
Testes de Imunidade	-18	90	80 a 1000
Testes de Emissão			
Distância de 3 metros	-18	90	30 a 1000
	-12	45	30 a 1000
Distância de 10 metros	-20	90	30 a 1000
	-15	45	30 a 1000

3.5 Projeto de Câmaras Anecóicas

O projeto de câmaras anecóicas segue, geralmente, três etapas:

Determinação dos Materiais Absorvedores de Radiação

Nesta fase é realizada a caracterização dos materiais absorvedores para determinar o nível de absorção na faixa de frequências de trabalho da câmara. Essa caracterização justifica a adoção do material que é adotado para a câmara. No próximo capítulo, é descrita a caracterização dos materiais absorvedores.

Projeto dos Absorvedores

Nesta parte do projeto o formato dos absorvedores é estudado e escolhido de forma a ter o melhor desempenho possível na absorção das ondas incidentes e também de forma a obter uma maior zona de silêncio;

Projeto da Câmara

Nesta parte, a câmara propriamente dita é projetada e dimensionada para a faixa de frequência determinada para o trabalho.

Capítulo 4

Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

4.1 Materiais Absorvedores

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) podem ser divididos em absorvedores dielétricos e magnéticos. Os absorvedores dielétricos apresentam perdas elétricas associadas à sua permissividade elétrica (ϵ) e sua constante de perdas ($\tan(\delta)$) [Rezende et al. 2003]. Entre os absorvedores dielétricos pode-se citar: grafite, negro de fumo, fibra de carbono, polímeros condutores e partículas metálicas. Os absorvedores magnéticos dependem de sua permeabilidade magnética (μ) e características de histerese, os mais usados são ferrites com várias formulações e granulações [Dias et al. 2000].

De maneira simplificada pode-se dizer que os materiais absorvedores de radiação apresentam absorção de radiação eletromagnética devido a troca de energia da radiação eletromagnética por energia térmica [Pinho et al. 1999].

Como MARE, a ferrite é a mais utilizada devido a suas características de permeabilidade, permissividade e saturação magnética, podendo ainda apresentar características microestruturais relevantes como porosidade e tamanho de grão.

A ferrite existe segundo três variedades alotrópicas: alfa-ferrite, ou austenita, com estrutura cúbica de face centrada (CFC), estável até a temperatura de 910 °C, acima desta temperatura, ela se transforma em gama-ferrite com estrutura CFC. Acima de 1410 °C a ferrite apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), chamada de delta-ferrite, que é bastante utilizada como MARE. Essas estruturas são vistas na Figura 4.1.

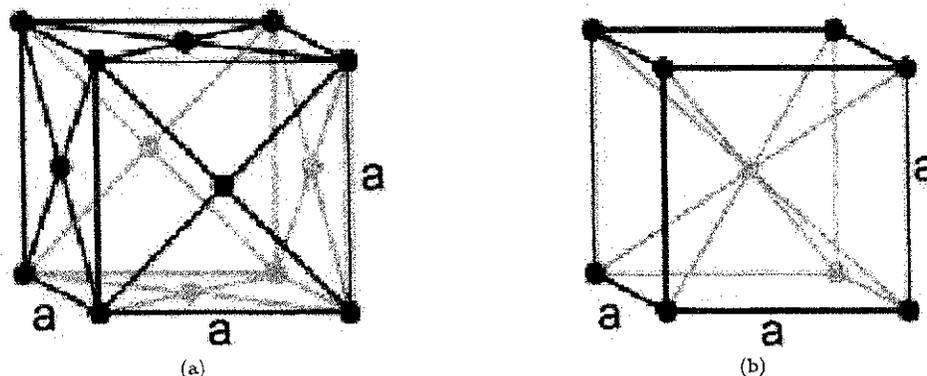


Figura 4.1: Estrutura cúbica (a) de face centrada, (b) de corpo centrado.

O grafite é uma forma alotrópica do diamante, do qual o único constituinte é o Carbono. Porém a estrutura atômica do grafite consiste em camadas muito distanciadas de átomos de Carbono empacotados hexagonalmente (ver Figura 4.2). O grafite se mostra refratário devido à sua alta condutividade térmica e elétrica, elevado ponto de fusão.

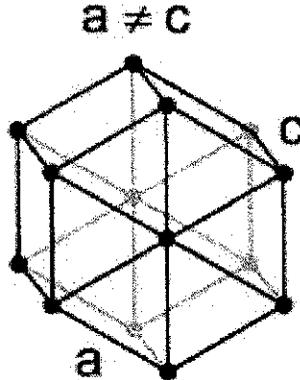


Figura 4.2: Estrutura hexagonal.

O negro de fumo é um aditivo polimérico orgânico que pode ser utilizado como carga, absorvedor de radiação e condutor elétrico. A concentração de negro de fumo na mistura polimérica melhora a absorção de radiação, assim como, as propriedades de condutividade elétrica. O negro de fumo deve ser dosado em baixa percentagem, de modo que não influencie a viscosidade final da mistura, pois apresenta uma granulação densa. Suas características são: difícil dispersabilidade, limitada estabilidade à luz e ao calor, elevada tendência à migração e elevada condutividade elétrica [Rabelo 1998].

