



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE MICROONDA E ÓPTICA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE METAMATERIAIS
BASEADOS EM GRADES DIELÉTRICAS**

Dissertação de Mestrado

Autor: Eduardo José Sartori – Eng.º

Orientador: Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre

Campinas
Julho, 2004



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE MICROONDA E ÓPTICA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE METAMATERIAIS
BASEADOS EM GRADES DIELÉTRICAS**

Dissertação de Mestrado

Autor: Eduardo José Sartori – Eng.º

Orientador: Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antônio Roberto Panicali – EPUSP - USP

Prof. Dr. Rui Fragassi Souza – FEEC - UNICAMP

Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa – FEEC - UNICAMP

Campinas, 19 de julho de 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sa77e Sartori, Eduardo José
Estudo experimental de metamateriais baseados em
grades dielétricas / Eduardo José Sartori. --Campinas,
SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Hugo Enrique Hernández Figueroa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Metamateriais. 2. Compatibilidade
eletromagnética. 3. Interferência eletromagnética. I.
Hernández Figueroa, Hugo Enrique. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica
e de Computação. III. Título.

RMS-BAE

RESUMO

Com o crescente aumento da taxa de utilização do espectro radioelétrico, principalmente em função do avanço e proliferação das comunicações móveis sem-fio, uma maior atenção vem sendo dada à área de Compatibilidade Eletromagnética, no sentido de se estabelecer critérios de controle e prevenção dos efeitos indesejáveis provocados pela Interferência Eletromagnética. Nesse sentido, esforços têm sido direcionados para o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias que possibilitem um controle mais adequado dos sinais de RF emitidos pelos mais diversos tipos de equipamentos. O estudo de metamateriais eletromagnéticos vem sendo cada vez mais justificado, uma vez que tais estruturas apresentam características bastante úteis para a construção de dispositivos de controle e supressão de campos eletromagnéticos indesejáveis.

O presente trabalho traz uma contribuição ao estudo dos metamateriais, discutindo o projeto, montagem e validação de um ambiente controlado para ensaios com estruturas periódicas inseridas em campos radiados, assim como todo um estudo do comportamento de grades dielétricas construídas com material de baixo custo, na faixa de frequência de 8,0 GHz a 13,0 GHz.

ABSTRACT

With the greater use of the radioelectric spectra, mainly due to the advance and proliferation of the wireless mobile communications, more attention is being given to the area of Electromagnetic Compatibility, trying to establish criteria of control and prevention of the undesirable effect caused by Electromagnetic Interference. In this sense, efforts have been directed aiming the development and application of new technologies that make possible a more adequate control of the signals of RF emitted from most types of equipments. The study of electromagnetic metamateriais is justified nowadays, since such structures present sufficiently useful characteristics for the construction of devices to control and to suppress undesirable electromagnetic fields.

The present work brings a contribution to the study of metamaterials, presenting the project, assembly and validation of a controlled environment for testing the effect of inserted periodic structures in radiated fields, as well as a study of the behavior of constructed dielectric gratings with a low cost material, in the frequency band from 8,0 GHz to 13,0 GHz.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Oswaldo e Elza,
às minhas irmãs, Elaine e Adriana,
e a essa pessoa maravilhosa que sempre me motivou,
em todos os aspectos de minha vida,
Milene H. Martins.*

... e a DEUS, tudo!

*“Ver-se-á que é muito difícil discernir
quais as propriedades que
cada coisa possui na realidade”.*

(Demócrito, Sec. VIII a .C)

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meus sinceros agradecimentos a todos que, de forma direta ou indireta, possibilitaram a conclusão deste trabalho.

Agradeço a DEUS, acima de tudo, pela minha vida e por tudo que recebo diariamente de suas mãos;

Ao Prof. Dr. Hugo E. H. Figueroa, por ter aberto portas tão importantes em minha vida profissional e pela orientação ao longo de todo esse trabalho;

Ao Prof. Dr. Antônio Roberto Panicali, talvez o maior responsável pelo meu interesse na área de eletromagnetismo, e pela sua grande amizade de sempre;

Ao Cláudio “Max” Zaina, grande amigo de longas conversas;

Aos colegas da Fundação CPqD, Victor Vellano Neto e Celso Pinto Saraiva, pelo apoio técnico dispensado ao projeto;

Ao Tarcísio Cordaro, da empresa Celestica do Brasil Ltda.;

Ao Laboratório de Eletromagnetismo Avançado “Prof. Dr. Rui Fragassi Souza”, FEEC/UNICAMP, implantado através do convênio UNICAMP e CELESTICA DO BRASIL LTDA., onde foram realizadas todas as atividades experimentais;

Aos grandes amigos do DMO: Kleber Zuza, Carlos Henrique, Kleucio, Luciano, Luiz Carlos, João Socas, Michel, Patrocínio, Cosme e a todos os colegas do DMO e FEEC;

Aos Srs. Julio Cesar Nicoli, Luis Felipe Mattos, Ivan Vigiato e Dirceu Vinardi, da empresa IME Ltda., pelo grande material técnico gentilmente cedido;

Ao Sr. Robert Sutton, vice-presidente da TDK RF SOLUTIONS Inc.- Austin – TEXAS – USA, pela doação de materiais técnicos e absorsores de RF;

Aos Srs. Rodger Gensel, Tom Moyer e Ron Moyer da empresa Amplifier Research, USA, pela vasta literatura técnica de EMC;

À empresa Andrew do Brasil Ltda., pela doação dos materiais absorsores de RF;

Ao Prof. João Loureiro, diretor da Escola SENAI “Roberto Mange” - Campinas, pela amizade e pelo grande exemplo de vida profissional e pessoal;

Ao Pe. Edward Dougherty, Presidente da ASJ e TV Século 21, por proporcionar um trabalho de apoio pessoal e espiritual sempre disponível para as horas mais críticas de nossas vidas;

Ao saudoso amigo Rogério Jacques de Moraes (*in memorian*), um grande incentivador de minha carreira, ainda quando trabalhava no CPqD;

À colega Cinthya Junqueira, do CTA, que foi uma das pessoas que me auxiliaram muito a dar continuidade ao meu trabalho;

Ao amigo Laerte R. Rubo, pelas grandes risadas e conversas sempre muito bem humoradas;

Ao Prof. Dr. Honório Cancilieri da UNIMEP, pelo grande incentivo dado à minha carreira acadêmica;

Ao Sr. Fernando Benjovengo do CCS-UNICAMP, pelo grande auxílio prestado na obtenção de materiais utilizados em meus trabalhos práticos,

À minha família, principalmente pela compreensão e apoio nesse novo rumo que decidi tomar;

E, finalmente, a essa pessoa para a qual não sei se encontraria palavra para agradecer por tudo que tem feito em minha vida, nos mais diferentes aspectos: Milene H. Martins.

Eduardo José Sartori

Campinas, 19 de julho de 2004

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro das seguintes instituições:

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq,
Convênio UNICAMP/CELESTICA

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	iv
AGRADECIMENTOS	vii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
INTRODUÇÃO	1
1. PRINCÍPIOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	2
1.1. Fontes, Receptores e Mecanismos de Acoplamento da EMI	3
1.1.1. Fontes Naturais	3
1.1.2. Fontes Artificiais	3
1.1.3. Receptores de EMI	4
1.1.4. Mecanismos de Acoplamento	5
1.2. Regulamentação da EMC no Brasil e no Mundo	8
1.3. Ensaaios de EMC	10
2. ESTRUTURAS PERIÓDICAS APLICADAS AO ELETROMAGNETISMO	17
2.1. Definição de Uma Estrutura Periódica	17
2.2. Estruturas Tipo "Banda Proibida" - PBG' e EBG's	24
2.3. Aplicações Especiais Utilizando Estruturas Periódicas – Metamateriais	26
3. DESENVOLVIMENTO DO AMBIENTE DE MEDIÇÃO	31
3.1. Definição da Estrutura Para Testes e Medições	31
3.2. Construção do Ambiente de Testes	38
3.3 Caracterização do Ambiente de Medições	45
3.4. Estudo Experimental com as Grades Dielétricas	50
3.5. Comentários Sobre os Resultados Obtidos	80

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	90
6. REFERÊNCIAS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.4.1: Acoplamento por meio radiado	6
Figura 1.1.4.2: Acoplamento da EMI por meio conduzido	6
Figura 1.1.4.3: Rádio de ondas médias interferindo em telefone	7
Figura 1.3.1: Esquema para ensaio de emissões radiadas segundo a norma CISPR 22	11
Figura 1.3.2: Onda plana no espaço livre	12
Figura 1.3.3: Exemplos de células TEM	13
Figura 1.3.4: Diagrama esquemático e interior de uma câmara blindada	14
Figura 1.3.5: (a) placa de absorvedor de ferrita; (b) absorvedor piramidal em isopor; (c) absorvedor híbrido; (d) absorvedor para incidência oblíqua; (e) parede absorvedora de ferrita	15
Figura 2.1.1: Estrutura microscópica de um dielétrico não-metálico	17
Figura 2.1.2: Lente de dielétrico artificial com esferas metálicas	18
Figura 2.1.3: (a) Esfera carregada, (b) Dipolo elétrico equivalente	19
Figura 2.1.4: Lentes de dielétrico não-metálico	22
Figura 2.1.5: Estruturas utilizadas na construção de ressoadores	24
Figura 2.2.1: Cristais PBG tipo 1-D, 2-D e 3-D	24
Figura 2.2.2: Exemplos de cristais fotônicos construídos em SiO ₂ (óxido de silício)	25
Figura 2.2.3: <i>Bandgap</i> para estruturas tipo furo, em distribuição hexagonal	25
Figura 2.2.4: Antena impressa com plano terra utilizando EBG's	26
Figura 2.3.1: Arranjo de fios condutores para produzir um meio efetivo com permissividade negativa.	27
Figura 2.3.2: Ressonador em anel dividido (SRR) para produzir um meio efetivo com permeabilidade negativa.	28
Figura 2.3.3: Combinação de fios metálicos e ressoadores em anel divididos criando um meio efetivo com ϵ e μ negativos.	28
Figura 2.3.4: Tipos diferentes de meios eletromagnéticos possíveis	30
Figura 3.1.1: Esquema de medição de [44]	31
Figura 3.1.2: <i>Helmholtz Coil</i> em versão comercial	32
Figura 3.1.3: Estrutura adaptada sugerida para a realização dos testes	33
Figura 3.1.4: Configuração das estruturas metamateriais	34

Figura 3.1.5: Ambiente utilizado por Hickman	35
Figura 3.1.6: Disposição geométrica espacial do EST utilizado em [47]	36
Figura 3.1.7: Estrutura aproximada para a disposição dos tubos.	37
Figura 3.1.8: Banda proibida, para modo TM, em função da distância a	38
Figura 3.2.1: Antena corneta e adaptador coaxial tipo N	39
Figura 3.2.2: Profundidade pelicular para o cobre, alumínio e aço	40
Figura 3.2.3: Dimensões do tubo de PVC utilizado	42
Figura 3.2.4: Tubos e adesivo próprio utilizados na confecção dos cristais (grades)	43
Figura 3.2.5.a: Célula unitária do cristal	43
Figura 3.2.5.b: Células unitárias construídas em PVC	44
Figura 3.2.6: Caixa metálica (câmara) depois de finalizada	44
Figura 3.3.1: Campo distante em função da frequência e dimensões de algumas antenas	45
Figura 3.3.2: Vista de topo da câmara. Mesa de madeira para suportar as grades dielétricas.	46
Figura 3.3.3: Analisador de redes Wiltron	46
Figura 3.3.4.a: Vista frontal da montagem de testes	47
Figura 3.3.4.b: Vista da parte traseira da câmara	47
Figura 3.3.5: Oclusão do orifício frontal da câmara.	48
Figura 3.3.6.a: Transmissão entre as antenas	49
Figura 3.3.6.b: Efeito de blindagem da câmara	49
Figura 3.3.7: Comparação entre transmissão e atenuação da câmara	50
Figura 3.4.1: Inserção de 1 célula unitária - modo TE	52
Figura 3.4.2: Inserção de 2 células unitárias - modo TE	53
Figura 3.4.3: Inserção de 3 células unitárias - modo TE	54
Figura 3.4.4: Inserção de 4 células unitárias - modo TE	55
Figura 3.4.5: Inserção de 5 células unitárias - modo TE	56
Figura 3.4.6: Inserção de 6 células unitárias - modo TE	57
Figura 3.4.7: Inserção de 7 células unitárias - modo TE	58
Figura 3.4.8: Inserção de 1 célula unitária - modo TM	59
Figura 3.4.9: Inserção de 2 células unitárias - modo TM	60
Figura 3.4.10: Inserção de 3 células unitárias - modo TM	61

Figura 3.4.11: Inserção de 4 células unitárias - modo TM	62
Figura 3.4.12: Inserção de 5 células unitárias - modo TM	63
Figura 3.4.13: Inserção de 6 células unitárias - modo TM	64
Figura 3.4.14: Inserção de 7 células unitárias - modo TM	65
Figura 3.4.15: Grades a 45° com a parede da câmara na região de entrada	67
Figura 3.4.16: Grades a 45° com defeito central	68
Figura 3.4.17: 7 células unitárias com separação equivalente a 1 célula	70
Figura 3.4.18: Idem 3.4.17, retirando-se a célula central	71
Figura 3.4.19: Afastamento de 1c a 4c	72
Figura 3.4.20: Afastamento de 1 célula	73
Figura 3.4.21: Afastamento de 2 células	73
Figura 3.4.22: Afastamento de 3 células	74
Figura 3.4.23: Afastamento de 4 células	74
Figura 3.4.24: Tubos perpendiculares à parede da região de entrada da câmara	75
Figura 3.4.25: Sonda de campo inserida no defeito das grades dielétricas	76
Figura 3.4.26: Curva de calibração da sonda	77
Figura 3.4.27: Influência da abertura da antena receptora sobre a calibração da sonda	77
Figura 3.4.28: Medição com a sonda na região do defeito das grades	78
Figura 3.4.29: Curva de atenuação do material absorvedor de RF	79
Figura 3.5.1.a: Resultados das medições em modo TM	81
Figura 3.5.1.b: Resultados das medições em modo TE	81
Figura 3.5.2.a: Incidência modo TM	82
Figura 3.5.2.b: Incidência modo TE	82
Figura 3.5.3: Incidência sobre a região diametral dos tubos	83
Figura 3.5.4: Resultado para modo TM sobre 21 camadas de tubos de PVC (7 células unitárias)	84
Figura 3.5.5: Resultado para modo TE sobre 21 camadas de tubos de PVC (7 células unitárias)	85
Figura 3.5.6.a: Modo TM	86
Figura 3.5.6.b: Modo TE	87
Figura 3.5.7: Interferência construtiva causada por descontinuidade em uma estrutura periódica	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.1 - Características de estruturas utilizadas em dielétricos artificiais	21
Tabela 2.1.2: Propriedades de alguns materiais dielétricos	22
Tabela 3.2.1: Características técnicas da antena corneta	39
Tabela 3.2.2: Características técnicas do material absorvedor de RF	41
Tabela 3.2.3: Ficha técnica do analisador vetorial de redes	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
Anatel	- Agência Nacional de Telecomunicações
Aneel	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	- American National Standards Institute
Anvisa	- Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CENELEC	- Comité Européen De Normalisation Electrotechnique
CISPR	- Comité International Spécial Des Perturbations Radioélectriques
EBG	- Electromagnetic Band Gap
EMC	- Electromagnetic Compatibility
EMI	- Electromagnetic Interference
ESD	- Electrostatic Discharge
EST	- Equipamento Sob Teste
ETSI	- European Telecommunications Standards Institute
FCC	- Federal Communication Commission
IEC	- International Electrotechnical Commission
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia
ITU	- International Telecommunication Union
MIL-STD	- Military Standard
MINCOM	- Ministério das Comunicações
PBG	- Photonic Band Gap
RF	- Rádio-Frequência
RNI	- Radiação Não-Ionizante
S21	- Relação entre sinal de saída pelo sinal de entrada em um sistema.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Distância entre centros dos tubos [m]
- c - velocidade da luz no vácuo [3×10^8 m/s]
- ε - Permissividade Elétrica [F/m]
- E** - Campo Elétrico [V/m]
- ε_0 - Permissividade no Vácuo [$1/36\pi \times 10^{-9}$ F/m]
- f - Frequência [Hz]
- f_c - Frequência de corte [Hz]
- f_{bg} - Frequência de banda proibida [Hz]
- H** - Campo Magnético [A/m]
- k - índice que define o intervalo de frequência onde ocorre a banda proibida
- λ - Comprimento de onda [m]
- μ - Permeabilidade magnética [H/m]
- μ_0 - Permeabilidade magnética no vácuo [$4\pi \times 10^{-7}$ H/m]
- r - Raio dos tubos [m]
- S** - Espalhamento

INTRODUÇÃO

O presente trabalho vem trazer à comunidade científica e aos estudos de Compatibilidade Eletromagnética, algumas contribuições não somente sob o aspecto técnico, como também sob o aspecto econômico, de substancial importância para a redução de custos dos processos produtivos. As principais contribuições deste trabalho são:

- O desenvolvimento e validação de uma metodologia de testes e medições para o estudo de estruturas periódicas eletromagnéticas especiais;
- A obtenção de resultados satisfatórios, obtidos a partir do estudo de estruturas dielétricas metamateriais construídas com materiais de baixo custo, em relação aos normalmente utilizados (alumina, acrílico);
- Disponibilização da estrutura de testes e medições para ensino didático de algumas técnicas normalmente empregadas em Compatibilidade Eletromagnética;
- Apresentação de um resultado interessante, utilizando as estruturas de baixo custo, para o controle da seletividade na transmissão de sinais entre dois pontos, com significativa redução de material. Esse resultado em particular (vide seção 3.5), não foi observado até o presente momento nas publicações científicas consultadas sobre o assunto.

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

- O **Capítulo 1** apresenta uma idéia geral sobre os conceitos e aplicações da Compatibilidade Eletromagnética, que é um dos motivadores do presente trabalho;
- No **Capítulo 2** é apresentada uma discussão teórica sobre estruturas periódicas aplicadas em eletromagnetismo, conceito de metamateriais e estruturas de banda proibida;
- A construção e validação do ambiente de medição, construção das grades dielétricas, estudos de seu comportamento e análise dos resultados são objetos de discussão do **Capítulo 3**;
- No Capítulo 4 é apresentada a conclusão do trabalho e no Capítulo 5, sugere-se os trabalhos que deverão ser desenvolvidos futuramente.

1. PRINCÍPIOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)

Nos últimos vinte anos, tem-se observado um avanço tecnológico sem precedentes, para os mais diversos setores da sociedade produtiva. Sem dúvida nenhuma, um desses setores que teve e continua tendo um papel crucial para esse avanço é o de Tecnologia da Informação, que une vários aspectos tecnológicos tais como telecomunicações, eletrônica, informática, logística etc.

É cada vez maior a necessidade da disponibilidade de grandes quantidades de informações, à velocidades também cada vez mais altas. Em outras palavras, deseja-se ter flexibilidade total para acessar e processar informações em quaisquer que sejam as situações e em qualquer ponto do planeta.

Os recursos mais desenvolvidos e adotados para essa finalidade, no setor de telecomunicações, têm sido a *fibra óptica* e as chamadas *comunicações sem-fio*. No primeiro, garantem-se altas taxas de transmissão, com baixíssimo ruído. Já no caso das comunicações sem-fio, a maior vantagem é o seu alto grau de mobilidade, uma vez que não depende de cabos ou condutores de conexão, em geral.

Porém, a utilização maciça das comunicações sem-fio vem ocasionando um problema sério, o qual vem sendo mais evidenciado à partir da disseminação da *telefonia móvel celular* (mais acentuado a partir do final da década de 1980).

Esse problema é denominado “Interferência Eletromagnética (do inglês – *EMI – Electromagnetic Interference*)” [1]. Isso ocorre devido à geração e transmissão de sinais de RF (rádio-freqüência), utilizados nas comunicações sem-fio, que estão presentes desde poucos kHz até dezenas de GHz [2].

Esses sinais podem causar interferências em equipamentos, sistemas e instalações, ocasionando desde mau funcionamento até graves acidentes. Outra questão sobre EMI, ainda mais recente [3], é a relacionada à possibilidade de campos eletromagnéticos desencadear processos nocivos nos seres vivos. Este é o campo de estudo denominado de Efeitos Biológicos de Radiações Não-Ionizantes (RNI). Essa questão é extremamente polêmica, pois ainda não há evidências suficientes que atestem positiva ou negativamente quanto ao problema.

Conforme apresentado pelo documento "*Vocabulário Eletrotécnico Internacional: Compatibilidade Eletromagnética*" da ABNT, Interferência Eletromagnética (do inglês - *EMI - Electromagnetic Interference*) é a degradação do desempenho de um equipamento, canal de transmissão ou sistema, causada por uma perturbação eletromagnética.

Da mesma forma, Compatibilidade Eletromagnética (do Inglês - *EMC - Electromagnetic Compatibility*) é a capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema para funcionar satisfatoriamente no seu ambiente eletromagnético, sem introduzir ou receber perturbação eletromagnética intolerável em tudo que se encontre nesse ambiente.

A Interferência Eletromagnética pode ocorrer de maneira *inter-sistêmica*, quando se propaga entre sistemas distintos (ex.: microcomputador interferindo em um rádio FM) e *intra-sistêmica*, quando ocorre entre componentes de um determinado sistema isolado (ex.: zumbido nos alto-falantes produzido pelo ruído da fonte de alimentação de um sistema de áudio).

1.1. Fontes, Receptores e Mecanismos de Acoplamento da EMI

1.1.1. Fontes Naturais

A EMI, como já exposto, é a degradação do desempenho de um equipamento, canal de transmissão ou sistema, causada por uma *perturbação eletromagnética*. As origens ou fontes de tais perturbações podem ser *naturais* ou *artificiais*.

O exemplo mais comum de fonte natural é a descargas atmosférica (raios), a qual pode causar grandes prejuízos ao atingir instalações e equipamentos sem devida proteção, além do Sol.

Um outro tipo de fonte de EMI são as *radiações ionizantes*, causadas por substâncias naturalmente radioativas (ex.: jazidas de Urânio).

1.1.2. Fontes Artificiais

Praticamente todo equipamento eletroeletrônico constitui uma fonte potencial de EMI, mas há casos em que são mais facilmente observados, tais como:

- sistema de ignição de automóveis (faiscamento das velas);
- escovas de motores elétricos;
- sistemas de informática (computadores em geral) e periféricos;
- circuitos chaveados (ex.: fontes de alimentação);
- sistemas de comutação de energia (chaves de manobra, contadores, etc.);
- estações e transmissores de radiodifusão;

- máquinas operatrizes em geral;
- telefones sem fio e celulares;
- reatores de lâmpadas fluorescentes;
- controles de luminosidade ("*dimmer*");
- eletrodomésticos, brinquedos eletrônicos;
- sistemas de comunicação sem-fio;
- equipamentos de CD ("*CD Players*");
- esteiras rolantes (descargas eletrostáticas);
- materiais sintéticos em atrito(ex.: estofamento de automóveis);
- Explosão Nuclear (pulso nuclear)

Estes são apenas alguns exemplos de possíveis fontes de EMI, uma vez que, com a velocidade em que se desenvolve a tecnologia, novos tipos de fontes vão surgindo a cada dia.

1.1.3. Receptores de EMI

Tão importante quanto as fontes são os receptores de EMI. O princípio de antenas [4] pode ser aplicado a um equipamento ou sistema, em relação à sua emissão e susceptibilidade a EMI, ou seja, um equipamento que emite ou produz muita EMI constitui-se também em um ótimo receptor para os sinais indesejáveis. Dessa forma também, equipamentos que produzem menos EMI, são mais imunes aos seus efeitos. Como exemplos de receptores de EMI, podem-se citar:

- sistemas de comunicações (convencionais e sem-fio);
- sistemas informatizados;
- equipamentos científicos;
- equipamentos médicos e hospitalares;
- sistemas de geração e distribuição de energia;
- seres vivos.

No caso dos seres vivos (humanos, animais e plantas), o assunto vem sendo objeto de grande discussão[3] em todo o meio científico, envolvendo inúmeros profissionais de áreas como Medicina, Engenharia, Física, Biologia, etc., pois ainda não se conhece devidamente os possíveis efeitos da exposição de seres vivos aos campos eletromagnéticos, principalmente àqueles gerados pelos sistemas de comunicação sem fio e de telefonia móvel (telefonia celular). Alguns efeitos das radiações não-ionizantes-RNI são mais fáceis de serem observados, como por exemplo, altas frequências com altas potências (ex.: forno de microondas) onde o efeito térmico dessa combinação é desastroso para os tecidos vivos, principalmente glândulas (fígado, testículos, tireóide), olhos e tendões. O maior problema, no entanto, está em se determinar qual ou quais poderiam ser as conseqüências a médio e longo prazos, da exposição de seres vivos a todo tipo de campos eletromagnéticos, incluindo os de baixa frequência. Muito se fala até da possibilidade de ocorrência de alguns tipos de câncer [5] em função da exposição às radiações não-ionizantes, mas ainda não há um estudo conclusivo para tal. Normalmente, esses estudos podem levar muitos anos até que sejam obtidos dados suficientes para uma conclusão mais concreta.

1.1.4. Mecanismos de Acoplamento

Tão importante como as fontes e os receptores de EMI é a maneira como se dá a propagação e o acoplamento desses sinais. Através da identificação da forma (ou formas) de acoplamento da EMI em um determinado caso é que se pode elaborar e aplicar a melhor forma de solução.

A EMI pode ocorrer através dos seguintes meios [6]:

- **emissão radiada:** os sinais se propagam da fonte até à vítima utilizando essencialmente o espaço livre (ar). A vítima atua como uma "antena" receptora para o sinal interferente. Alguns exemplos: ruídos de ignição automotiva percebidos em televisores, microcomputadores prejudicando a recepção de um rádio portátil, etc (**Figura 1.1.4.1**);
- **emissão conduzida:** nesse caso, o sinal interferente da fonte até à vítima utiliza-se de um meio condutor, através de fios, cabos, malhas de aterramento, bastidores metálicos, calhas e esteiras para cabos, etc (**Figura 1.1.4.2**);

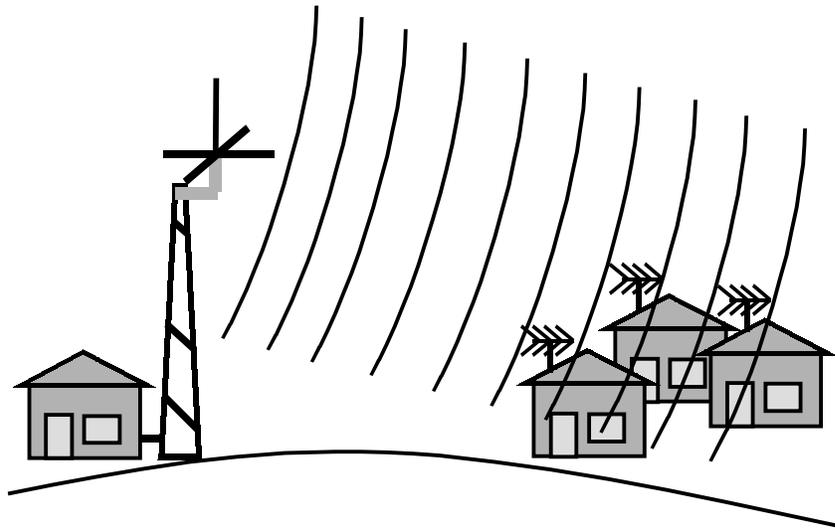


Figura 1.1.4.1: Acoplamento por meio radiado

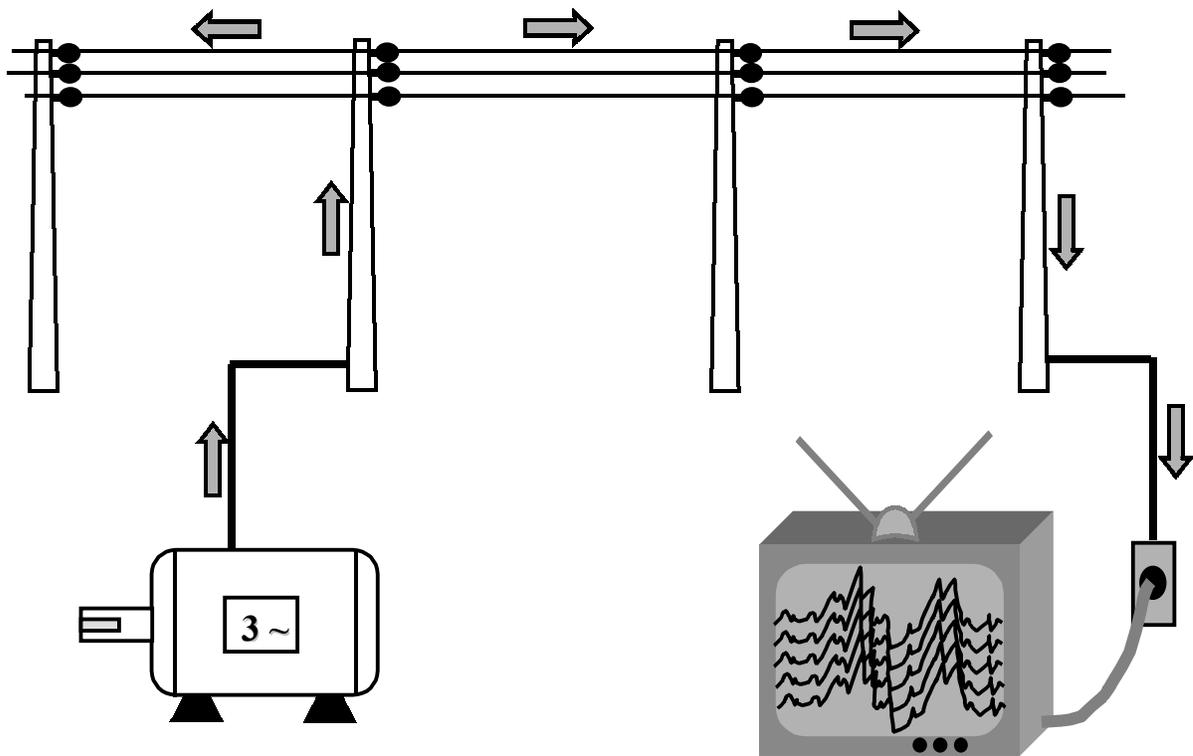


Figura 1.1.4.2: Acoplamento da EMI por meio conduzido

Na prática, dificilmente se observa o acoplamento da EMI por somente um meio distinto. Normalmente, o que se observa é uma combinação dos dois meios (radiado e conduzido). Dessa forma, tem-se ainda:

- **indução por emissão radiada** [7]: os campos radiados, ao passarem por linhas de telecomunicações, induzem correntes nos mesmos cujos efeitos, dependendo do equipamento terminal conectado à esta rede, podem ir desde um mau funcionamento chegando até mesmo a danificar o equipamento terminal (**Figura 1.1.4.3**). Como exemplo, pode-se citar a indução de sinais de ondas médias em redes telefônicas convencionais. Dependendo da qualidade do aparelho telefônico conectado a essa linha na casa do assinante, poderá ser ouvido claramente um sinal de áudio na cápsula do telefone, resultado da demodulação do sinal da estação de ondas médias que está interferindo naquela linha. Muito mais sério que isso é o fato de o telefone devolver à essa linha o sinal demodulado (agora como sinal de áudio) o qual irá interferir em outros aparelhos conectados à mesma linha, ainda que estes atendam aos requisitos de norma preestabelecidos para esse tipo de interferência [7]. Também pode ocorrer que o sinal seja demodulado já na central telefônica, causando um desconforto ainda maior para todos os assinantes conectados à essa central.

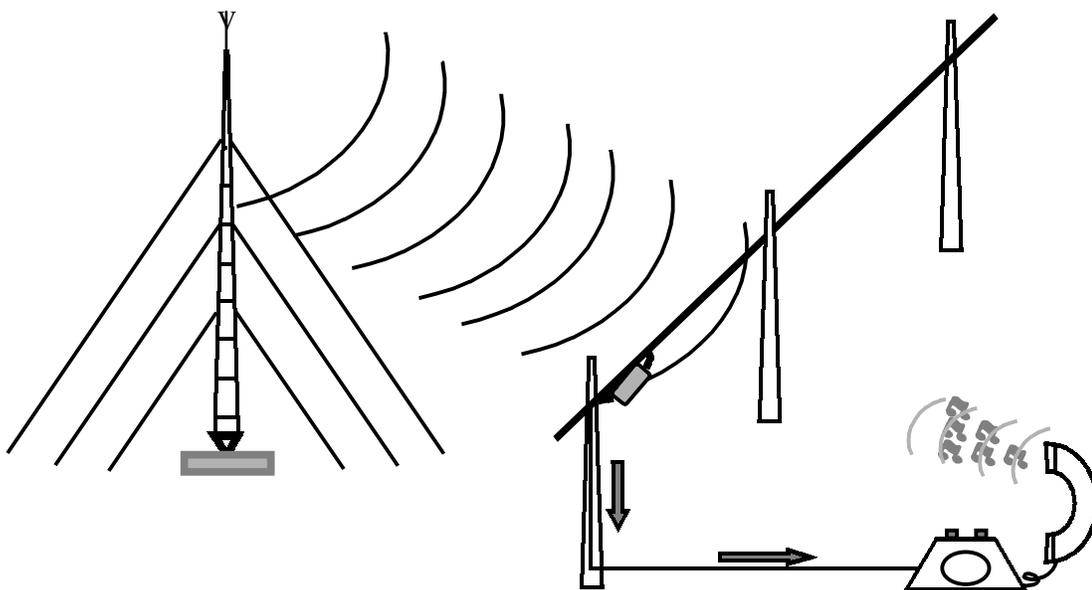


Figura 1.1.4.3: Rádio de ondas médias interferindo em telefone

- **descargas eletrostáticas (ESD)** [8]: normalmente originada pelo carregamento eletrostático de corpos, causado principalmente pelos seguintes fatores: material do corpo (materiais sintéticos são altamente propícios a se acumularem cargas eletrostáticas), condições climáticas (principalmente pela baixa umidade relativa, o que dificulta a dissipação das cargas acumuladas por um corpo). Quando há a aproximação de regiões com potenciais diferentes, pode ocorrer entre elas uma descarga eletrostática (muitas vezes há a formação de um pequeno arco ou "faísca"). O exemplo mais comum é o do "choque" sentido ao toque na estrutura metálica de um automóvel, principalmente em épocas mais secas do ano. Mas há casos em que as consequências são mais graves como por exemplo, a explosão de silos de cereais. Os cereais são armazenados em silos através de esteiras (geralmente de material sintético) e durante esse tipo de atividade há a formação de uma imensa quantidade de pó suspenso no interior do silo. Se a esteira ou o silo não tiverem o devido tratamento anti-estático, a menor faísca pode iniciar um processo de combustão do pó (extremamente seco e fino) que, pelas características do ambiente e pela velocidade dessa combustão, podem configurar em uma explosão do silo. Outra característica das descargas eletrostáticas (do inglês: *ESD - Electrostatic Discharge*) e, talvez, a mais importante, é que nem sempre o dano provocado é facilmente detectado. Em vários casos, equipamentos que estão instalados em campo podem sofrer sucessivas descargas em seus circuitos (por ocasião de manutenções ou mesmo por efeitos do próprio ambiente), os quais vão sendo gradativamente afetados e passam a apresentar comportamento falho; muitas vezes essa falha é intermitente, dificultando-se, assim, um diagnóstico preciso. E, mesmo que haja a troca de componentes ou circuitos inteiros, o problema tenderá a permanecer, caso não haja um adequado tratamento anti-estático para o equipamento.

De uma forma geral, esses são os principais mecanismos de geração e acoplamento de EMI encontrados na prática.

1.2. Regulamentação da EMC no Brasil e no Mundo

Tendo em vista a seriedade que o assunto exige, vários órgãos normativos, em conjunto com centros de pesquisa e desenvolvimento, indústrias, empresas de serviços, etc., vêm realizando um

trabalho no sentido de manter um controle severo sobre os mais diversos aspectos relacionados a EMC, elaborando normas, regulamentações e procedimentos, os quais impõem limites máximos para a emissão de sinais por um equipamento, ou sistema, como também requisitos mínimos de imunidade desses equipamentos/sistemas, os quais garantam funcionamento sem avarias ou degradação, quando submetidos a situações de EMI.

O comportamento desses equipamentos/sistemas é avaliado através de uma série de ensaios de conformidade os quais, como o próprio nome sugere, visam avaliar se o equipamento atende aos requisitos preestabelecidos pela norma técnica aplicável.

A quantidade de normas e procedimentos técnicos para avaliação da EMC é muito grande e tende a aumentar cada vez mais, em função da utilização também cada vez maior da eletrônica em todos os seguimentos do mercado.

Porém, alguns órgãos normativos têm maior destaque em todo o mundo, em função da abrangência de seus requisitos. Na Europa, as principais entidades normativas são:

- **ITU** - "INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION"
- **IEC** - "INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION"
- **CISPR** - "COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES"
- **ETSI** - "EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE"
- **CENELEC** - "COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION ELECTROTECHNIQUE"

Nos Estados Unidos da América, têm-se:

- **FCC** - "FEDERAL COMMUNICATION COMMISSION"
- **ANSI** - "AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE"
- **MIL-STD** - "MILITARY STANDARD"

Existem ainda outros órgãos de relevância em todo o mundo (como por exemplo o "CWTS - CHINA WIRELESS TELECOMMUNICATION STANDARD GROUP") mas os apresentados acima são, de certa forma, os mais importantes e que mais têm influenciado a normalização para setor de EMC no Brasil. Em linhas gerais, a Resolução N.º 237 [9], que apresenta os requisitos mínimos para

certificação de produtos de telecomunicações segundo parâmetros de EMC, publicada pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), é baseada em normas da ITU, IEC e CISPR. A grande quantidade de empresas sediadas no Brasil que fabricam e exportam produtos para os Estados Unidos da América, têm levado também o mercado à adoção das normas de EMC da FCC para os processos de certificação.

Além da ANATEL, outros órgãos estão também envolvidos na regulamentação e fiscalização de aspectos de EMC no Brasil. São eles:

- **ABNT** - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
- **MINICOM** - MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES
- **INMETRO** - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA
- **ANVISA** - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA
- **ANEEL** - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

1.3. Ensaios de EMC

Os ensaios de EMC, quanto à natureza do fenômeno testado, podem ser divididos nos seguintes blocos:

- Emissões radiadas¹;
- Susceptibilidade radiada;
- Emissões Conduzidas;
- Imunidade Conduzida.

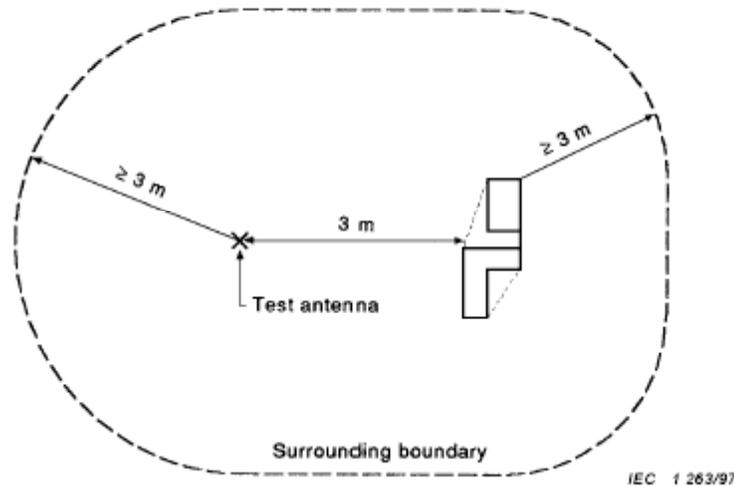
Para cada tipo de ensaio ou requisito testado, existem normas e procedimentos específicos, estabelecendo o procedimento, montagem de teste e medição, limites e tolerâncias. Os ensaios de emissões e imunidade conduzidas exigem equipamentos e instrumentos de medição específicos, adequados a cada caso ensaiado. Entretanto, o ambiente para a realização desse tipo de ensaio não necessita de tanto itens de controle como é o caso para ensaios radiados.

A norma CISPR 22² [6] sugere que as medições de emissões radiadas sejam realizadas em uma configuração denominada de campo aberto (do inglês - "*open site*"), conforme apresentado na **Figura 1.3.1**.

¹ Os termos aqui apresentados são os normalmente utilizados nas documentações de EMC

CISPR 22 (1997) - Limites e métodos de medição de rádio-perturbações características de equipamentos de tecnologia da informação

Montagem para medições de emissões radiadas



There shall be no reflecting object inside the volume defined on the ground by the line corresponding to this figure and defined in height by a horizontal plane ≥ 3 m above the highest element of either aerial or equipment under test.