4.2 Caracterização de Materiais Absorvedores

Materiais absorvedores de radiação eletromagnética são, geralmente, caracterizados pela comparação entre a magnitude da onda incidente e a magnitude da onda refletida. Para tal, o absorvedor é considerado como um plano infinito para fins de simplificação. Essa consideração só pode ser feita se as dimensões do absorvedor forem grandes comparadas ao comprimento de onda utilizado.

O coeficiente de reflexão Γ é dado por:

$$\Gamma = \frac{|\vec{E}_r|}{|\vec{E}_i|}, \quad (4.1)$$

em que:

- \vec{E}_i é o campo elétrico incidente e
- \vec{E}_r é o campo elétrico refletido.

O coeficiente de reflexão pode também ser expresso por [Hayashi et al. 1999]:

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_o}{Z_c + Z_o} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} + 1}, \quad (4.2)$$

em que:

- Z_c é a impedância do material;
- Z_o é a impedância do ar;
- μ_r é a permeabilidade complexa;
- ϵ_r é a permissividade complexa.

Alternativamente o desempenho é expresso pela Refletividade (R) em dB

$$R = 20 \cdot \log_{10}(|\Gamma|). \quad [dB] \quad (4.3)$$

Quanto menor a refletividade, melhor é o absorvedor.

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética podem ser também caracterizados pelo coeficiente de transmissão, dado por:

$$\tau = \frac{|\vec{E}_t|}{|\vec{E}_i|}, \quad (4.4)$$

em que:

- \vec{E}_i é o campo elétrico incidente e
- \vec{E}_t é o campo elétrico transmitido.

A transmissibilidade é expressa então, por

$$T = 20 \cdot \log_{10}(|\tau|). \quad [dB] \quad (4.5)$$

Quanto menor a transmissibilidade, maior é a absorção do material.

4.3 Técnicas de Medição da Refletividade

Os MARE podem ser caracterizados quanto à reflexão ou transmissão de ondas eletromagnéticas que incidem em uma superfície revestida pelo material, por diversas técnicas.

Dentre as técnicas de caracterização dos MARE, no que diz respeito à sua refletividade, as mais usadas são as denominadas de Arco NRL (*Naval Research Laboratory*) [Nohara 2003] e Seção Transversal do Radar (*Radar Cross Section - RCS*), também conhecida por Seção Reta Radar.

Ambas utilizam uma antena transmissora para incidir um sinal em um alvo e uma antena receptora para medir o sinal refletido. O alvo consiste de uma placa metálica com uma das faces revestida com o MARE.

Para medidas de RCS, a placa é posicionada em um suporte giratório, frontalmente a um antena transmissora/receptora em uma área aberta livre ou no interior de uma câmara anecóica, como é mais comum. O suporte é rotacionado em até 360° sendo a face metálica tomada como referência.

Com base nas características de transmissão, os MARE podem ser caracterizados por várias técnicas, destacando-se a técnica de medição por guia de onda, sendo medida a atenuação do sinal transmitido e recebido na saída do guia, e a técnica da inserção entre antenas. O coeficiente de transmissão é expresso em decibéis.

As técnicas adotadas neste trabalho são, a técnica do arco NRL e a técnica da inserção entre antenas. Essas técnicas de medição são detalhadas a seguir.

4.3.1 Arco NRL

O arco NRL é um dispositivo concebido na década de 1950 no Laboratório de Pesquisa Naval dos Estados Unidos (Naval Research Laboratory), para avaliar painéis absorvedores.

O arco consiste, basicamente, de uma estrutura eletromagneticamente transparente, geralmente madeira, que permite fixar um par de antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx), em uma variedade de ângulos. As antenas devem ser diretivas, normalmente são usadas antenas do tipo corneta. Cada antena é colocada em um suporte móvel e posicionada em qualquer lugar desejado ao longo do arco.

A estrutura do arco é projetada de modo a manter as antenas apontadas para o centro da amostra em teste. As antenas transmissora e receptora podem ficar próximas, mas a distância mínima deve respeitar a abertura do diagrama de irradiação das antenas em uso. O esquema de montagem do arco NRL é mostrado na Figura 4.3.

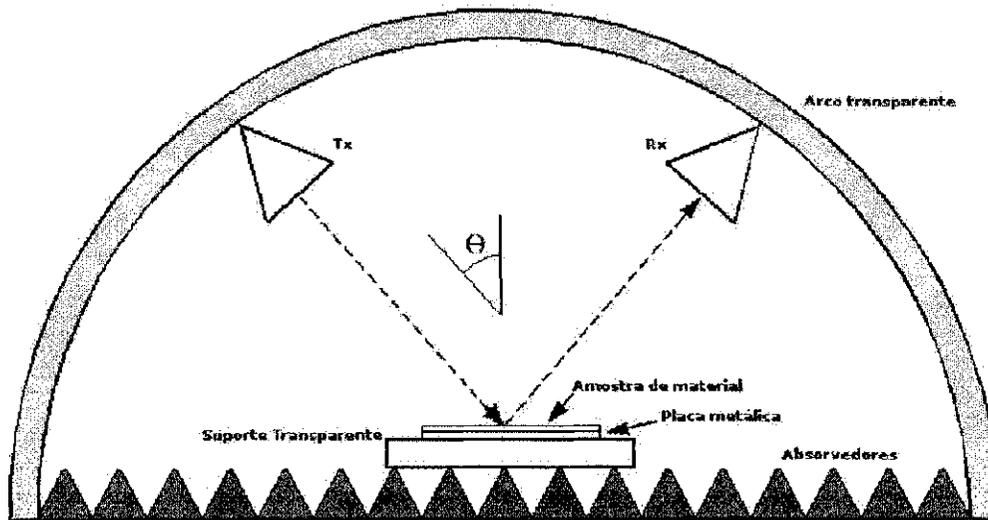


Figura 4.3: Esquema de montagem do arco NRL.