Figura 1.3.1: Esquema para ensaio de emissões radiadas segundo a norma CISPR 22

Esse tipo de estrutura pode, na prática, apresentar uma série de problema, tais como:

- susceptibilidade a ruídos ambientes, provenientes de fontes emissoras presentes nas imediações (alto ruído de fundo);
- exposição às intempéries;
- impossibilidade de controle de temperatura e umidade.

Existem laboratórios que possuem o campo aberto, protegido por coberturas totalmente não-metálicas, de modo que o problema do controle das condições climáticas e a exposição às intempéries

² Para equipamentos de Tecnologia da Informação. Para os equipamentos ISM (Industrial, Scientific and Medical) aplicam-se os requisitos da norma CISPR 11, muito semelhante à norma CISPR 22.

são solucionados. Entretanto, esse tipo de proteção nada faz em relação aos campos radiados externamente.

Face aos problemas citados, algumas soluções alternativas ao campo aberto vêm sendo sugeridas, de maneira a atenderem satisfatoriamente aos requisitos da norma CISPR 22 (e outras [9]).

Uma solução que vem sendo adotada, consiste em se utilizar um ambiente blindado (sob o ponto de vista eletromagnético) onde, além da imunidade contra os sinais provenientes de fontes externas, há também maior facilidade na monitoração das condições climáticas em seu interior, através do condicionamento de ar e do controle de umidade. Como exemplo, podem-se citar as células tipo Transversal Eletromagnéticas (TEM) [10][11], as células GTEM [12], que atuam para frequências até 18 GHz, as câmaras blindadas (do inglês - "shielded room") e as câmaras blindadas anecóicas.

A célula TEM é um dispositivo que proporciona a geração, em seu interior, de um campo eletromagnético em condições de campo distante, onde o campo elétrico E é perpendicular ao campo magnético H (**Figura 1.3.2**), denominado *onda plana* [13].

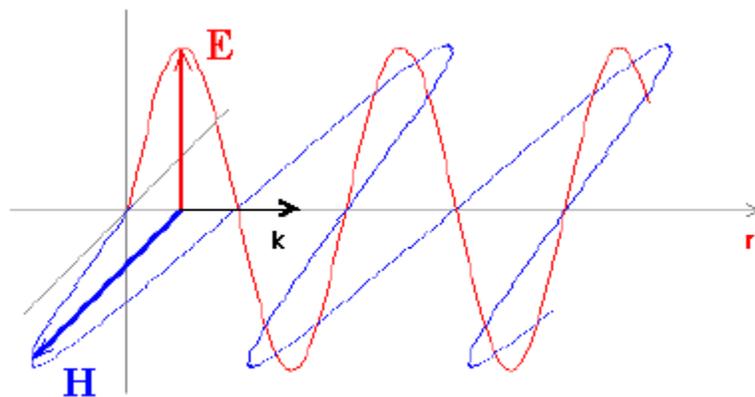


Figura 1.3.2: Onda plana no espaço livre

A célula TEM, por ser baseada no princípio de guia de ondas, apresenta limitações quanto ao tamanho do objeto a ser ensaiado em seu interior, bem como em relação à sua frequência de corte (f_c), que é inversamente proporcional às dimensões físicas da célula. Dessa forma, obtêm-se células TEM para faixas de frequências não muito superiores a 3 GHz, possibilitando o teste de equipamentos com maior dimensão física limitada a 1,0 m. A **Figura 1.3.3** apresenta dois tipos de células TEM disponíveis comercialmente.



Figura 1.3.3: Exemplos de células TEM³

As câmaras blindadas, como o nome sugere, são salas cujas paredes são construídas em material metálico, o qual proporciona *eficiência de blindagem* de até 100 dB [14]. Toda os sinais de CA, telecomunicações e controle que vão para o interior da câmara são filtrados, de modo a impedir que quaisquer ruídos externos possam ser conduzidos para dentro na sala.

Esse tipo de ambiente tem como desvantagem o alto erro para medições de campos radiados, uma vez que, em função de suas paredes metálicas, os campos internamente emitidos por um ESE sofrerão múltiplas reflexões, acarretando grande incerteza para a medição feita por uma antena, posicionada à uma determinada distância do ESE. Uma aplicação bastante comum é a utilização desse tipo de câmara para a instalação de equipamentos médicos que podem emitir campos eletromagnéticos elevados (equipamentos de ressonância magnética, por exemplo), como também para a operação de equipamentos altamente susceptíveis a interferências (eletroencefalógrafos, equipamentos de medições com potenciais evocados, eletromiógrafos etc) que trabalham na medição de sinais de baixíssimos valores (da ordem de μV e μA).

Na **Figura 1.3.4** estão apresentados o diagrama esquemático de uma câmara blindada para testes de EMC, bem como uma vista interna dessa câmara, em uma configuração de teste com uma antena bicônica [14].

³ Fotos gentilmente cedidas pela empresa *Amplifier Research Inc.* - USA [ref]

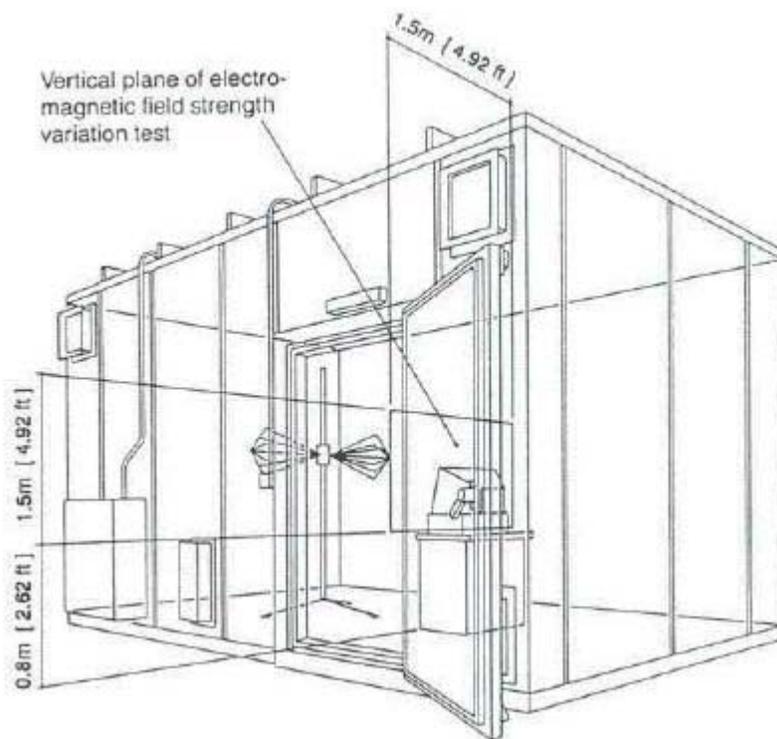


Figura 1.3.4: Diagrama esquemático e interior de uma câmara blindada⁴

A solução que mais oferece vantagens para as medições de EMC é a proporcionada pelas câmaras anecóicas. Esse tipo de câmara é também uma sala blindada, com filtragem de entrada, diferenciando das demais por possuir um revestimento, nas paredes internas, feito com material absorvedor de ondas eletromagnéticas [15]. Dessa forma, o efeito indesejável das múltiplas reflexões é bastante reduzido, aproximando-se muito esse ambiente a um campo aberto [16], mas com as vantagens de ser imune às interferências externas e às intempéries. Contudo, esse tipo de instalação tem alto custo, da ordem de centena de milhares de dólares americanos⁵, principalmente em função do alto custo do material absorvedor.

Os materiais absorvedores de RF são construídos à partir de blocos de ferrita (para frequências até 120 MHz) e cones de polímeros impregnados com substâncias que causam perdas para as ondas incidentes. A forma cônica ou piramidal proporciona ao material absorvedor a capacidade de ajuste de impedância de casamento com a onda incidente, dentro de uma larga faixa de comprimentos de onda, uma vez que o comprimento de um cone é dimensionado para um quarto do comprimento de onda da menor frequência de onda incidente, ou seja:

⁴ Foto e figura gentilmente cedidas pela empresa *TDK RF Solutions Inc. - USA*

$$l_{ab} = \frac{\lambda}{4} [m] \quad (1.4.1)$$

onde:

l_{ab} - comprimento do absorsor

λ - maior comprimento de onda incidente sobre o absorsor

A **Figura 1.3.5** mostra alguns tipos de materiais absorsores disponíveis comercialmente.

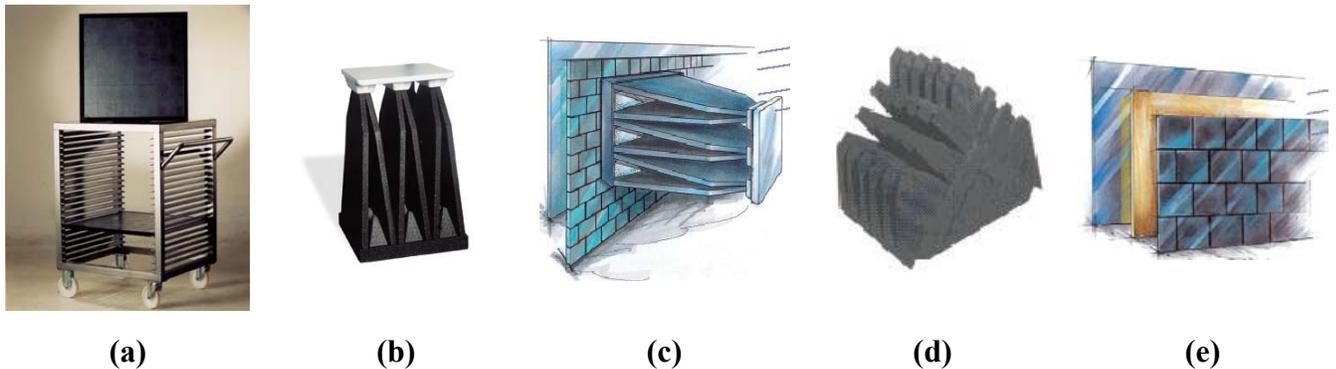


Figura 1.3.5: (a) placa de absorsor de ferrita; (b) absorsor piramidal em isopor; (c) absorsor híbrido; (d) absorsor para incidência oblíqua; (e) parede absorSORa de ferrita⁶

Existem câmaras anecóicas que permitem o ensaio dos mais diversos tipos de equipamentos, que vão desde telefones celulares até a aviões inteiros⁷ (tipo *Boeing 777*®, por exemplo). A câmara totalmente anecóica tem todas as suas paredes, teto e piso revestidos com material absorSOR de RF. Esse tipo de câmara é utilizado, principalmente, para o ensaio e caracterização de antenas.

Para ensaios de EMC utiliza-se a chamada câmara semi-ancóica onde, com exceção do piso, todas as outras paredes e o teto são recobertos com material absorSOR. Esse tipo de câmara é utilizado em substituição ao campo aberto e necessita atender a requisitos de caracterização, que limitam a

⁵ Fonte: TDK RF Solutions Inc.

⁶ Fotos e figuras gentilmente cedidas pela empresa *TDK RF Solutions Inc. - USA*

⁷ Fonte: TDK RF Solutions Inc. - USA

inserção de erros ou atenuação [16], devidos às paredes da câmara, em relação às medidas feitas no campo aberto, onde apenas o piso é metálico e refletor, não havendo obstáculos ao seu redor.

O interesse por materiais especiais que possibilitem, entre outras finalidades, absorção de campos eletromagnéticos, tem sido bastante evidenciado nas áreas que trabalham com EMC, principalmente no que diz respeito à redução de custos e facilidade de produção.

Os materiais absorvedores existentes no mercado, além de serem de alto custo, exigem processos de fabricação e caracterização sofisticados, como é o caso do absorvedor de isopor, onde a injeção das substâncias absorvedoras é feita de maneira uniforme em todas as redes do polímero.

Ainda, materiais absorvedores têm aplicação em blindagens eletromagnéticas, filtros para cabos [17] e antenas, entre outros.

No Brasil, a legislação relativa a EMC tem-se evidenciado desde 1999, incidindo principalmente sobre os setores de telecomunicações [9], equipamentos eletromédicos [18] e, mais recentemente, o setor de energia elétrica [19].

Pode-se constatar que a área de estudos de Compatibilidade Eletromagnética é ampla, possibilitando o desenvolvimento e aplicação de inúmeras técnicas e dispositivos, tanto para teste e medição, como para prevenção e supressão da EMI.

2. ESTRUTURAS PERIÓDICAS APLICADAS AO ELETROMAGNETISMO

2.1. Definição de Uma Estrutura Periódica

As estruturas periódicas podem ser classificadas basicamente em dois tipos [20]:

- estruturas contínuas mas propriedades periodicamente variando, (ex.: um guia de onda cilíndrico preenchido por um material dielétrico cuja constante dielétrica varia de uma maneira periódica ao longo da direção axial) e
- estruturas com condições de contorno periódicas, (ex.: um guia de onda preenchido por diafragmas idênticos em intervalos regulares).

Uma aplicação muito comum para esse tipo de estrutura são as lentes de microondas [4], utilizadas para converter uma frente de ondas esféricas em uma frente de ondas planas .

Ao invés de utilizar dielétricos comuns não-metálicos para a confecção de lentes, Kock⁸ demonstrou que eles podem ser substituídos por dielétricos artificiais ou metálicos, com significativa redução de peso. Um dielétrico comum é constituído por partículas moleculares [21], de dimensões microscópicas (**Figura 2.1.1**).

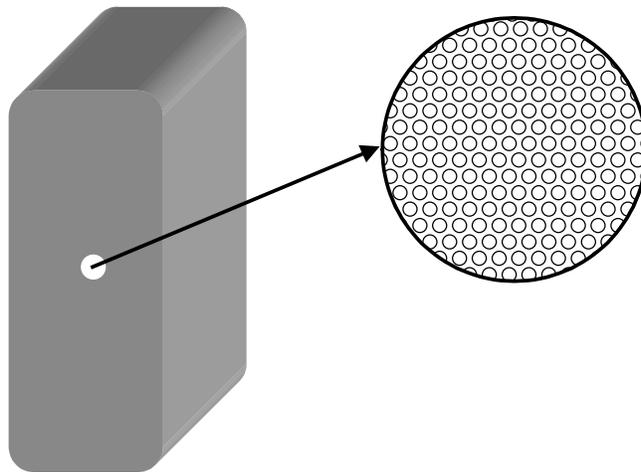


Figura 2.1.1: Estrutura microscópica de um dielétrico não-metálico

⁸ E. Kock, Metallic Delay Lens, *Bell System Tech. J.*, **27**, 58-82, janeiro de 1948

Já o dielétrico artificial é composto por "partículas" metálicas macroscópicas (quando vistas na seção transversal), distribuídas de forma regular e periódica. Essas partículas podem ser esferas, discos ou lâminas ou bastões de metal, com dimensões pequenas em função do comprimento de onda, afim de não provocarem ressonâncias. As partículas são distribuídas de forma a comporem uma estrutura cristalina tridimensional, como mostra a **Figura 2.1.2**.

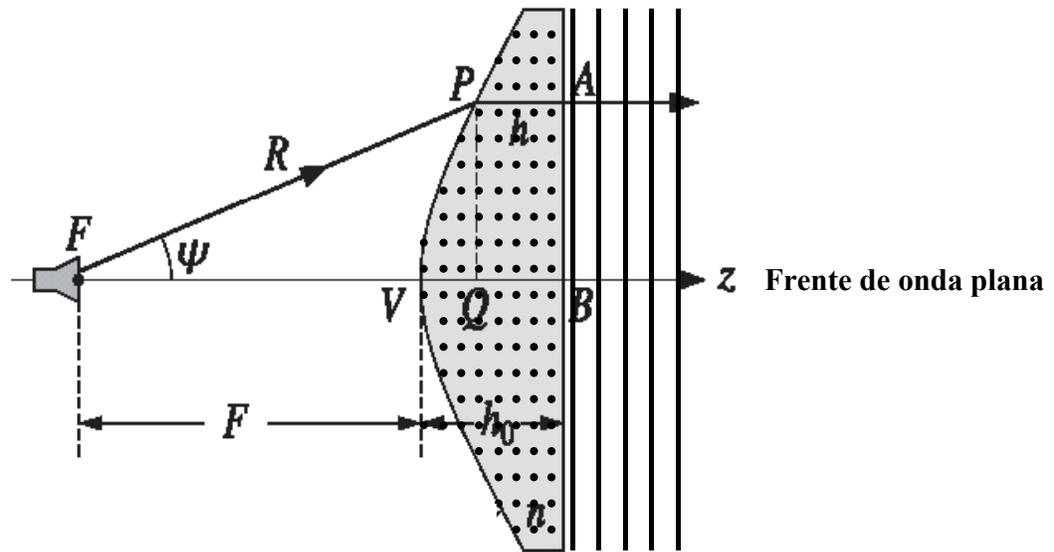


Figura 2.1.2: Lente de dielétrico artificial com esferas metálicas

Tome-se, como exemplo, uma esfera condutora não carregada eletricamente, inserida em um campo elétrico **E** (**Figura 2.1.3.a.**), o qual irá induzir cargas positivas e negativas. A uma determinada distância, o efeito dessas cargas pode ser representado por cargas $+q$ e $-q$, separadas por uma distância l (**Figura 2.1.3.b.**). Essa configuração constitui um dipolo elétrico de *momento de dipolo* ql .

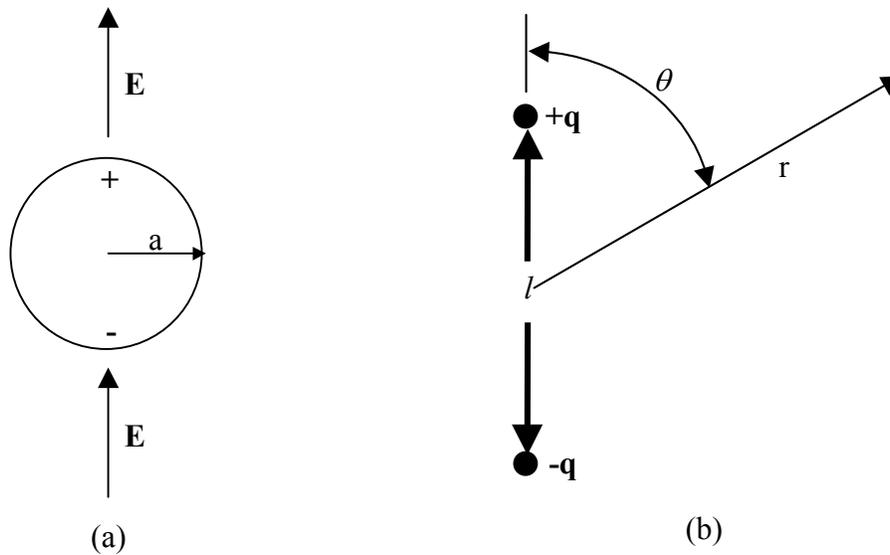


Figura 2.1.3: (a) Esfera carregada, (b) Dipolo elétrico equivalente

Para uma distância $r \gg l$, o potencial, em função desse dipolo, será

$$V = \frac{q \cdot l \cdot \cos \theta}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (2.1.1)$$

onde:

ϵ_0 = permissividade no vácuo ($\sim 8,85 \times 10^{-12}$ [F/m])

A polarização \mathbf{P} do dielétrico artificial é dada por

$$\mathbf{P} = N \cdot q \cdot l \quad (2.1.2)$$

onde:

N = número de esferas por metro cúbico

l = vetor que une as cargas q , em metros

O deslocamento \mathbf{D} , o campo elétrico \mathbf{E} e a polarização \mathbf{P} são relacionados por

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.1.3)$$

Dessa forma, pode-se considerar a constante dielétrica efetiva (ε_{eff}) do meio dielétrico artificial como sendo

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_0 + \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{E}} = \varepsilon_0 + N \cdot \frac{q \cdot l}{|\mathbf{E}|} \quad (2.1.4)$$

Conhecendo-se o número de esferas por volume unitário e o momento de dipolo por campo unitário aplicado, pode-se determinar a constante dielétrica efetiva desse material.

Considerando-se que:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.1.5)$$

Para um campo uniforme, o potencial é dado por:

$$V = -\int_0^r \mathbf{E} \cdot \cos(\theta) dr = -\mathbf{E} \cdot r \cdot \cos(\theta) \quad (2.1.6)$$

O ângulo θ é formado entre o raio r e a direção do campo \mathbf{E} (vide **Figura 2.1.2.b.**). O potencial V_0 fora da esfera, imersa num campo inicialmente uniforme, é dado pela soma de (2.1.1) e (2.1.6). Dessa maneira, obtém-se:

$$V_0 = -E \cdot r \cdot \cos(\theta) + \frac{q \cdot l \cdot \cos(\theta)}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} \quad (2.1.7)$$

Considerando-se que o potencial na esfera é igual a zero, e substituindo-se r por a , a equação (2.1.7) torna-se:

$$-E \cdot a \cdot \cos(\theta) + \frac{q \cdot l \cdot \cos(\theta)}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot a^3} = 0 \quad (2.1.8)$$

Efetuando-se a resolução em relação a $q/l/E$, obtém-se:

$$\epsilon = \epsilon_0 + 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot N \cdot a^3 \quad (2.1.8.a)$$

$$\epsilon_r = 1 + 4 \cdot \pi \cdot N \cdot a^3, \quad (2.1.8.b)$$

onde

ϵ_r = constante dielétrica relativa efetiva do dielétrico artificial

A Tabela 2.1.1 apresenta as características para três tipos de estruturas utilizadas para a construção de dielétricos artificiais.

Tabela 2.1.1 - Características de estruturas utilizadas em dielétricos artificiais

Tipo de estrutura	Constante dielétrica relativa ϵ_r	Permeabilidade relativa μ_r	Índice de refração n
Esfera	$1 + 4 \cdot \pi \cdot N \cdot a^3$	$1 - 2 \cdot \pi \cdot N \cdot a^3$	$\sqrt{(1 + 4 \cdot \pi \cdot N \cdot a^3) \cdot (1 - 2 \cdot \pi \cdot N \cdot a^3)}$
Disco	$1 + 5,3 \cdot N \cdot a^3$	~ 1	$\sqrt{(1 + 5,3 \cdot N \cdot a^3)}$
Tira	$1 + 7,8 \cdot N' \cdot w^2$	~ 1	$\sqrt{(1 + 5,3 \cdot N \cdot a^3)}$

Onde:

N = número de esferas ou discos, por metro cúbico

a = raio da esfera ou disco, em metros

N' = número de tiras, por metro quadrado, na seção transversal da lente

w = largura das tiras, em metros

Sendo a permeabilidade relativa do dielétrico artificial igual a 1, o respectivo índice de refração é dado pela raiz quadrada de (2.1.8.b). Entretanto, para um dielétrico artificial de esferas condutoras, devido ao

fato das esferas deformarem as linhas de campo magnético ao seu redor (em função da baixa profundidade de penetração - efeito pelicular - em altas frequências), a sua permeabilidade relativa fica:

$$n = \sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r} = \sqrt{(1 + 4 \cdot \pi \cdot N \cdot a^3) \cdot (1 - 2 \cdot \pi \cdot N \cdot a^3)} \quad (2.1.9)$$

As lentes de dielétrico não-metálico⁹, para antenas de microondas, podem ser calculadas a partir dos métodos de análise da óptica geométrica (**Figura 2.1.3**).

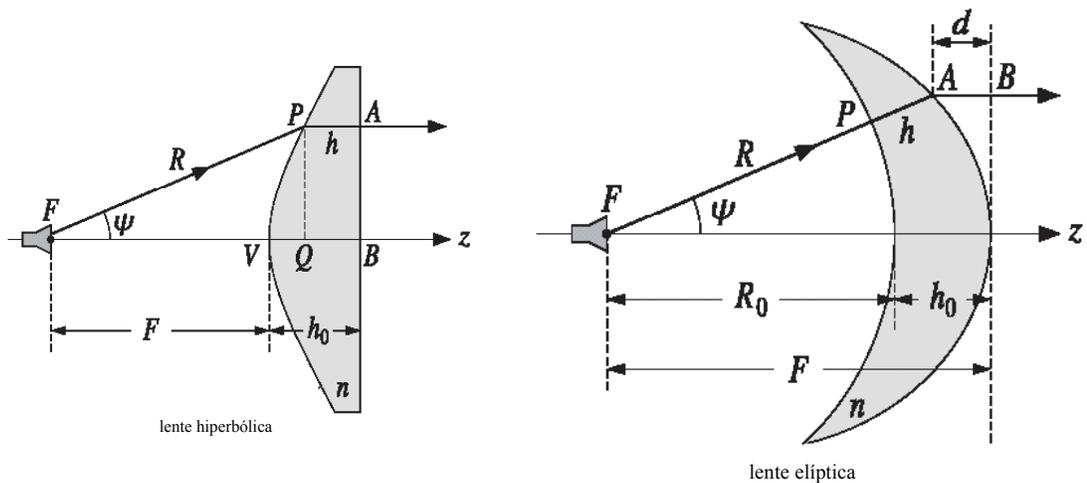


Figura 2.1.4: Lentes de dielétrico não-metálico

A Tabela 2.1.2 apresenta as propriedades físicas de alguns materiais dielétricos normalmente utilizados para a confecção de lentes de microondas.

Tabela 2.1.2: Propriedades de alguns materiais dielétricos

Material	Constante dielétrica relativa ε_r	Índice de refração n	Fator de potência
Parafina	2,1	1,4	0,0003
Polietileno	2,2	1,5	0,0003

Tabela 2.1.2 (continuação)

Material	Constante dielétrica relativa ϵ_r	Índice de refração n	Fator de potência
Lucita ou <i>Plexiglass</i>	2,6	1,6	0,01
Polistireno	2,5	1,6	0,0004
Quartzo	7	2,5	0,004
Polyglas	4-16*	2-4	0,003
Rutilo	85-170**	9-13	0,0006

* Depende da composição

** Depende da orientação do cristal em relação ao campo

Outra categoria de dielétricos artificiais são os que utilizam estruturas periódicas grandes em relação ao comprimento de onda de operação, conhecidos como ressoadores [20]. Eles são construídos em uma distribuição geométrica tal que, sob determinadas condições de campo incidente, ressoem em uma frequência (ou faixa de frequência) específica. Esse princípio tem sido utilizado, por exemplo, para a confecção de filtros tipo rejeita-faixa, ou estruturas com banda de passagem proibida [22]. A idéia fundamental é a de que os elementos ressonantes atuem da mesma forma que os semicondutores atuam sobre os elétrons, ou seja, criando uma situação em que campos com energias em um determinado intervalo - as bandas proibidas - sejam impedidos de propagar-se ao longo do cristal (como é denominado o arranjo geométrico de tais estruturas). As estruturas mais utilizadas na fabricação de ressoadores são esferas, cilindros e barras retangulares [20], conforme mostra a **Figura 2.1.5**.

⁹ J.R.Risser, *Microwave Antenna Theory and Design*, Cap. 11. Ed. S. Silver, McGraw-Hill Book Company Inc., Nova York, 1949.

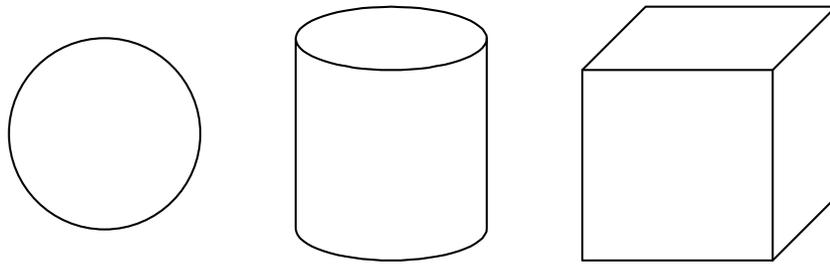


Figura 2.1.5: Estruturas utilizadas na construção de ressoadores

2.2. Estruturas Tipo "Banda Proibida" - PBG's e EBG's

O conceito de PBG ("*Photonic Band Gap*") foi iniciado por E. Yablonovitch [23] por volta de 1987. Ele foi o primeiro a construir estruturas periódicas, trabalhando sobre a permissividade dos materiais, de forma a controlar totalmente a propagação da luz. Desde então, vários estudos têm sido realizados no sentido de se desenvolver a tecnologia PBG para inúmeras aplicações em óptica [22].

As estruturas PBG podem ser classificadas como unidimensionais (1-D), bidimensionais (2-D) e tridimensionais (3-D), de acordo com a variação de suas propriedades ao longo da direção de propagação da onda incidente (**Figura 2.2.1**).

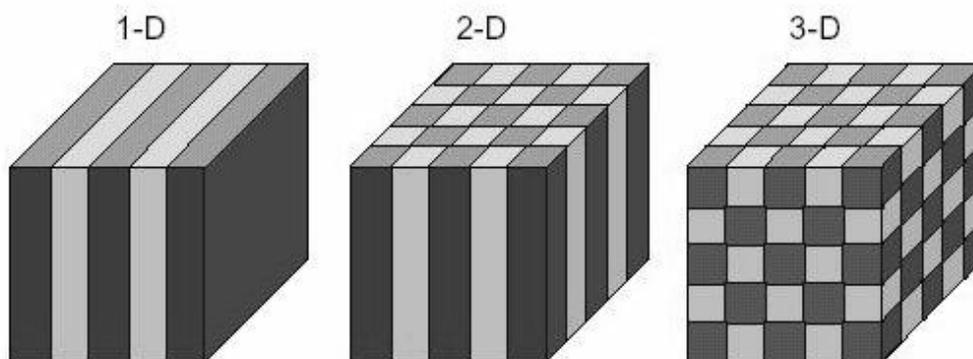


Figura 2.2.1: Cristais PBG tipo 1-D, 2-D e 3-D

Em óptica, os cristais fotônicos são obtidos utilizando-se materiais e processos especiais, pois as dimensões aplicadas são extremamente reduzidas (da ordem de nm). A **Figura 2.2.2** apresenta alguns exemplos de cristais fotônicos normalmente empregados em óptica [24].

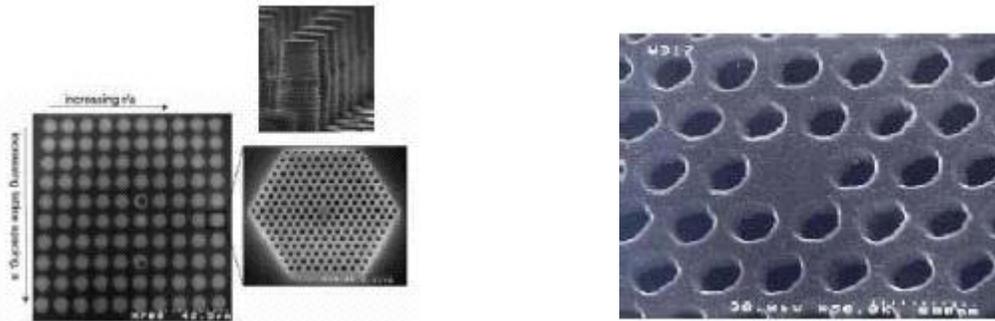


Figura 2.2.2: Exemplos de cristais fotônicos construídos em SiO_2 (óxido de silício)

Dependendo da geometria e das dimensões das estruturas utilizadas, o cristal atua de forma a bloquear totalmente a passagem da luz, em uma determinada faixa de frequência ("bandgap"). Este trabalho utiliza estruturas tipo hexagonal (detalhadamente apresentadas no Capítulo 3), cujo comportamento em frequência é mostrado na **Figura 2.2.3**.

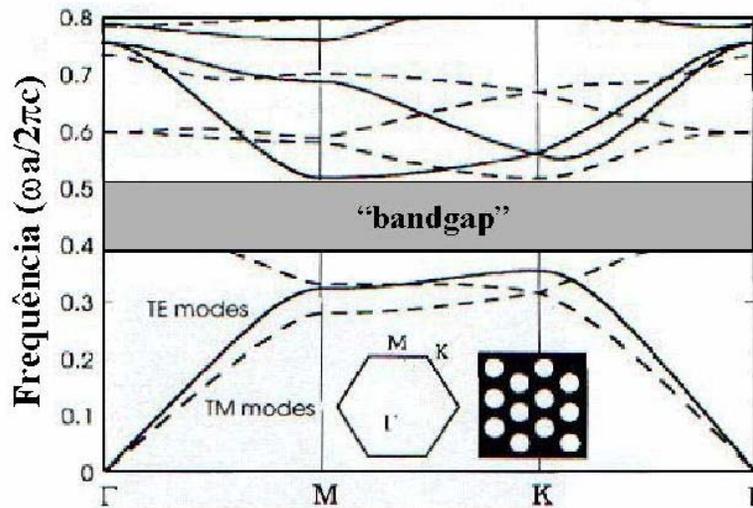


Figura 2.2.3: *Bandgap* para estruturas tipo furo, em distribuição hexagonal

A possibilidade de se utilizar estruturas periódicas para o controle de propagação de sinais despertou o interesse de cientistas, que perceberam o potencial de tal técnica não somente para aplicações em óptica, mas também, para aplicações em faixas de frequências de microondas. Quando utilizadas em microondas, as tais estruturas são denominadas por "Electromagnetic Band Gap" ou simplesmente *EBG*, para diferenciação das *PBG's* [25]. Têm sido realizados vários estudos para aplicações de diferentes tipos de *EBG's* em microondas [26]. Alguns exemplos de aplicações muito encontradas na literatura são em antenas [27][28], filtros [29] e linhas de transmissão [30]. Um exemplo de aplicação de *EBG's* em antenas é apresentado na **Figura 2.2.4** [31].

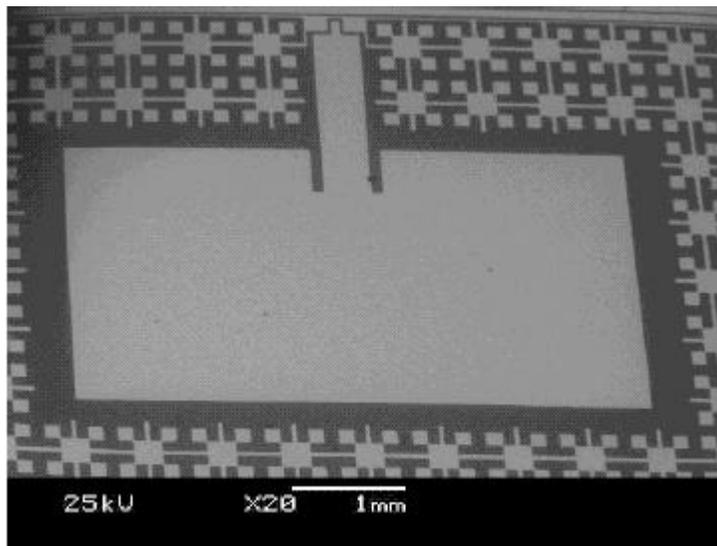


Figura 2.2.4: Antena impressa com plano terra utilizando EBG's

2.3. Aplicações Especiais Utilizando Estruturas Periódicas - Metamateriais

No ano de 1968 o cientista russo Veselago [32] apresentou à comunidade científica um interessante estudo em que investigava, teoricamente, as conseqüências eletrodinâmicas de um meio no qual tanto a permissividade ϵ quanto a permeabilidade μ fossem negativas. Com este estudo ele concluiu que tal meio teria características de propagação significativamente diferentes dos chamados meios convencionais, tais como: mudança da velocidade de grupo do sinal, inversão do deslocamento Doppler, refração anômala, entre outros. Na época da publicação destes resultados, o próprio autor assinalou que tais materiais não estavam disponíveis, o que fez com que suas observações ficassem

apenas no terreno da curiosidade. Até então, meios com permissividade negativa podiam ser obtidos através de um arranjo tri-dimensional de fios condutores retos que se interceptam mutuamente como descrito por Rotman [33] em 1962, e mostrado na **Figura 2.3.1**.

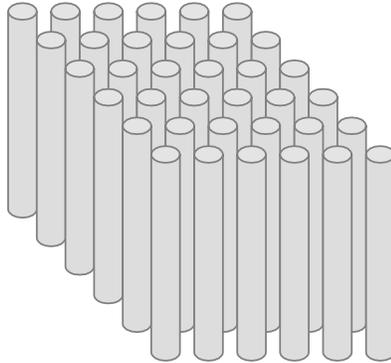


Figura 2.3.1: Arranjo de fios condutores para produzir um meio efetivo com permissividade negativa.

Por se caracterizarem pela combinação de fios condutores e materiais dielétricos dispostos de tal forma a imitarem um meio efetivo, estes novos materiais foram denominados “metamateriais”. Em meios como o de [33], onde a permissividade é negativa, os modos propagantes obedecem a uma relação de dispersão análoga à de um plasma neutro. No entanto, para se comprovarem as previsões de Veselago, faltava, ainda, descobrir uma maneira de se obter permeabilidade negativa.

Este feito somente foi alcançado 37 anos mais tarde, por Pendry *et al.* [34], em 1999. Neste trabalho, os autores introduziram um arranjo periódico de tal modo a produzir uma permeabilidade magnética efetiva. Foram utilizados vários *ressoadores em anel dividido* (*SRR-Split Ring Resonator*) de modo a formar um arranjo periódico de elementos. Cada ressonador consistia na verdade, de dois anéis concêntricos em forma de “C”, sendo que o anel interno tem a forma de um “C” espelhado, conforme mostra a **Figura 2.3.2**. Para que um arranjo periódico de elementos se comporte efetivamente como um meio, é preciso que o comprimento de onda a ser utilizado seja maior que os elementos e o espaçamento da rede compreendida pelos mesmos.

O primeiro estudo da propagação de ondas em meios apresentando ε e μ negativos foi apresentado por Ziolkowski *et al.* [37], baseado no método FDTD ("*Finite Difference Time-Domain*" - Diferenças Finitas no Domínio do Tempo). Um efeito interessante obtido com as simulações neste trabalho foi a conversão de uma onda cilíndrica em um feixe focalizado paraxialmente, uma consequência direta do uso do metamaterial. Shelby *et al.* [38], por sua vez, investigaram a transmissão de microondas através destes materiais na faixa de 8 GHz a 12 GHz (Banda-X). Sua estrutura era também baseada no conceito SRR, mas com geometria retangular.

Ressonadores SRR, isolados e acoplados, foram investigados em profundidade por Balmain *et al.* [39], tanto numericamente quanto experimentalmente. Neste estudo foi mostrado que o acoplamento entre os anéis é bem complexo e altamente dependente do arranjo geométrico utilizado.

As propriedades fundamentais de metamateriais em guias de ondas foram investigadas por Caloz *et al.* [40], em 2001. Os guias de ondas, neste caso, eram preenchidos por LHM ("*Left-Handed Material*"), o qual era suposto se comportar como um meio efetivo. Com isso foi possível investigar propriedades tais como índice de refração e velocidade de fase negativos, impedância intrínseca positiva, e ângulo de refração negativo.

No ano 2002, Pendry *et al.* [41] relataram a fabricação de uma antena altamente diretiva, operando na faixa de microondas e, portanto, com potenciais aplicações em comunicações via satélite. Trata-se de uma antena refletora, cujo alimentador é composto por uma antena dipolo linear circundada por um metamaterial de forma planar retangular, com uma das duas faces de maior área, funcionando como fase de emissão. Através desta superfície a radiação em forma de um feixe estreito é emitida fazendo um ângulo de 90° com a mesma, independente do ângulo de incidência das ondas (excitação) propagando-se dentro desse meio. Para uma frequência de 14,65 GHz, o cone (ângulo sólido) que define o feixe emitido (linearmente polarizado) apresenta uma abertura de meia potência de aproximadamente $8,9^\circ$ e $12,5^\circ$ para os planos **E** e **H**, respectivamente, e polarização cruzada inferior a 20 dB. Reciprocamente, o meio metamaterial planar em questão, só absorve ondas incidindo na superfície de emissão (recepção) dentro de cone de emissão.

Outro exemplo mais recente de aplicação em antenas altamente diretivas utilizando metamateriais é apresentado por Tayeb *et al.* [42], com estudos teóricos e resultados experimentais.

A combinação de arranjos geométricos de diferentes tipos de estruturas podem resultar, basicamente, em quatro tipos de meios [43]: o meio convencional (ε , μ positivos), o meio elétrico tipo

banda proibida - *EBG* (ϵ negativo, μ positivo), meio magnético tipo banda proibida (ϵ positivo, μ negativo) e o meio metamaterial (ϵ , μ negativos). A **Figura 2.3.4** ilustra essas quatro situações.

Face ao grande número de situações possíveis de combinação de estruturas, para a obtenção dos efeitos metamateriais, não somente as ferramentas computacionais de simulação devem ser adequadas e aperfeiçoadas, de maneira a permitirem resultados rápidos e confiáveis, como também, estruturas de medição e ensaios experimentais necessitam ser criados, de modo a comportarem os mais diversos tipos de protótipos a terem suas características avaliadas.