Normalmente é utilizada uma placa metálica com uma das faces revestida com o MARE. O conjunto amostra/placa metálica, é posicionado sobre um suporte eletromagneticamente transparente no centro da curvatura do arco. Uma placa metálica sem revestimento é tomada como plano condutor ideal de referência, ou seja, perfeitamente reflexivo.

O sistema de medidas é constituído por um gerador de sinal e um analisador de rede, além das antenas.

A refletividade é a diferença entre a medida para a placa de referência e a medida para a placa com a amostra.

A limitação de uso da técnica do arco NRL é a dificuldade para se medir a fase relativa do sinal refletido. Conseqüentemente, essa técnica é empregada apenas para caracterizar diretamente a amplitude da reflexão [Nohara 2003].

4.3.2 Inserção entre Antenas

No método da inserção entre antenas é obtido o coeficiente de transmissão do material. Esse método consiste em colocar duas antenas, uma transmissora (Tx) e uma receptora (Rx), em visada direta.

O método da inserção entre antenas deve ser efetuado em uma OATS ou em uma câmara anecóica.

O sinal de referência é obtido por emissão direta do sinal da antena transmissora para a receptora. Em seguida, o material sob teste é posicionado entre as duas antenas. Mede-se o sinal que chega à antena receptora. O coeficiente de transmissão é a diferença entre a leitura do sinal de referência e do sinal obtido com o material [Rezende et al. 2003].

A Figura 4.4 ilustra o arranjo da técnica da inserção entre antenas.

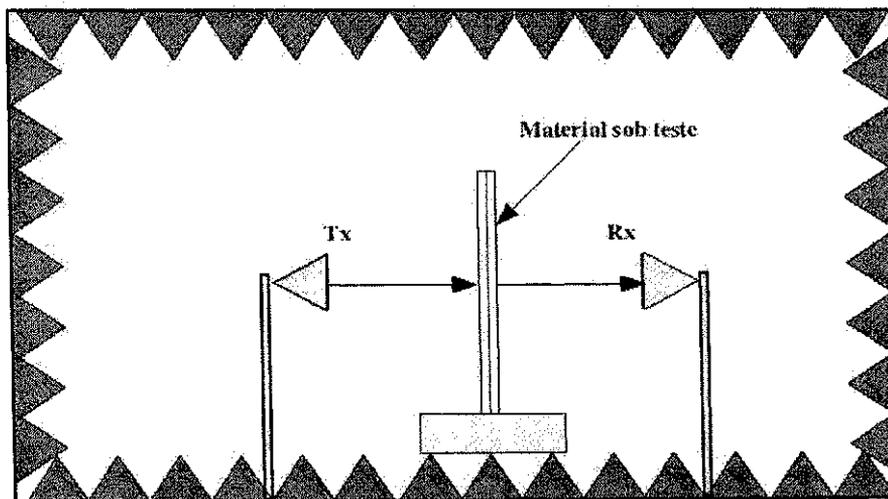


Figura 4.4: Esquema de montagem da técnica da inserção entre antenas.

Capítulo 5

Etapa Experimental

5.1 Caracterização dos Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

Os materiais absorvedores escolhidos foram: ferrite (F), grafite (G) e negro de fumo (NF). Esses materiais foram adicionados a esmalte sintético (ES) formando uma mistura para revestimento das placas para teste.

Foram escolhidas duas técnicas para análise dos materiais: a técnica do arco NRL e da inserção entre antenas. Ambas foram escolhidas pela simplicidade dos arranjos experimentais [Rocha et al. 2005].

Em ambas as técnicas, utilizou-se o artifício de misturar a amostra a ser medida com esmalte sintético, para dar aderência à placa.

Devido à falta de duas antenas cornetas de mesma faixa de trabalho no laboratório onde os testes foram realizados (LEMA - DEE/UFMG), optou-se por utilizar uma antena corneta como antena transmissora e uma antena diedro com ângulo de abertura de 60° como antena receptora. Ressalta-se ainda, a indisponibilidade de uma câmara anecóica para realização dos testes.

5.1.1 Testes com a Técnica do Arco NRL

Na técnica do arco NRL foi usada como base reflexiva uma placa quadrada de Poliestireno Expandido, conhecido como Isopor[®], com 40 cm de lado (maior que o maior comprimento de onda) e 8 mm de espessura (menor espessura suficiente para evitar dobras), com uma das faces revestida com papel alumínio. A refletividade dessa placa foi medida e comparada com a refletividade de uma placa de zinco. Os resultados foram idênticos, validando assim, a utilização do papel alumínio como alternativa para diminuição dos custos do experimento [Rocha et al. 2005].

As misturas com os MARE foram aplicadas na face revestida com papel alumínio de placas idênticas à placa base descrita. Quatro combinações de materiais, cada uma com cinco concentrações diferentes, em um total de vinte placas, foram confeccionadas.

O arranjo experimental foi calibrado usando a placa reflexiva de referência fixada em um suporte de madeira. As antenas foram posicionadas sobre uma mesa de madeira de forma a maximizar o sinal recebido. O sinal medido dessa forma foi considerado como referência para todas as medições efetuadas. Esta calibração reduziu os efeitos de possíveis reflexões ambientais, conferindo maior validade aos resultados obtidos.

A Tabela 5.1 mostra as proporções dos MARE na mistura ES-MARE para os testes do arco NRL. Na tabela, por exemplo, 90-10, significa que temos em uma mistura 90 % de esmalte sintético e 10 % de algum dos materiais.

Tabela 5.1: Proporções usadas na Técnica do Arco NRL

Material	Concentração dos Materiais Usados (%)				
	I	II	III	IV	V
ES-F	90-10	85-15	80-20	70-30	50-50
ES-NF-F	89-1-10	84-1-15	79-1-20	69-1-30	49-1-50
ES-F-G	80-10-5	80-15-5	72-20-8	60-30-10	50-35-15
ES-G	95-5	90-10	85-15	80-20	70-30

5.1.2 Testes com a Técnica da Inserção entre Antenas

No método da inserção entre antenas utilizou-se placas quadradas de Poliestireno Expandido (sem revestimento algum), com 40 cm de lado e 15 mm de espessura (espessura suficiente para evitar a necessidade de um suporte), como base eletromagneticamente transparente [Rocha et al. 2005].

Para a calibração do arranjo experimental, uma placa não revestida com a mistura foi colocada entre as antenas dispostas em visada direta, a uma distância de 1 m da antena receptora e o sinal medido foi usado como referência.

As misturas foram aplicadas em uma das faces de cada placa idêntica à placa base. Foram confeccionadas doze placas, sendo quatro combinações de MARE, cada uma com três concentrações diferentes. A Tabela 5.2 mostra as proporções de MARE na mistura ES-MARE.

Tabela 5.2: Proporções usadas no Método da Inserção Entre Antenas

Material	Concentração dos Materiais Usados (%)		
	I	II	III
ES-F	85-15	70-30	50-50
ES-NF-F	84-1-15	69-1-30	49-1-50
ES-F-G	80-15-5	60-30-10	50-35-15
ES-G	90-10	70-30	50-50

5.2 Resultados Obtidos

Com a utilização da técnica do Arco NRL, o sinal recebido pela antena receptora apresenta vários picos e vales alternados em frequências adjacentes. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram dois dos gráficos da refletividade (em dB) em função da frequência (em GHz) para quatro das proporções de misturas em teste, ES-F III, ES-NF-F III, ES-G III e ES-F-G III, escolhidos por apresentarem resultados mais significativos. Os demais gráficos mostraram resultados inconclusivos [Rocha et al. 2005].

A refletividade apresentada pelos materiais absorvedores de radiação eletromagnética, deve apresentar valores negativos, indicando que houve atenuação do sinal com relação à medida de referência. Contudo, nos resultados obtidos com o arco NRL, nota-se valores positivos de refletividade indicando que o sinal apresenta um ganho de amplitude em relação ao sinal de referência, que é um comportamento contrário ao que é esperado. Possíveis razões para esse resultado são a falta de controle de reflexões no ambiente de teste e a falta de uma blindagem eletromagnética que impeça a presença de campos eletromagnéticos exteriores ao ambiente.

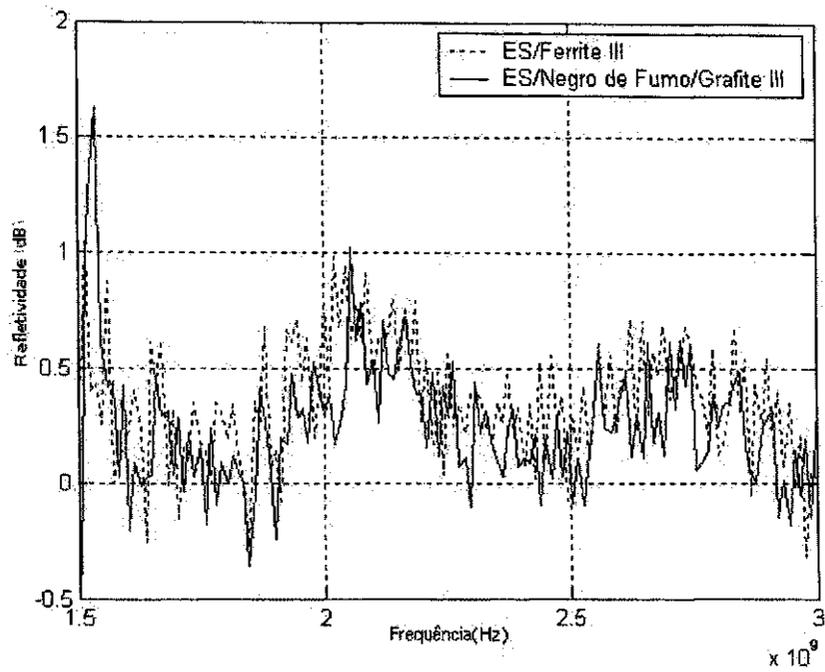


Figura 5.1: Resultados obtidos com a técnica do arco NRL.