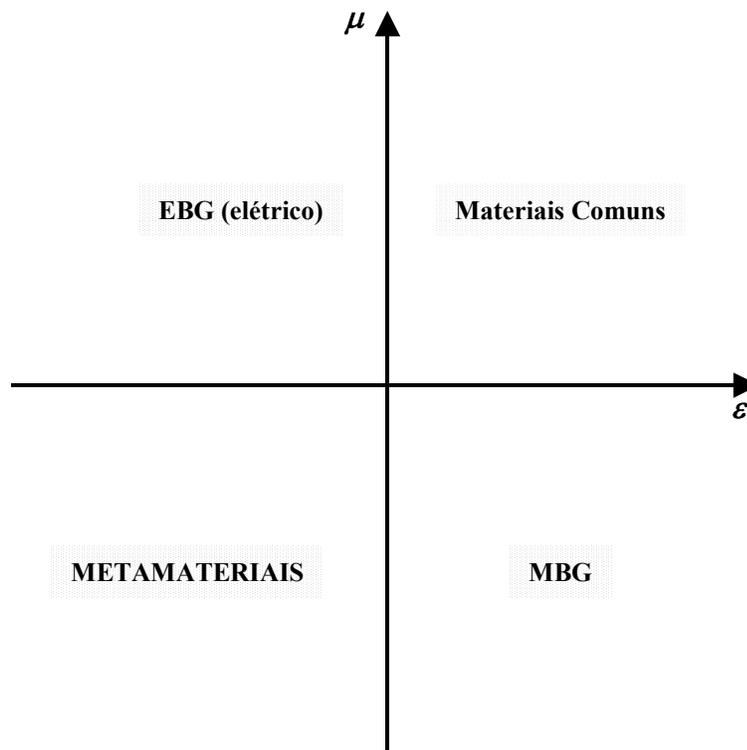


Figura 2.3.4: Tipos diferentes de meios eletromagnéticos possíveis

3. DESENVOLVIMENTO DO AMBIENTE DE MEDIÇÃO

3.1. Definição da Estrutura Para Testes e Medições

O Dr. Dan Davidov apresentou em um artigo publicado em 2003 [44], uma interessante metodologia de estudos para os metamateriais. Tratavam-se de partículas magnetizadas, da ordem de poucos milímetros de diâmetro, dispostas em placas de material dielétrico "transparente" para microondas. Essas partículas eram então imersas em um campo magnético extremamente estável e perpendicular à placa, de maneira a promover um arranjo espacial ordenado dessas partículas. A configuração de teste está mostrada na **Figura 3.1.1**.

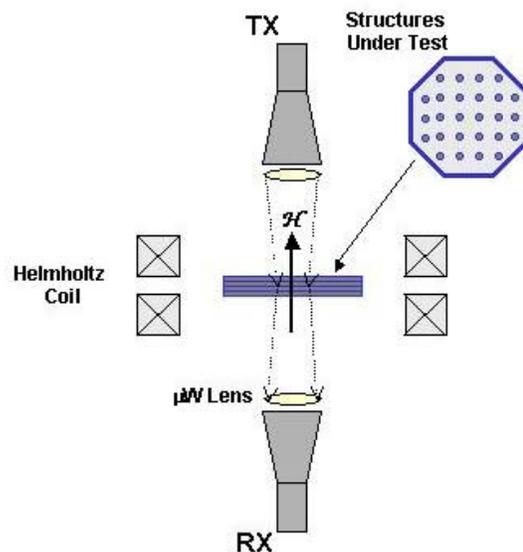


Figura 3.1.1: Esquema de medição de [44]

O sistema é composto por duas antenas tipo corneta, conectadas a um analisador de redes. O feixe das antenas é interceptado por uma lente de microondas, para garantir uma frente de onda plana. O campo magnético é gerado por um solenóide conhecido como *Helmholtz Coil* [45]. De uma forma geral, esse dispositivo é construído a partir de duas bobinas paralelas, conectadas a uma fonte de

corrente de grande estabilidade. Normalmente são necessários altos valores de correntes para a geração do campo magnético em sua região central. Esse campo é extremamente estável e conhecido, proporcionando testes e ensaios de grande confiabilidade. A **Figura 3.1.2** mostra um exemplo de um *Helmholtz Coil* em versão comercial.

Helmholtz Coil



Figura 3.1.2: *Helmholtz Coil* em versão comercial

A partir dessas informações, optou-se por adotar esse ambiente de medição, uma vez que apresentava condições interessantes para a realização dos testes com as estruturas metamateriais. Foi efetuado um estudo de viabilidade, onde se propôs a montagem apresentada pela **Figura 3.1.3**. Essa montagem apresenta algumas adaptações em relação à original.

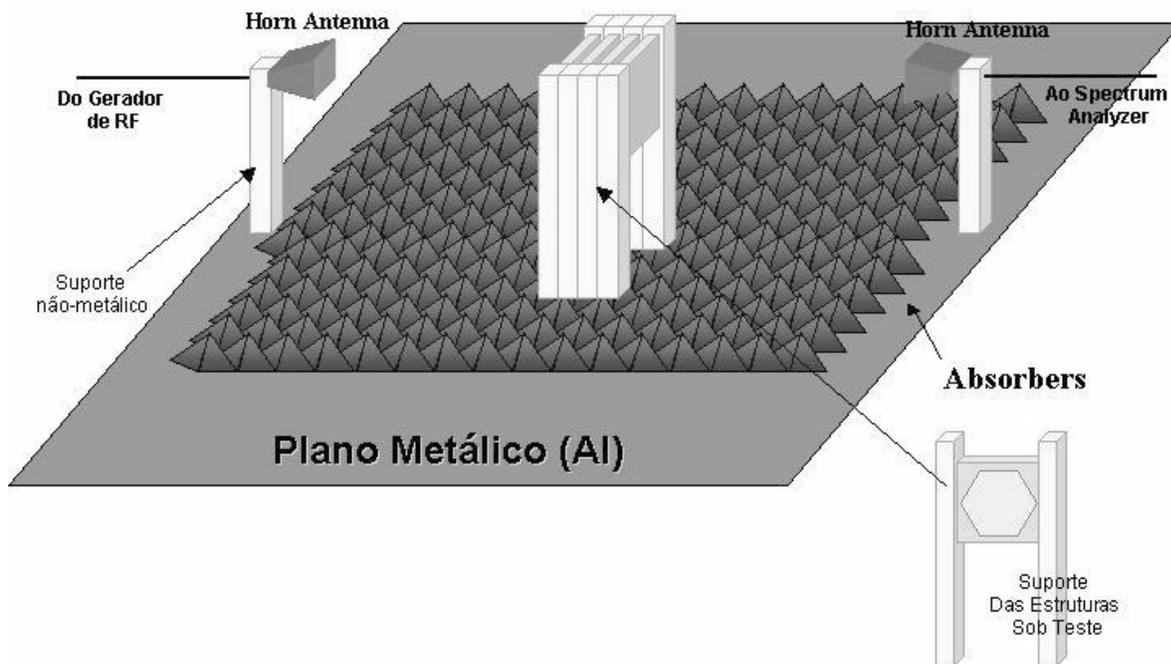


Figura 3.1.3: Estrutura adaptada sugerida para a realização dos testes

É composta por um plano metálico de referência, recoberto de material absorvedor de RF. As placas com os materiais sob teste seriam colocados entre as duas antenas tipo corneta (conectadas a um analisador de redes). O *Helmholtz Coil* seria inserido de maneira a envolver as placas sob teste.

As configurações das placas de material dielétrico, com as partículas utilizadas pelo Dr. Davidov, estão apresentadas na **Figura 3.1.4**. São três situações diferentes onde, para cada intensidade do campo magnético incidente sobre as partículas, obtém-se um arranjo espacial para as mesmas. Foram utilizados campos magnéticos de 30 mT, 7,2 mT e 0 mT ("sem campo", apenas considerando-se o campo magnético terrestre).

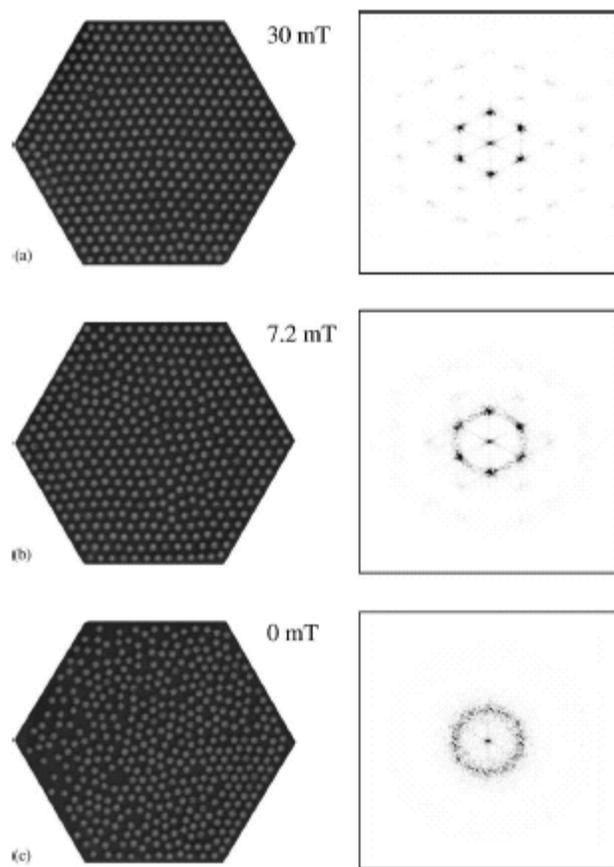


Figura 3.1.4: Configuração das estruturas metamateriais¹¹

Entretanto, a construção desse ambiente demonstrou-se pouco viável, após ser realizado um estudo rigoroso das dificuldades que seriam encontradas caso se optasse por essa configuração. Uma delas, e talvez a mais séria, era em relação à obtenção do *Helmholtz Coil*. Esse tipo de dispositivo não é fabricado no Brasil, necessitando importação. Seu custo atinge a casa de milhares de dólares americanos, e o tempo para entrega pode levar até alguns meses, dependendo dos trâmites de importação efetuados.

Ainda não tendo totalmente descartada a hipótese de utilização de um *Helmholtz Coil*, decidiu-se pela avaliação da possibilidade de construção desse instrumento em laboratório. Outro problema surgido em função dessa decisão foi em relação às dimensões da fonte de alimentação para o *Coil*, a qual deveria suprir cerca de 200 A, pelo menos, para se obter o nível de campo magnético utilizado pelo Dr. Davidov em seus testes (30 mT).

¹¹ Figura obtida de [44]

Basicamente, a montagem necessitaria oferecer uma região de campo elétrico estável e controlado, de modo que quaisquer inserções de materiais nessa região pudessem ter seus efeitos avaliados de forma confiável.

Uma opção ideal seria a utilização de uma câmara anecóica. Entretanto, essa opção era ainda mais inviável, face ao reduzido número desse tipo de instalação no país.

A partir de um artigo do Dr. Ozbay [46], um aspecto interessante foi observado. O ambiente de teste por ele utilizado não continha mais do que duas (ou três) antenas conectadas a um analisador de redes, alinhadas de forma que a estrutura a ser testada era inserida na região de propagação entre as antenas.. Assim, também, era o ambiente proposto por Hickman [47]. Neste último, a região destinada à inserção das estruturas sob teste (*EST*) apresentava um maior cuidado em relação aos aspectos de controle do ambiente eletromagnético.

Em seu artigo, Hickman propôs uma estrutura de teste que era composta por duas antenas conectadas a um analisador de redes. Porém, a região onde a EST era inserida, estava acondicionada em uma câmara metálica blindada, revestida internamente com material absorvedor de RF. Nessa câmara também estava instalada a antena receptora. Dessa forma, há uma maior garantia de exatidão nas medições, uma vez que as possíveis interferências externas são minimizadas. O esquema básico adotado por Hickman é apresentado na **Figura 3.1.4**¹².

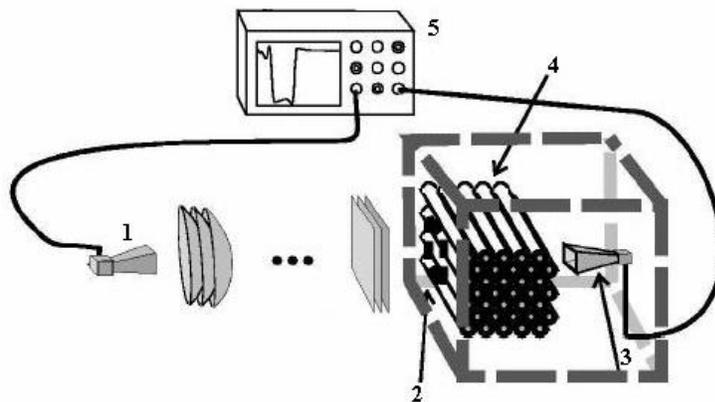


Figura 3.1.5: Ambiente utilizado por Hickman

Na **Figura 3.1.5** tem-se:

¹² Figura obtida de [47]

- [1] Antena emissora
- [2] Caixa blindada e revestida de material absorvador
- [3] Antena receptora
- [4] EST
- [5] Analisador Vetorial de Redes

A caixa metálica possui uma abertura de 140 x 170 mm que, para a frequência de 11 GHz (utilizada no ensaio apresentado pelo artigo) provoca efeitos desprezíveis sobre a propagação do campo. A antena emissora é disposta a uma distância de 1,60 m da caixa, já em região de campo distante. Isso garante que a frente de onda que incide na superfície de entrada da caixa seja plana. A caixa tem 0,60 m de lado e é revestida internamente com material absorvador para reduzir os efeitos de múltiplas reflexões nas paredes metálicas. O material utilizado para as EST's foi o acrílico, em forma de tubos de 1/2" (12,7 mm) de diâmetro externo, dispostos espacialmente em várias camadas, de forma a constituírem uma distribuição hexagonal (**Figura 3.1.6**).

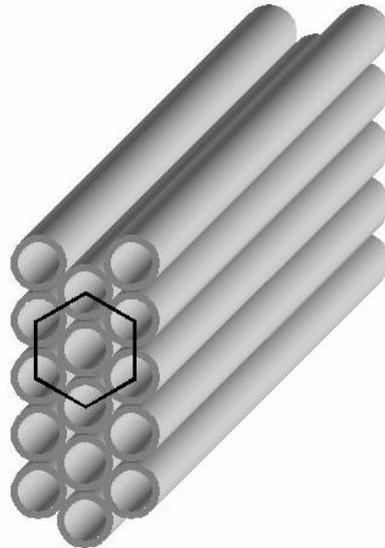


Figura 3.1.6: Disposição geométrica espacial do EST utilizado em [47]

Essa estrutura pode ser aproximada a uma placa perfurada, uma vez que os espaços entre os tubos são muito pequenos em relação ao comprimento de onda incidente, podendo-se considerar como um bloco perfurado (**Figura 3.1.7**).

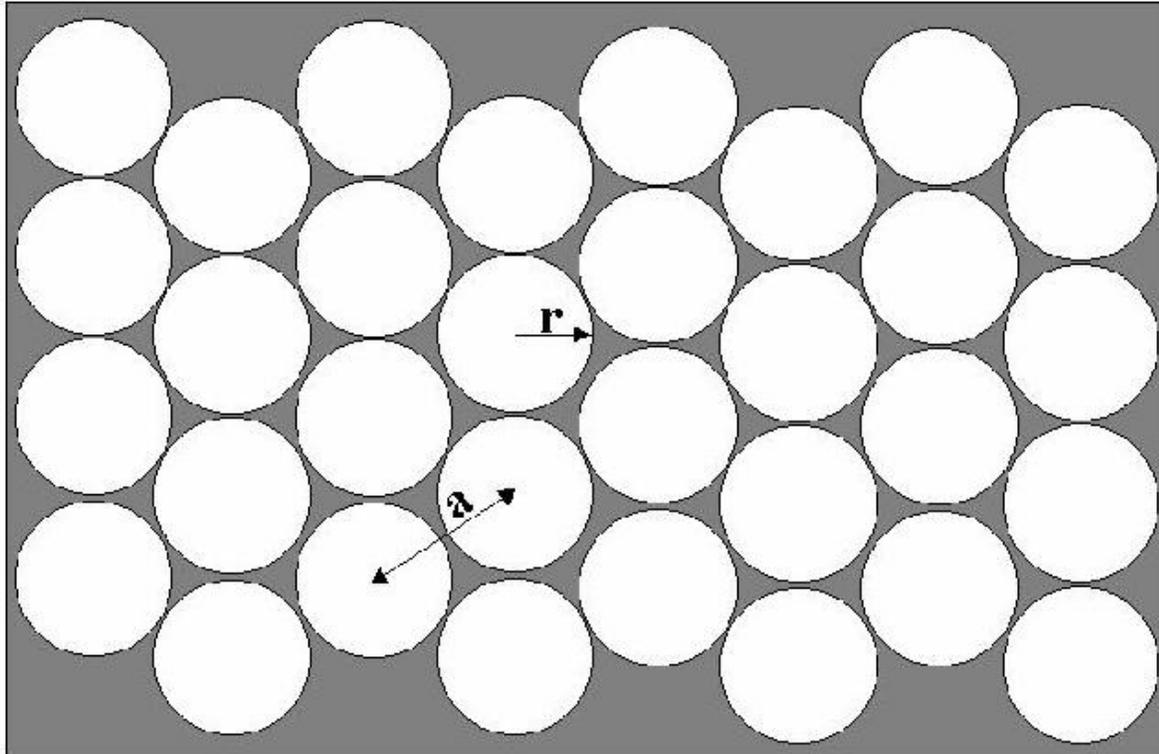


Figura 3.1.7: Estrutura aproximada para a disposição dos tubos.

Para a disposição hexagonal, a frequência de banda proibida pode ser calculada por [22]:

$$f_{bg} = k \cdot \frac{c}{a} \quad (3.1.1)$$

onde:

- f_{bg} - frequência de banda proibida
- k - índice que define o intervalo de frequência onde ocorre a banda proibida ($\sim 0,4$ a $0,5$)
- c - velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s)
- a - distância entre centros dos orifícios circulares

Utilizando-se a expressão (3.1.1), obtém-se a seguinte curva de predição da banda de frequência proibida, para modo TM, em função da distância a (**Figura 3.1.8**):

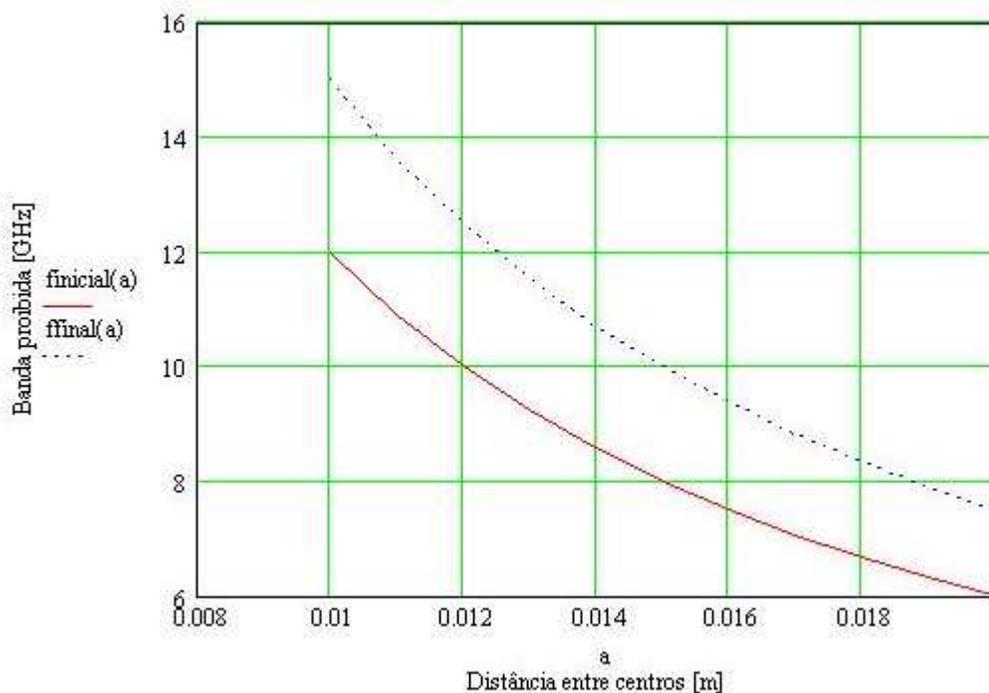


Figura 3.1.8: Banda proibida, para modo TM, em função da distância a

Sob vários aspectos analisados, a montagem de testes descrita por Hickman demonstrou ser a opção mais viável pois, com exceção do analisador de redes, os demais equipamentos e materiais eram de fácil aquisição.

3.2. Construção do Ambiente de Testes

Tendo sido escolhida uma montagem viável para ser reproduzida de forma simples e econômica, passou-se então à fase de projeto e montagem do referido ambiente.