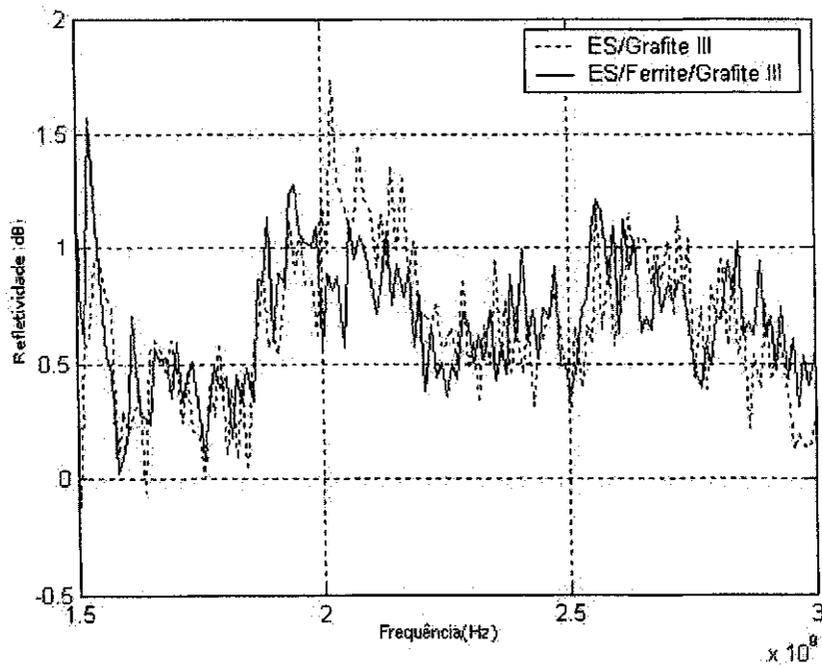


Figura 5.2: Resultados obtidos com a técnica do arco NRL.

Os resultados obtidos com o método da inserção entre antenas são apresentados nas figuras 5.3 a 5.6.

A refletividade dos materiais absorvedores de radiação eletromagnética deve apresentar valores negativos. A observação feita para os resultados da técnica do arco NRL, a respeito de valores positivos, também se aplica aos resultados obtidos com a técnica da inserção entre antenas.

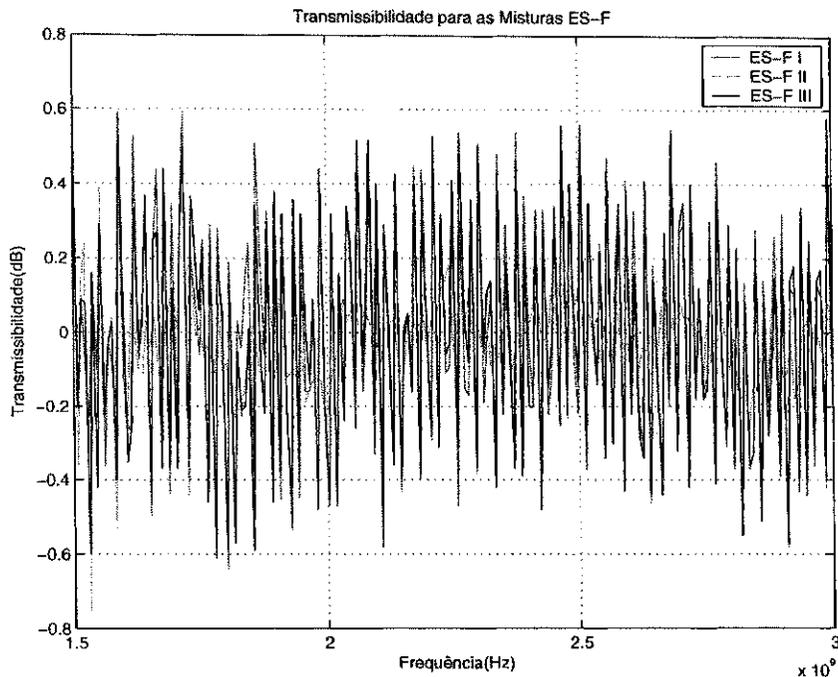


Figura 5.3: Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-F.

Na Tabela 5.3 é mostrada a atenuação média (em dB) para duas faixas de frequências com largura 600 MHz centradas em 1,80 GHz e 2,40 GHz.

Tabela 5.3: Transmissibilidade obtida com o método da inserção entre antenas

Material	Transmissibilidade Média (10^{-2} dB)					
	I		II		III	
	1.8 +/- 0.3 GHz	2.4 +/- 0.3 GHz	1.8 +/- 0.3 GHz	2.4 +/- 0.3 GHz	1.8 +/- 0.3 GHz	2.4 +/- 0.3 GHz
ES-F	-2.24	2.15	-2.78	2.20	-4.32	4.56
ES-NF-F	-3.37	3.95	-5.05	3.39	-7.12	3.32
ES-F-G	-2.51	1.15	-32.88	-15.05	-265.3	-198.1
ES-G	-4.29	0.85	-480.0	-411.4	-320.0	-232.1

De acordo com os resultados, a mistura cuja maior absorção média foi observada é aquela à base de grafite na proporção 70-30 (ES-G II) com atenuação máxima de 5,74 dB em 1,77 GHz. Observou-se ainda, que o segundo e terceiro melhores resultados foram, respectivamente, a mistura à base de grafite na proporção 50-50 (ES-G III) e a mistura à base de ferrite e grafite na proporção 50-35-15 (ES-F-G III). Este resultado sugere que não basta aumentar a proporção de grafite na mistura para obter maiores valores de absorção da radiação eletromagnética.