Foram adquiridas duas antenas tipo corneta, de fabricação nacional, com as seguintes características (**Tabela 3.2.1**):

Tabela 3.2.1: Características técnicas da antena corneta

Marca	M2SAT - São José dos Campos - SP
Modelo	MCP75
Ganho dBi	10
Frequência	10 - 15 GHz
VSWR	1.20 : 1.00
Abertura	153 mm x 127 mm
Adaptador	MGC75 (Tipo N/fêmea)

Detalhes da antena e adaptador estão mostrados na **Figura 3.2.1:**

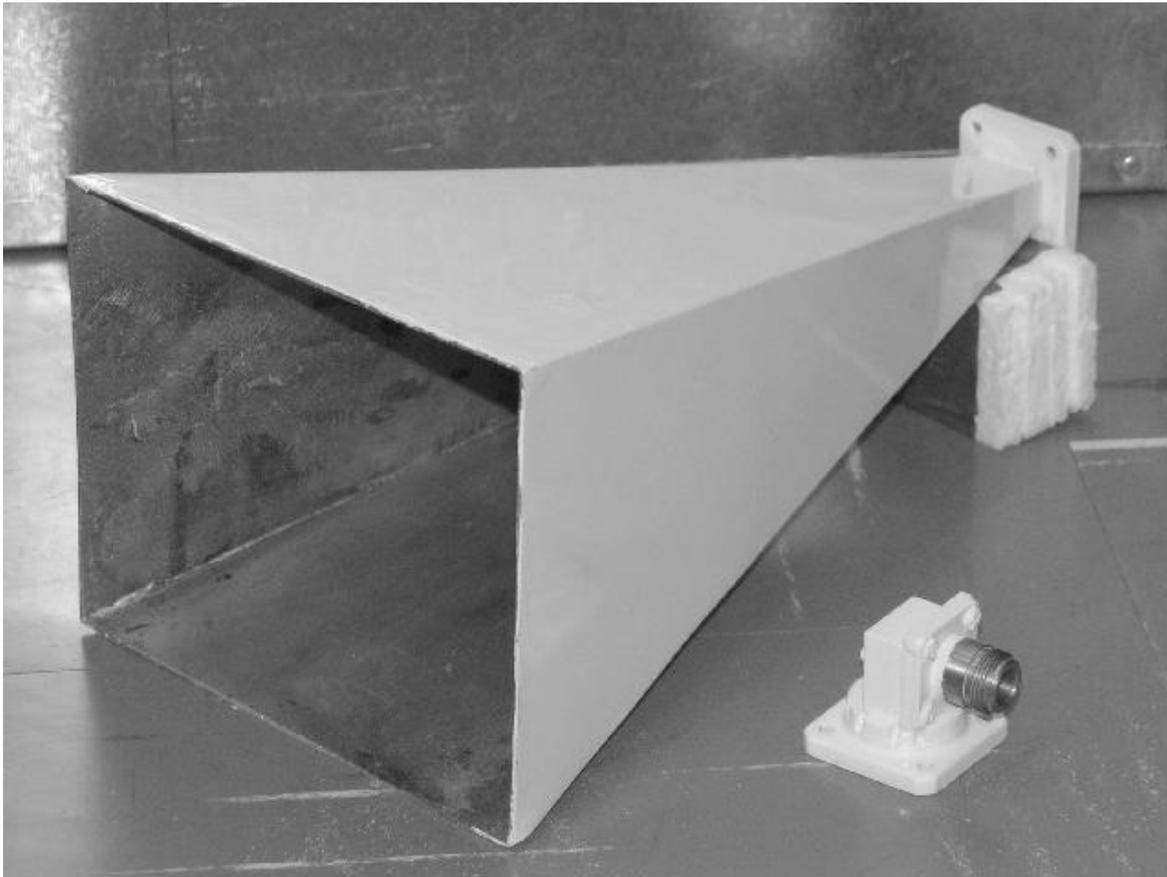


Figura 3.2.1: Antena corneta e adaptador coaxial tipo N

Um fato importante a ser ressaltado em relação às antenas, é que o valor desembolsado para a aquisição destas no país foi de cerca de 1/4 (um quarto) do valor que seria desembolsado para o mesmo tipo de produto, se adquirido por importação. Ainda, o prazo de entrega praticado pela empresa nacional é de 15 (quinze) dias enquanto que, para produtos importados, esse prazo é de no mínimo, 60 dias. O próximo passo foi o projeto e construção da caixa metálica, que deveria ser utilizada como uma mini câmara anecóica para as medições.

A caixa foi construída em chapa aço galvanizado comum, de 0,5 mm de espessura, a um custo muito baixo (menos de US\$ 20,00), por uma empresa da região, fabricante de calhas residenciais e industriais. A caixa tem a forma de um cubo, com 0,60 m de aresta, equipada com tampa metálica para um melhor efeito da blindagem da câmara contra interferências externas. A espessura da chapa de aço, para as frequências de trabalho utilizadas (~10 e 15 GHz), proporciona uma boa eficiência de blindagem, pois a profundidade pelicular para o aço, nessa faixa de frequência, é da ordem de frações de milímetro (**Figura 3.2.2**):

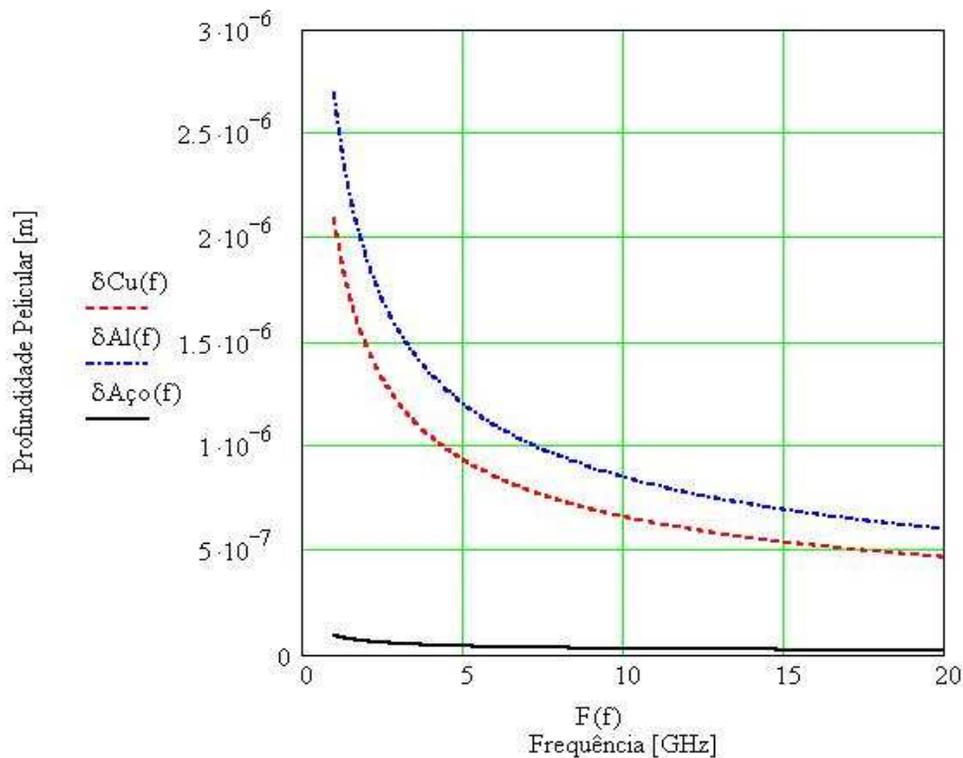


Figura 3.2.2: Profundidade pelicular para o cobre, alumínio e aço

A profundidade pelicular (ou efeito pelicular), identificada pela letra grega δ , indica o quanto a corrente penetra no metal, em função da frequência de operação e das características do metal [13]. O efeito pelicular é calculado pela seguinte expressão:

$$\delta(f) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (3.2.1)$$

onde:

- $\delta(f)$ - Profundidade pelicular, em [m]
- f - Frequência de operação, em [Hz]
- μ - Permeabilidade do material, em [H/m]
- σ - Condutividade do material, em [S/m]

A caixa foi revestida com material absorvedor de RF fornecido pela empresa Andrew do Brasil Ltda. com as seguintes características técnicas (**Tabela 3.2.2**):

Tabela 3.2.2: Características técnicas do material absorvedor de RF

Modelo	205763-2
Frequência	5,9 - 8,2 GHz
Dimensões	609 x 609 x 50 mm
Atenuação	16 dB (p/ frequência especificada acima)

Mesmo tendo utilizado frequências acima da faixa especificada, o material absorvedor apresentou bom desempenho de atenuação.

As medições foram efetuadas no **Laboratório de Eletromagnetismo Avançado "Prof. Dr. Rui Fragassi Souza"**, utilizando-se um Analisador Vetorial de Redes, cujas características técnicas estão apresentadas na **Tabela 3.2.3**:

Tabela 3.2.3: Ficha técnica do analisador vetorial de redes

Marca	Wiltron
Modelo	37369 A
Frequência	40 MHz - 40 GHz

Para reproduzir o experimento realizado pelo Dr. Hickman, ainda havia a necessidade de construção dos cristais os quais, como citado no artigo, eram constituídos por tubos de acrílico de 1/2" de diâmetro externo. Entretanto, face ao altos custos para aquisição desse material, assim como prazos de entrega longos, optou-se pela busca de um material alternativo, que pudesse ser utilizado sem provocar significativas alterações no experimento. Optou-se, então, pela utilização de tubos de PVC que, além de baixo custo, são facilmente encontrados em lojas de materiais hidráulicos. O tubo utilizado tem diâmetro externo de 15 mm e interno, de 12 mm (**Figura 3.2.3**):

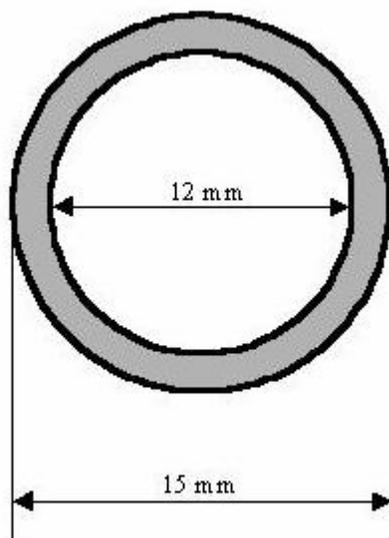


Figura 3.2.3: Dimensões do tubo de PVC utilizado

O valor total para a montagem dos cristais (grades) em PVC foi de aproximadamente 1/20 (um vigésimo) do que seria necessário para a mesma montagem em tubos de acrílico. A **Figura 3.2.4** mostra o tipo de tubo e adesivo utilizados para a montagem.

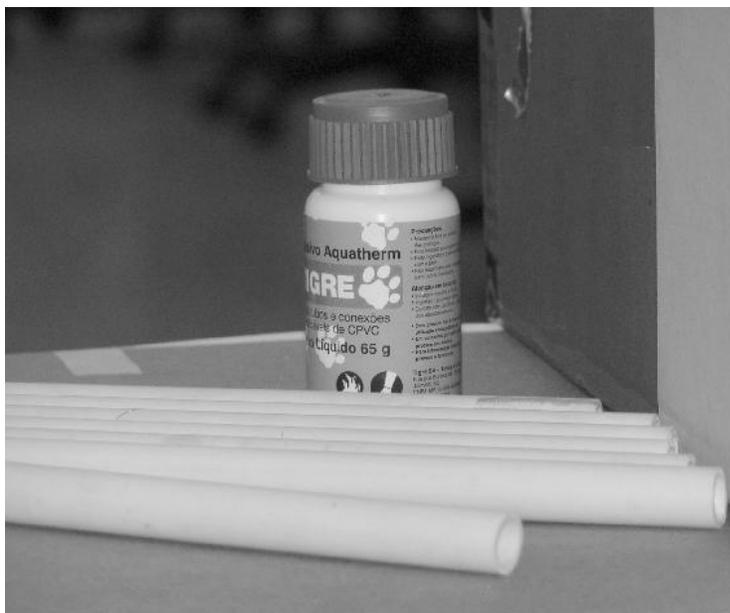


Figura 3.2.4: Tubos e adesivo próprio utilizados na confecção dos cristais (grades)

Os cristais foram montados em células unitárias de três camadas de tubos cada, sendo que cada camada era constituída por 13 tubos de 250 mm cada, colados lado a lado (**Figura 3.2.5.a**). Ao todo, foram construídas sete células unitárias, perfazendo um total de 21 camadas de tubos.

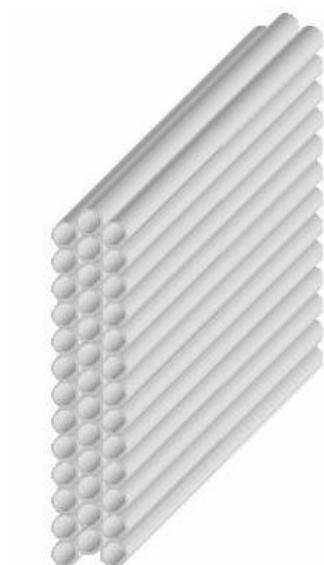


Figura 3.2.5.a: Célula unitária do cristal

A **Figura 3.2.5.b** apresenta o aspecto final, depois de montadas, de algumas células unitárias:

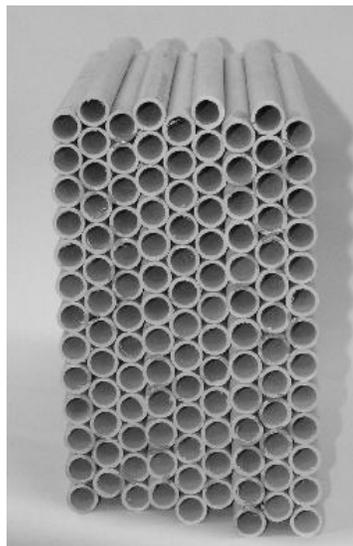


Figura 3.2.5.b: Células unitárias construídas em PVC

Foram feitas duas aberturas na caixa metálica, de modo que uma dela comportaria a abertura da antena corneta receptora, enquanto que a outra seria a entrada do campo incidente sobre os cristais. O aspecto final da caixa metálica é apresentado na **Figura 3.2.6**.

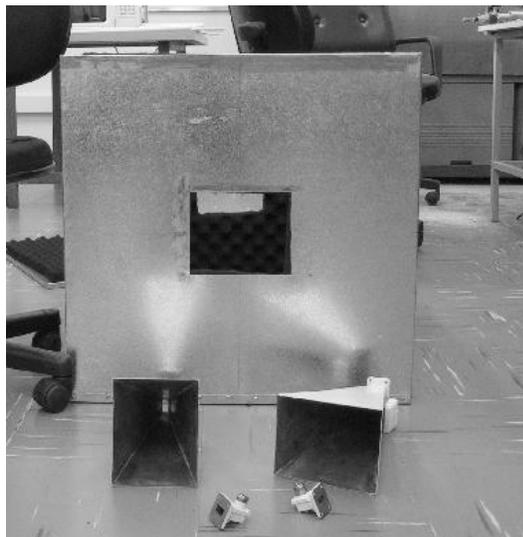
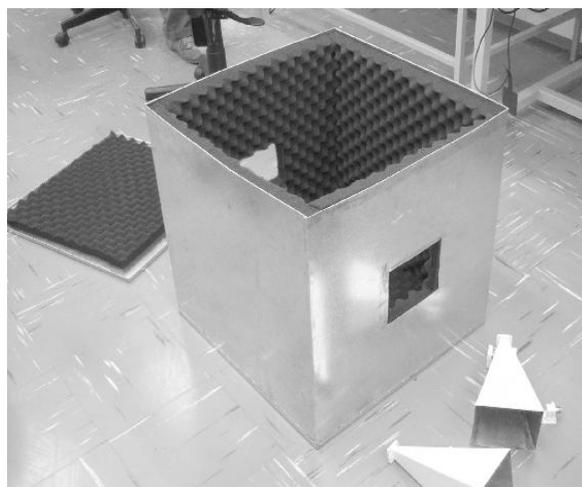


Figura 3.2.6: Caixa metálica (câmara) depois de finalizada

Tendo em mãos todos os elementos necessários, passou-se então para a fase de caracterização do ambiente de medições e, posteriormente, para as medições com os cristais.

3.3 Caracterização do Ambiente de Medições

A montagem para os testes obedeceu ao esquema apresentado pelo Dr. Hickman em seu artigo [47]. A antena emissora foi disposta de forma a ficar alinhada e à mesma altura da antena receptora, a uma distância de 1,60 m da abertura de entrada da câmara. Essa região já proporciona condições de campo distante, em função das dimensões das antena e da frequência de operação. O gráfico apresentado na **Figura 3.3.1** traz a relação entre frequência e campo distante para algumas dimensões de antenas.

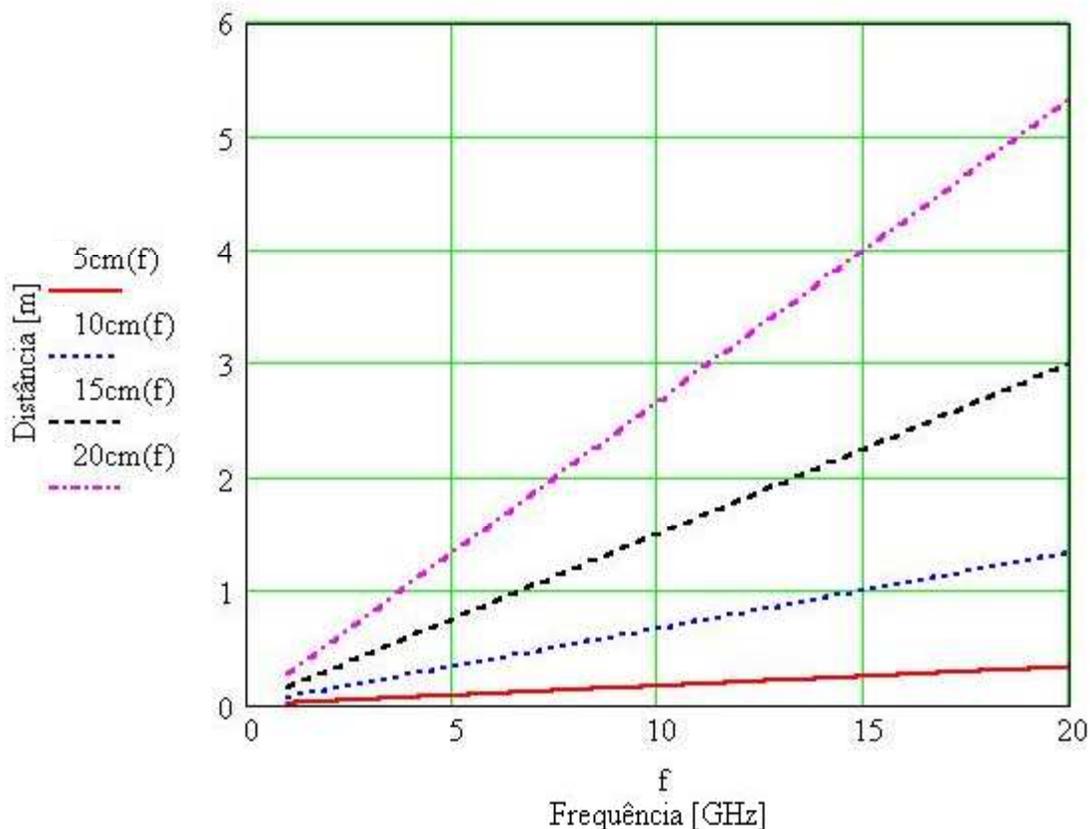


Figura 3.3.1: Campo distante em função da frequência e dimensões de algumas antenas

De forma a facilitar as medições, foi instalada no interior da câmara uma mesa de madeira, onde poderiam ser dispostas as grades dielétricas em várias configurações diferentes (**Figura 3.3.2**).

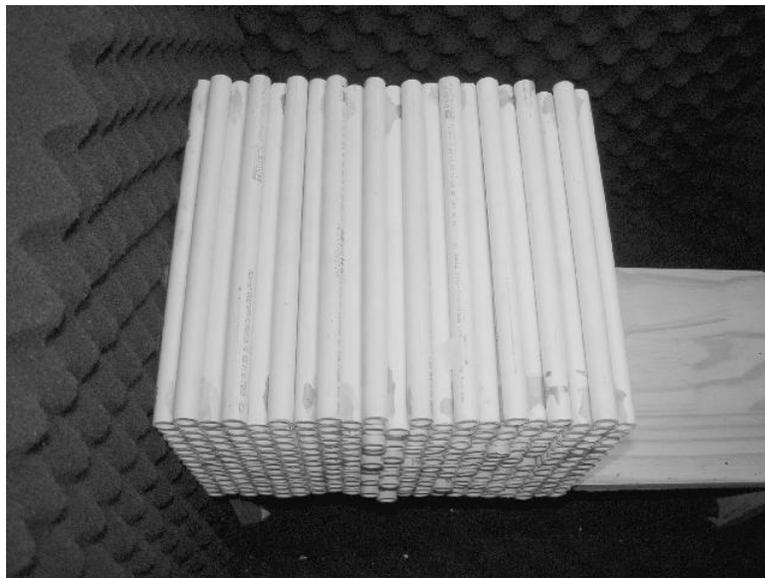


Figura 3.3.2: Vista de topo da câmara. Mesa de madeira para suportar as grades dielétricas.