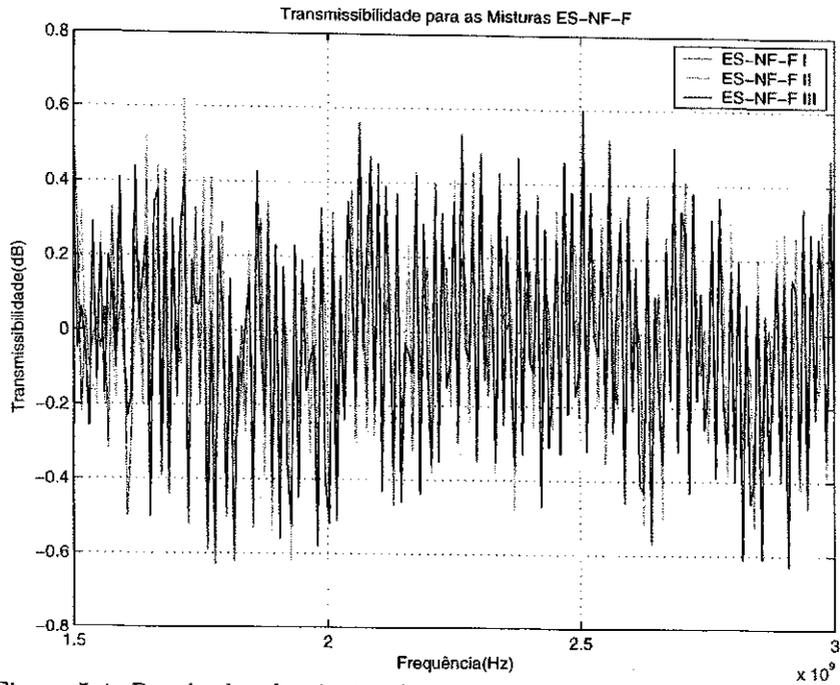


Figura 5.4: Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-NF-F.

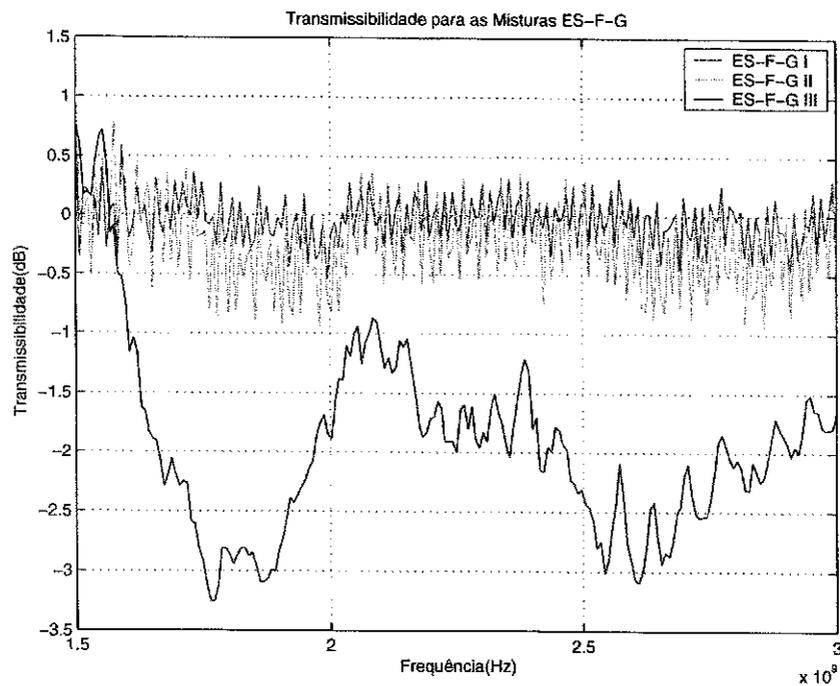


Figura 5.5: Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-F-G.

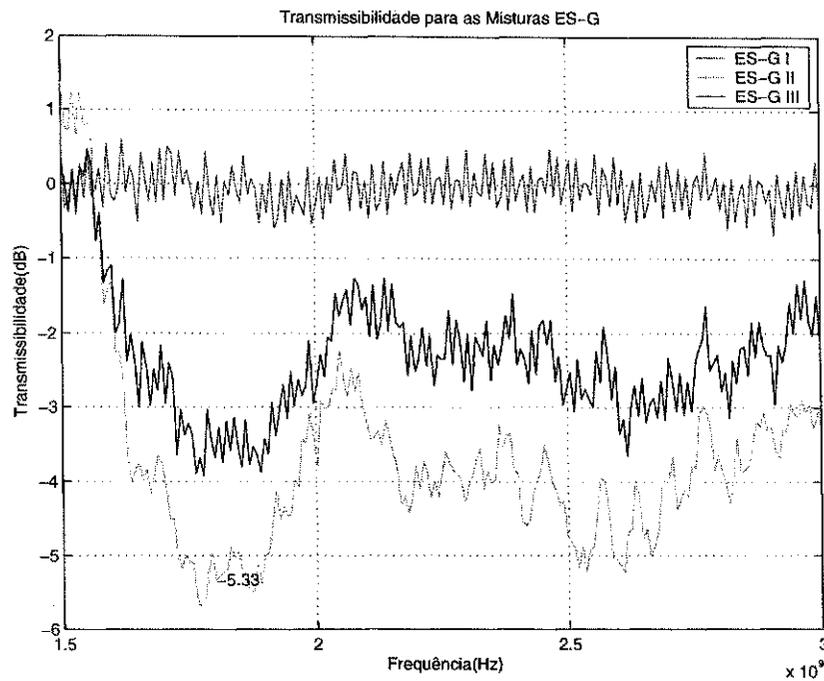


Figura 5.6: Resultados da técnica da inserção entre antenas para ES-G.

A Figura 5.7 mostra as medidas para as maiores concentrações de MARE utilizadas, a fim de comparar quais apresentam melhor resultado.

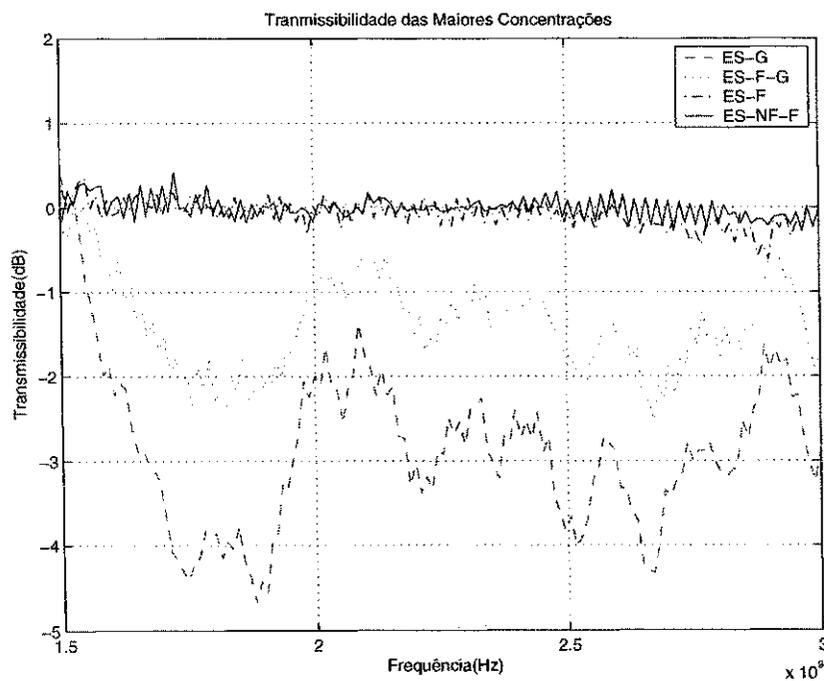


Figura 5.7: Resultados da técnica da inserção entre antenas para as maiores concentrações.

A fim de investigar um pouco mais sobre a mistura ES-G II utilizada nos testes da inserção

entre antenas, aumentou-se a espessura da camada desse material. Os resultados são mostrados na Figura 5.8, para duas e três demãos. A placa com três demãos apresenta menor transmissibilidade. Esse resultado mostra que camadas de materiais absorvedores mais espessas apresentam menor refletividade.

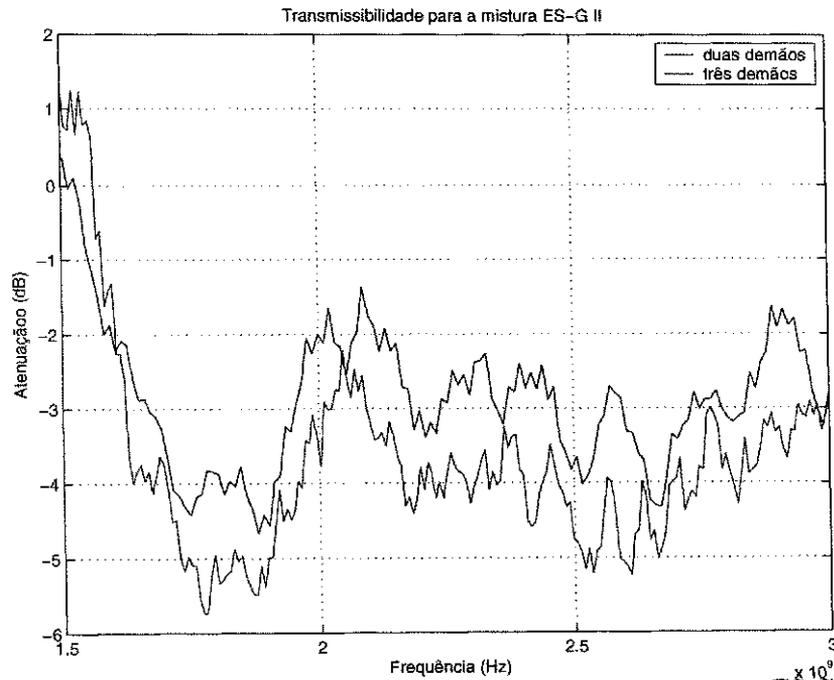


Figura 5.8: Resultados da técnica da inserção entre antenas para a mistura ES-G II com duas e três demãos.

Capítulo 6

Conclusão

O método da inserção entre antenas mostra que as misturas à base de grafite apresentam maior atenuação da radiação eletromagnética na faixa 1,5 GHz a 3,0 GHz. O método do arco NRL se mostrou inconclusivo na determinação de qual das misturas deve ser adotada na construção dos absorvedores, devido às variações observadas nos gráficos.