As **Figuras 3.3.3** e **3.3.4** apresentam o analisador de redes utilizado bem como, uma vista geral da montagem de testes em sua configuração final.



Figura 3.3.3: Analisador de redes Wiltron



Figura 3.3.4.a: Vista frontal da montagem de testes

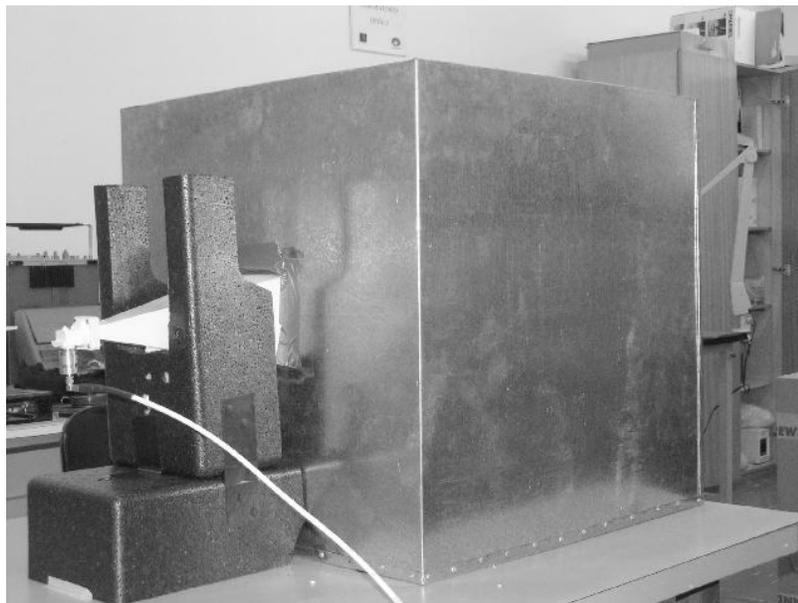


Figura 3.3.4.b: Vista da parte traseira da câmara

As primeiras duas medições efetuadas foram para verificar o comportamento de resposta das antenas instaladas na montagem e, também, da eficiência de blindagem da câmara. Para esta última, a câmara teve todas as suas aberturas (frontal e tampa superior) fechadas. A oclusão da abertura frontal foi feita com uma placa de alumínio, colada na superfície da câmara com uma fita adesiva de cobre, condutora, própria para aplicações em RF (**Figura 3.3.5**).



Figura 3.3.5: Oclusão do orifício frontal da câmara.

As curvas da transmissão entre as antenas e da atenuação da blindagem estão apresentadas nos gráficos das **Figuras 3.3.6.a** e **3.3.6.b**, respectivamente. Pode-se observar que, para o pior caso, a atenuação proporcionada pela blindagem é de 40 dB. Esse efeito pode ser melhor constatado no gráfico mostrado na **Figura 3.3.7**.

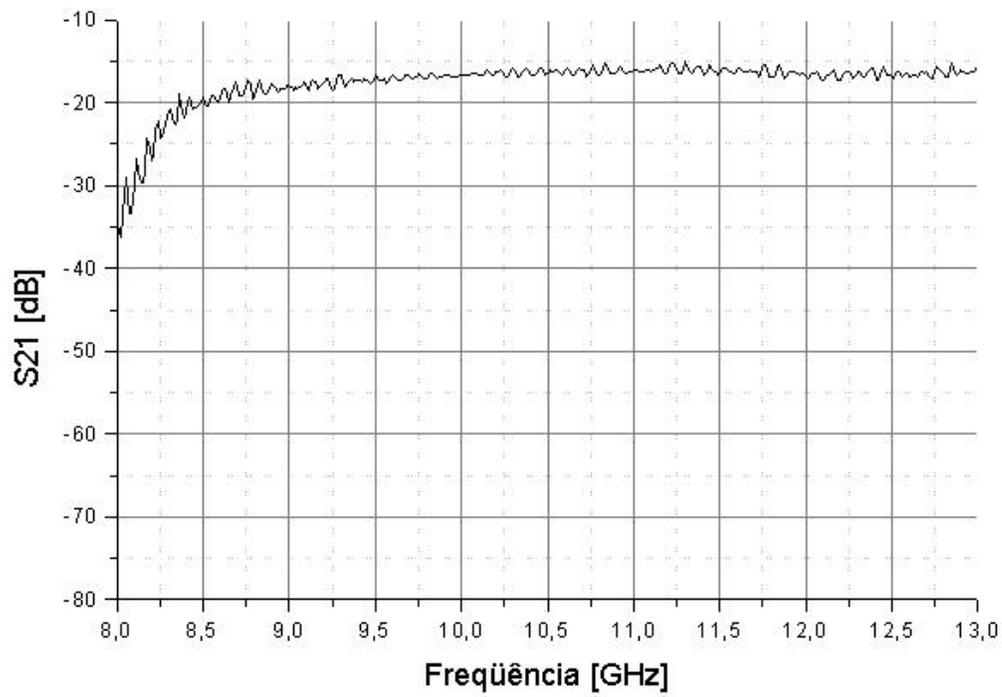


Figura 3.3.6.a: Transmissão entre as antenas

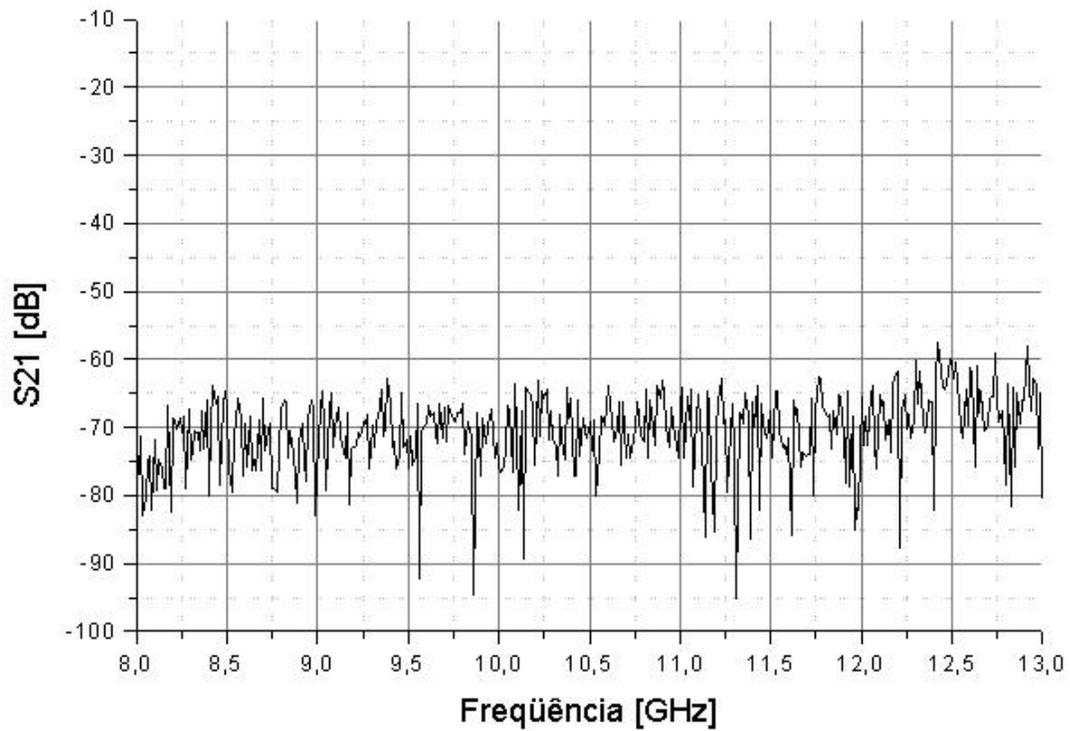


Figura 3.3.6.b: Efeito de blindagem da câmara

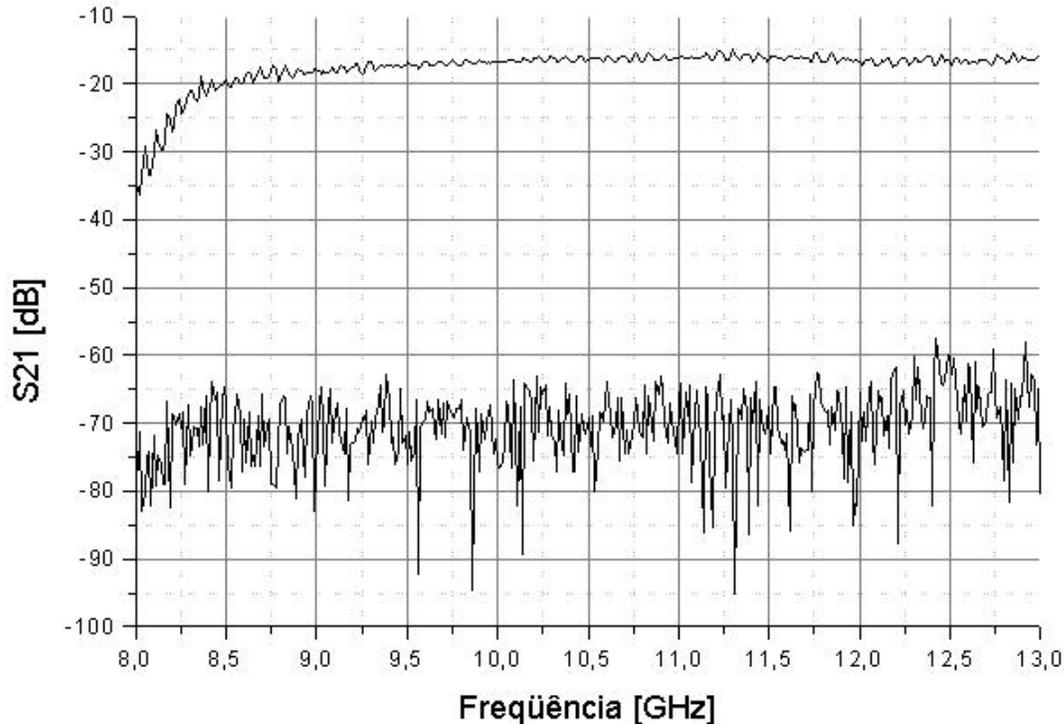


Figura 3.3.7: Comparação entre transmissão e atenuação da câmara

Após vários testes, o ambiente eletromagnético obtido com a montagem descrita demonstrou ser bastante confiável para a realização de ensaios em seu interior. A partir desse resultado, iniciou-se o estudo do comportamento das grades dielétricas construídas com tubos de PVC.

3.4. Estudo Experimental com as Grades Dielétricas

Conforme já descrito anteriormente, as grades dielétricas utilizadas pelo Dr. Hickman em seus experimentos eram construídas em tubos de acrílico com 1/2" de diâmetro. Duas questões surgiram ao se optar pela construção das grades em tubos de PVC:

- o seu comportamento em frequência, uma vez que o PVC é um material de baixa pureza [48], normalmente carregado por constituintes minerais, como, por exemplo, o talco;
- a faixa de frequência de operação das grades em função do diâmetro dos tubos, uma vez que o objetivo era se obter o efeito de banda proibida. Havia receio que as antenas talvez não

respondessem dentro da faixa que poderia ser obtida com tubos de maior diâmetro (a banda proibida poderia estar abaixo de 10 GHz, que era o limite inferior de operação da antena utilizada).

Os cálculos efetuados em função da geometria adotada, utilizando-se a equação (3.1.1) indicaram uma faixa para a banda proibida situada entre 8 GHz e 10 GHz para o modo TM), pois a dimensão entre os centros dos tubos (a) era agora de 15 mm. Logo, a partir dos resultados das medições efetuadas, constatou-se que o material respondeu acima das expectativas.

As medidas efetuadas foram divididas da seguinte forma:

- inserção de células unitárias, até um total de 7 células, para o modo TE;
- inserção de células unitárias, até um total de 7 células, para o modo TM;
- criação de alguns defeitos nas grades, para observação do comportamento;
- medição da energia presente no interior dos defeitos, através de uma sonda de campo elétrico;
- modificação na posição das grades dielétricas (45° e 90°).

As curvas mostradas pelas **Figuras 3.4.1** até **3.4.7** apresentam os resultados das medições efetuadas para o modo TE, para as sucessivas inserções de células unitárias até o total de 7 células compondo a grade dielétrica. Os resultados obtidos com medições para o modo TM estão mostrados nas **Figuras 3.4.8** a **3.4.14**.

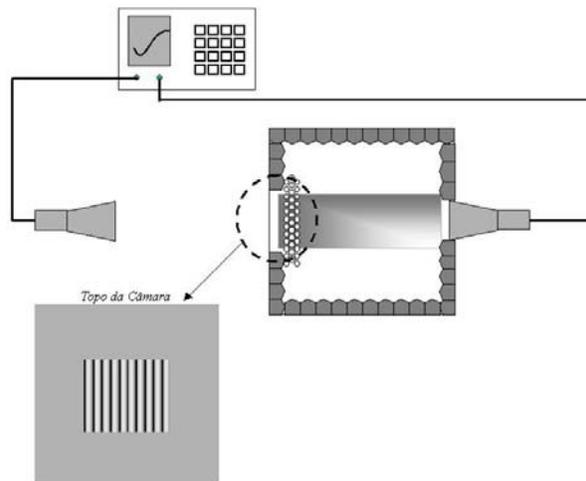
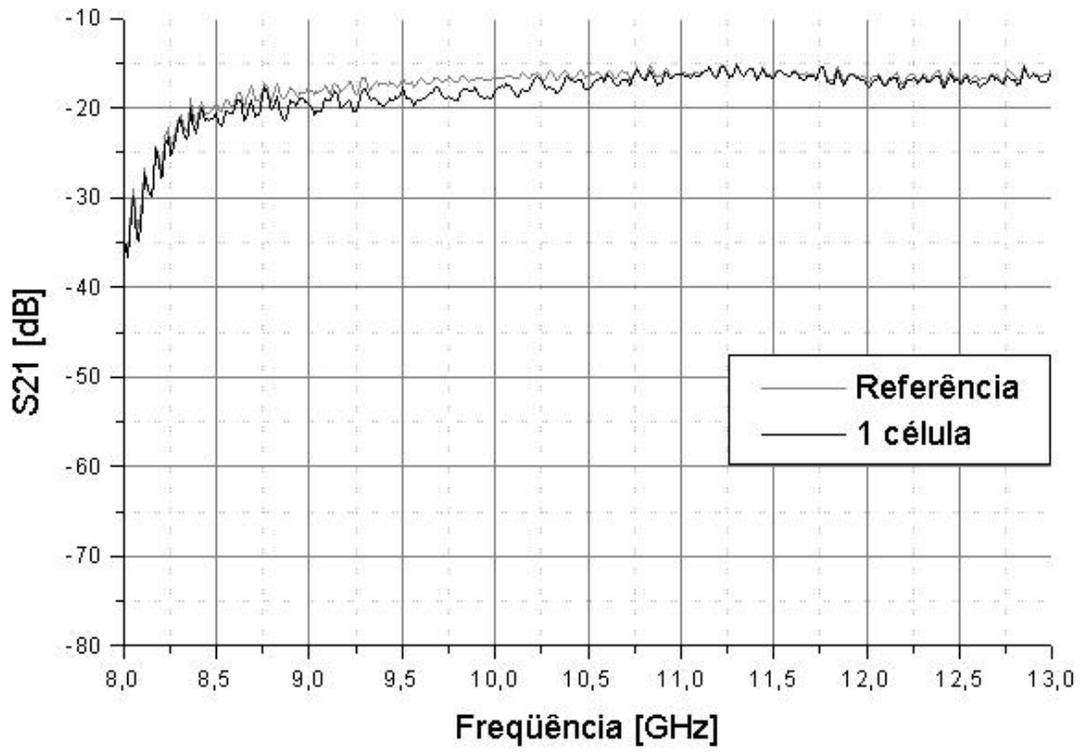


Figura 3.4.1: Inserção de 1 célula unitária - modo TE

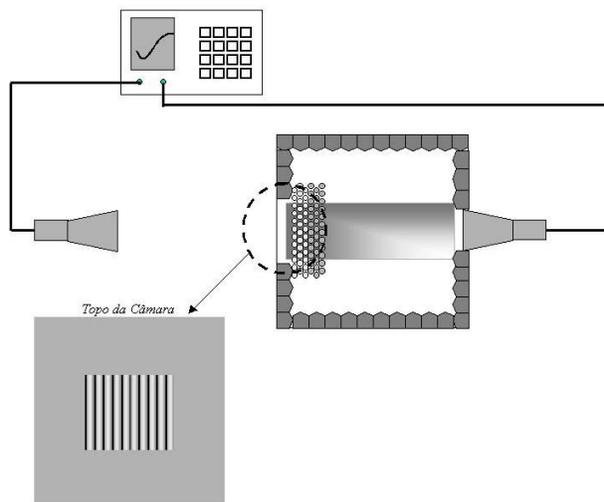
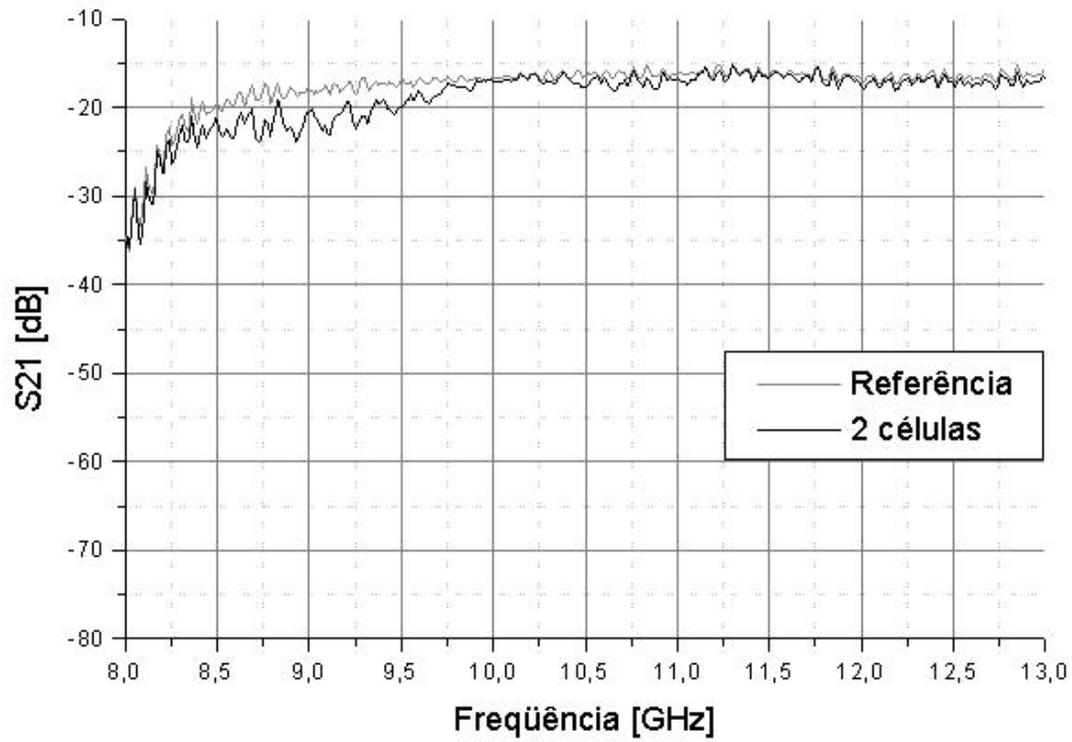