Os resultados do método da inserção entre antenas, porém, foram conclusivos. O melhor resultado por esse método foi obtido com a mistura ES-G II na proporção 70-30. Para essa concentração a atenuação média em toda faixa de frequências observada, foi de 3,7 dB que comparado com a literatura e levando em consideração a imperfeição do ambiente de teste (falta de uma câmara anecóica), se mostrou um resultado bastante satisfatório, estando bem próximo de resultados feitos por outros grupos de estudo com condições mais favoráveis (equipamentos calibrados, câmara anecóica). Além disso, a espessura da camada de material absorvedor aplicada nas placas (menores que 1 mm), que constitui um importante parâmetro a ser considerado são menores do que as apresentadas na literatura.

Aumentando a espessura da camada de material absorvedor os resultados podem ser melhorados.

Os resultados com o método da inserção entre antenas são conclusivos na faixa de 1,5 GHz a 3,0 GHz, contudo é necessário refazer os testes na faixa de 800 MHz a 3,0 GHz, que é a faixa na qual a câmara anecóica a ser construída deve operar.

Os testes com o arco NRL devem ser refeitos aumentando o rigor na preparação do ambiente de testes para evitar qualquer reflexão em obstáculos no ambiente. Com isso, pode ser que os resultados sejam conclusivos.

Referências Bibliográficas

ABRICEM. *Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética*. Disponível em: <http://www.abricem.com.br>, acessado em fevereiro de 2006, 2005.

DIAS, J. C.; SILVA, F. S.; REZENDE, M. C.; MARTIN, I. M. Absorvedores de radiação eletromagnética aplicados no setor aeronáutico. *Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 8, n. 15, p. 33-42, junho 2000.

FERREIRA, G. de S.; FACCIONE, M. Poluição e compatibilidade eletromagnética em sistemas de comunicação. *CTAI: Revista de Automação e Tecnologia da Informação Florianópolis*, v. 1, junho 2002.

FONTGALLAND, G. *Compatibilidade e Interferência Eletromagnética*. Transparências do curso, UFCG, Campina Grande, 2004.

HAYASHI, T.; INOUE, S.; SHIMADA, K.; TOKUDA, M. Anechoic chamber using foamed ferrite for immunity tests in the frequency range over 1 ghz. *IEEE - International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 256-259, maio 1999.

HOLLOWAY, C. L.; DELYSER, R. R.; GERMAN, R. F.; MCKENNA, P.; KANDA, M. Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic and chambers for emission and immunity testing of digital devices. *Transactions On Electromagnetic Compatibility*, v. 39, n. 1, fevereiro 1997.

HOLLOWAY, C. L.; KUESTER, E. F. A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays - ii: Computed and measured results. *Transactions On Electromagnetic Compatibility*, v. 36, n. 4, novembro 1994.

HOLLOWAY, C. L.; KUESTER, E. F. Modeling semi-anechoic electromagnetic measurement chambers. *Transactions On Electromagnetic Compatibility*, v. 38, n. 1, fevereiro 1996.

HOLLOWAY, C. L.; MCKENNA, P.; DALKE, R. A.; PERALA, R. A.; JR., C. L. D. Time-domain modeling, characterization, and measurements of anechoic and semi-anechoic electromagnetic test chambers. *Transactions On Electromagnetic Compatibility*, v. 44, n. 1, fevereiro 2002.

KRZESAJ, T. *O que é a Compatibilidade Eletromagnética?* Disponível em: http://www.wirelessbrasil.org/thomas_krzesaj/emcrf.html, acessado em outubro de 2005, 2003.

KUESTER, E. F.; HOLLOWAY, C. L. A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays - i: Theory. *Transactions On Electromagnetic Compatibility*, v. 36, n. 4, novembro 1994.

NOHARA, E. L. *Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados, dielétricos e revestimentos magnéticos*. Tese de doutorado, ITA, 2003.

PAUL, C. R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. USA: John Wiley & Sons Inc, 1992.

PINHO, M. S.; LIMA, R. C.; SOARES, B. G.; NUNES, R. C. R. Avaliação do desempenho de materiais absorvedores de radiação eletromagnética por guia de ondas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, outubro/dezembro 1999.

RABELO, M. F. *Aditivção de Polímeros*. [S.l.]: ETDA, 1998.

REZENDE, M. C.; NOHARA, E. V.; MARTIN, I. M.; MIACCI, M. A. S. Medidas de refletividade de materiais absorvedores de radiação eletromagnética usando as técnicas rcs e nrl. *Revista de Física Aplicada à Instrumentação*, v. 16, n. 1, p. 30–36, março 2003.

ROCHA, J. S.; NOBREGA, S. D. da; SILVA, E. F. da; LINS, P. R.; ALENCAR, M. S. de. Caracterização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética. *II Congresso de Iniciação Científica, 2005, Campina Grande*, 2005.

ROCHA, J. S.; NOBREGA, S. D. da; SILVA, E. F. da; LINS, P. R.; ALENCAR, M. S. de. Characterization of electromagnetic radiation absorber materials. *IEEE International Microwave and Optics Conference, Brasília*, 2005.

VALLE, R. *Fundamentos de Antenas - Um Curso Introdutório*. Editora Universitária - UFPB, 2000.