Figura 3.4.2: Inserção de 2 células unitárias - modo TE

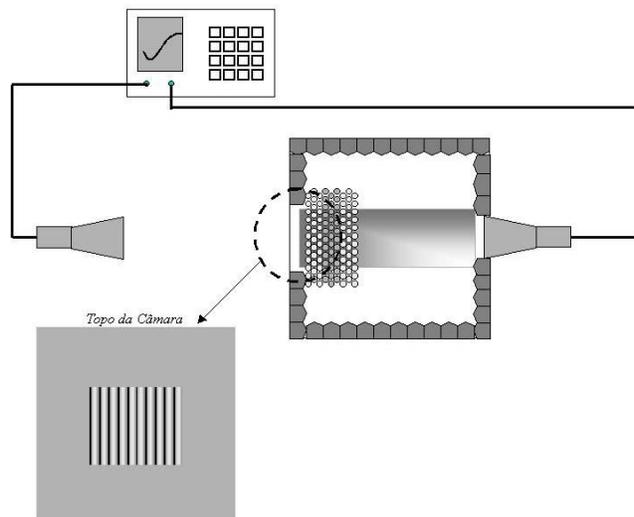
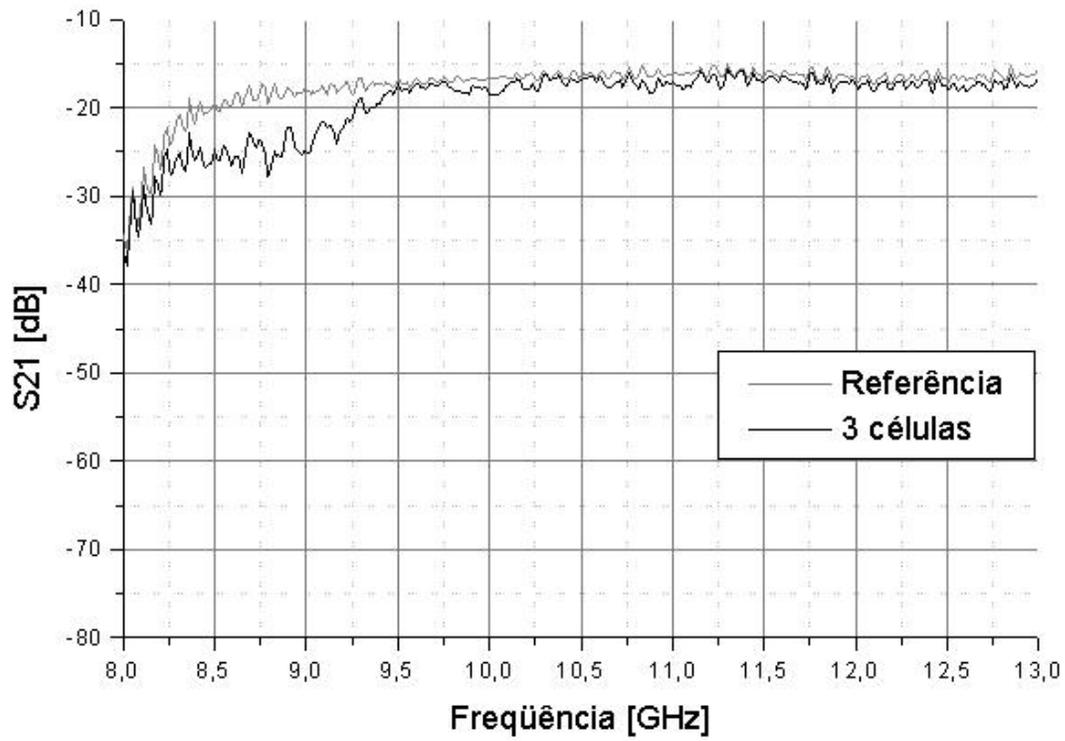


Figura 3.4.3: Inserção de 3 células unitárias - modo TE

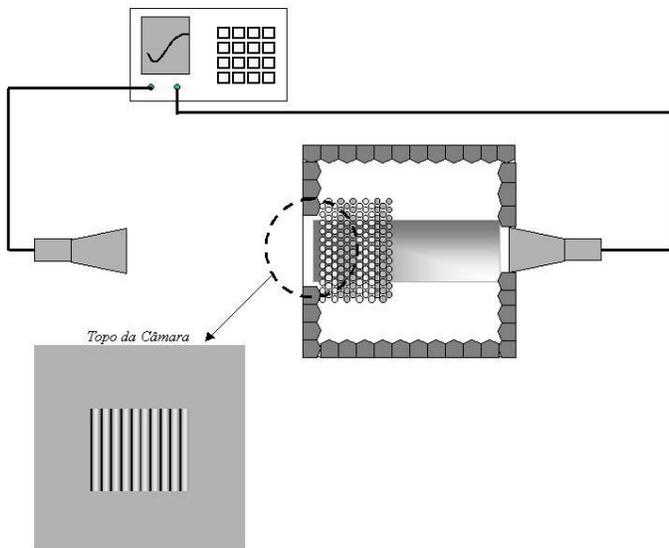
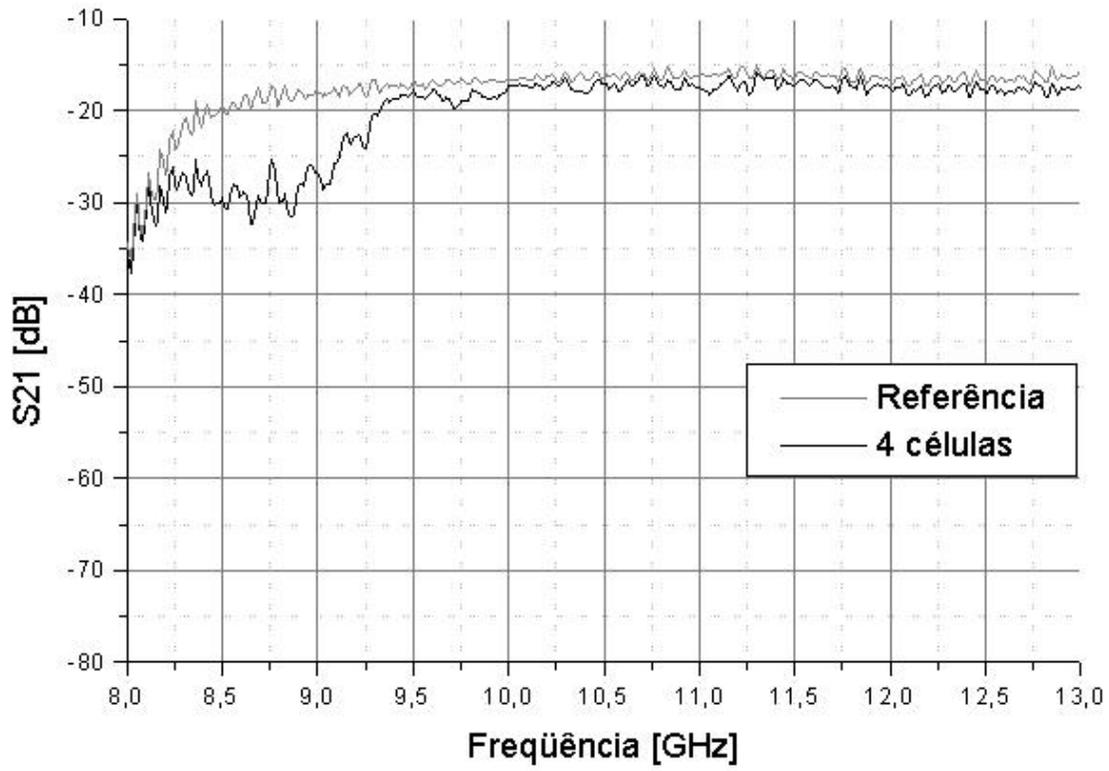


Figura 3.4.4: Inserção de 4 células unitárias - modo TE

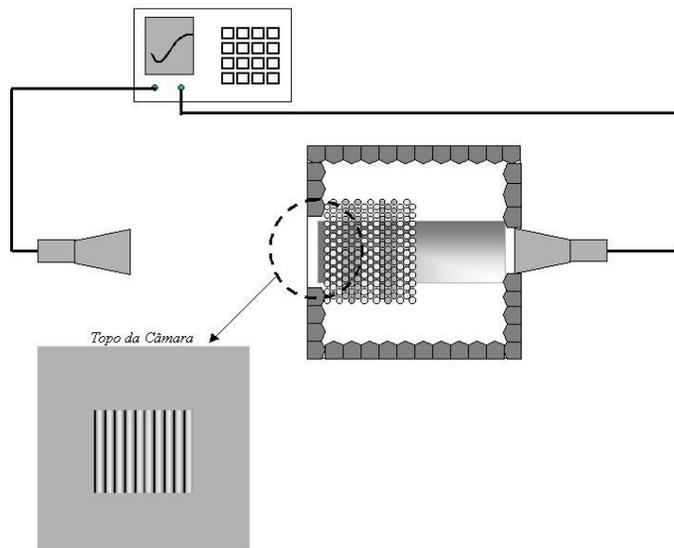
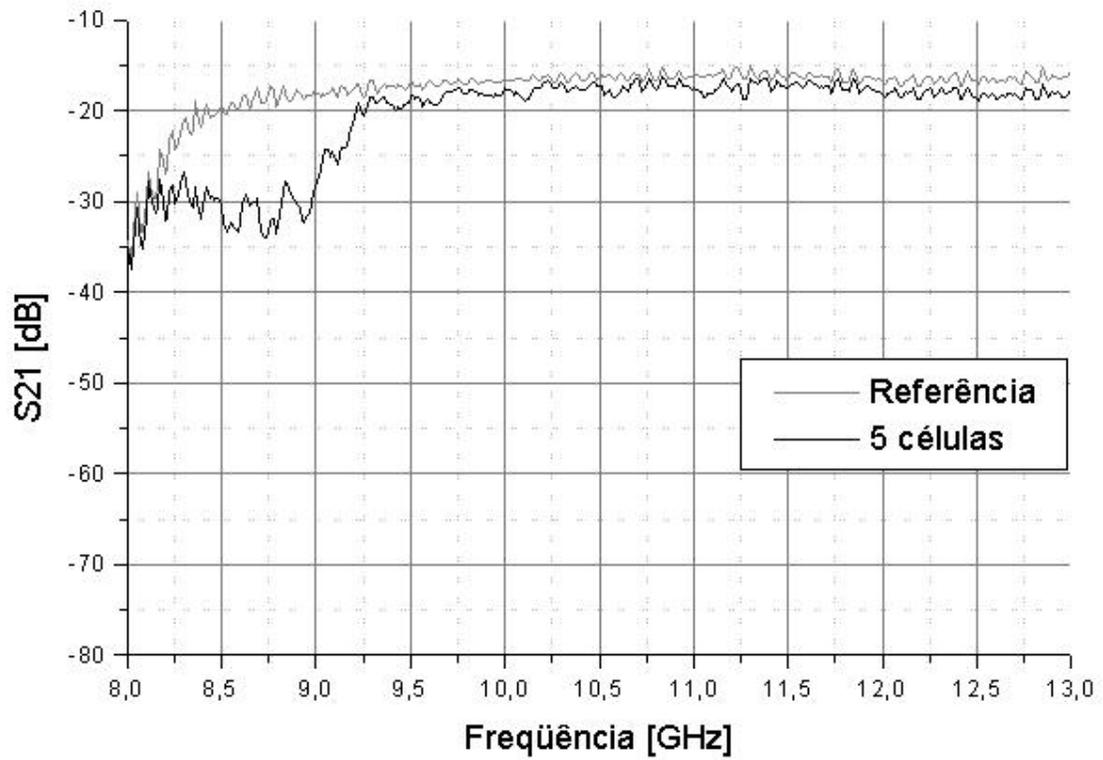


Figura 3.4.5: Inserção de 5 células unitárias - modo TE

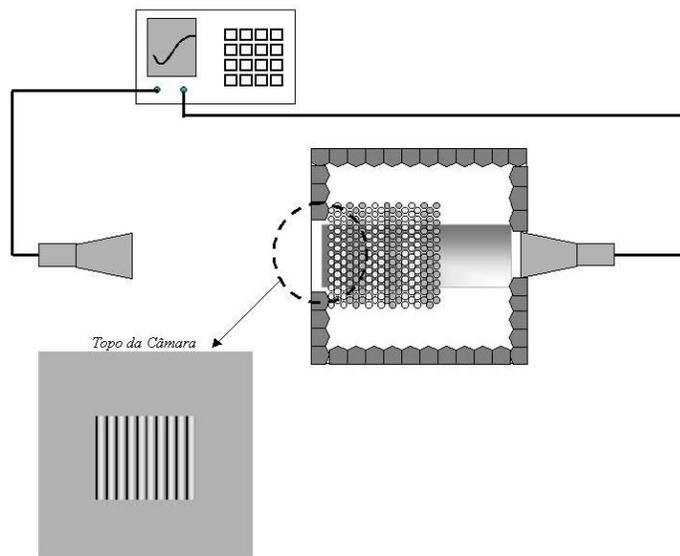
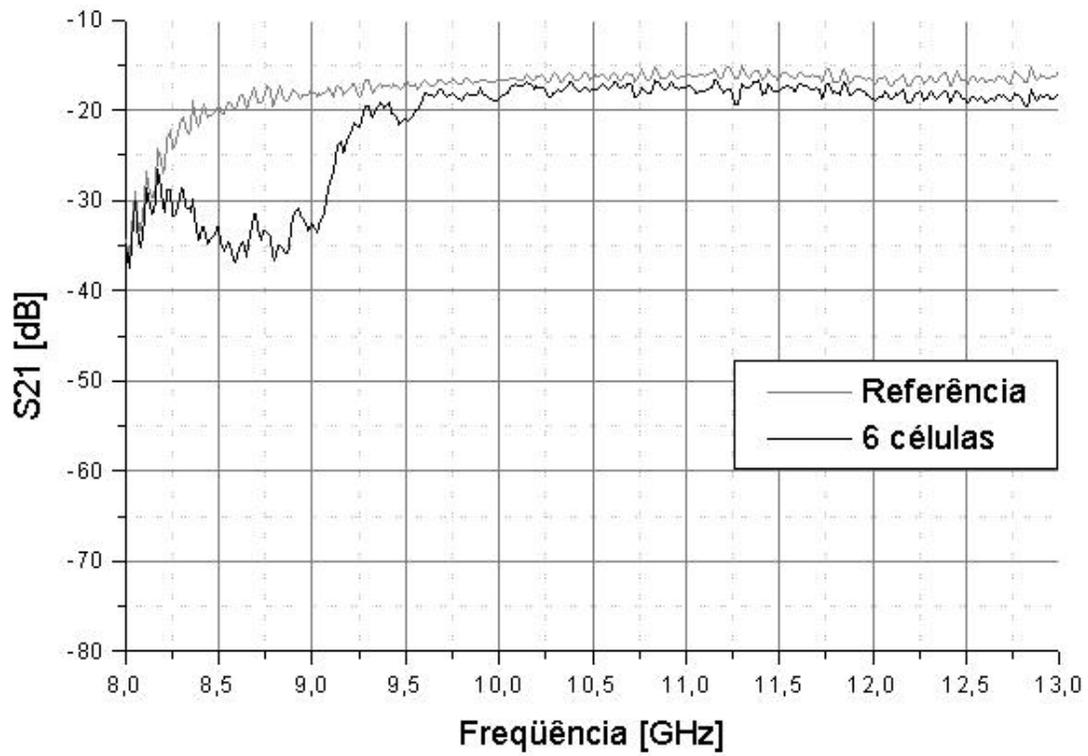


Figura 3.4.6: Inserção de 6 células unitárias - modo TE

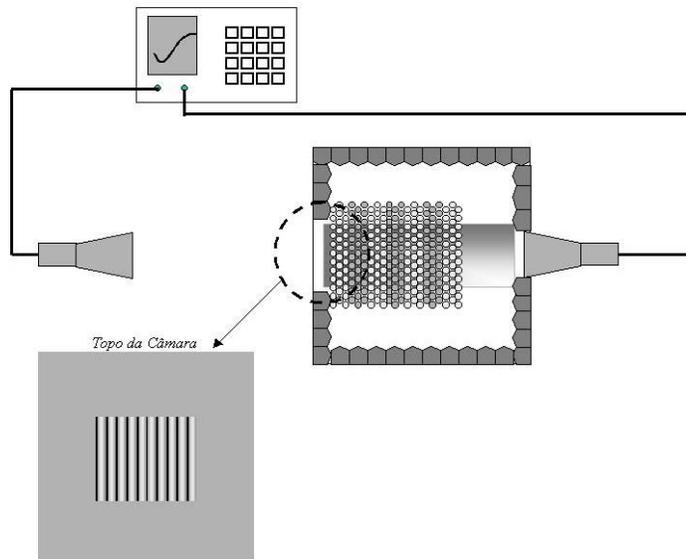
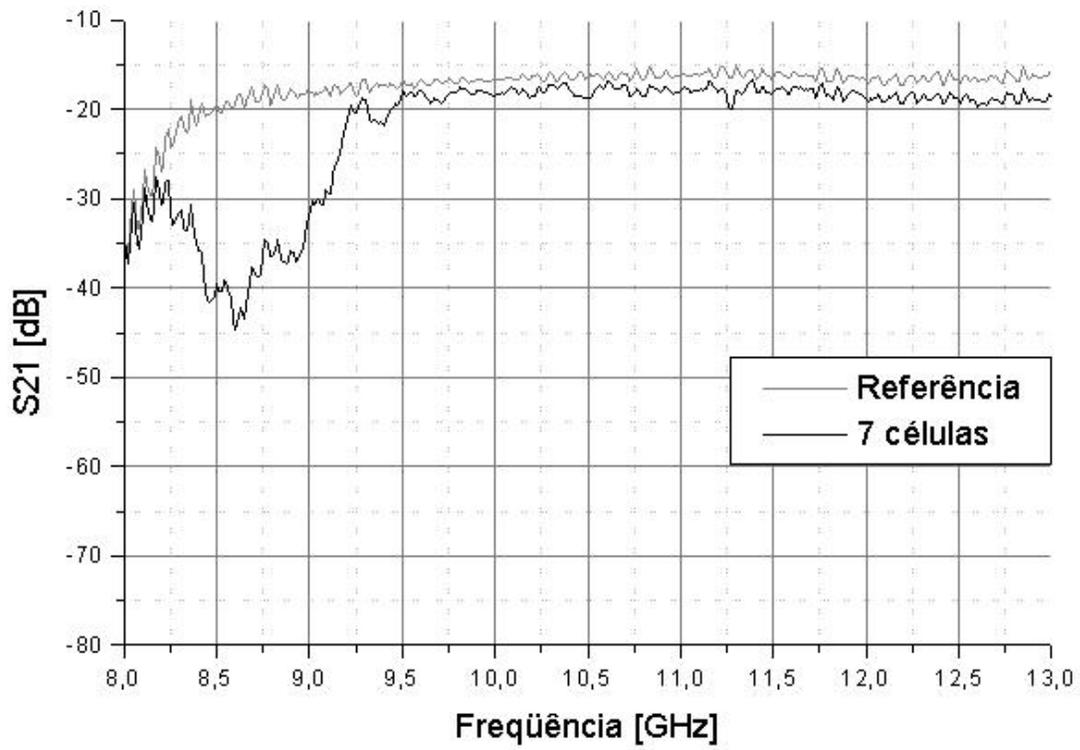


Figura 3.4.7: Inserção de 7 células unitárias - modo TE

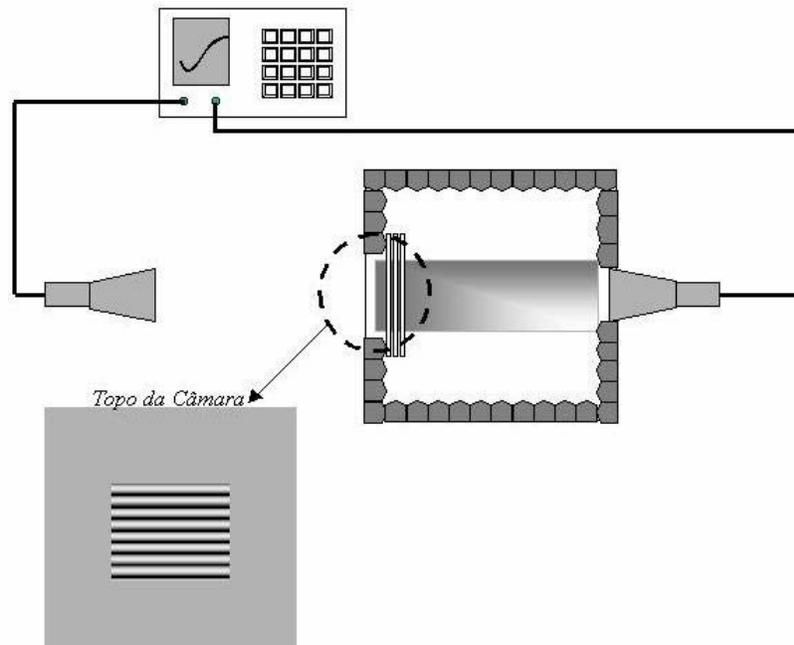
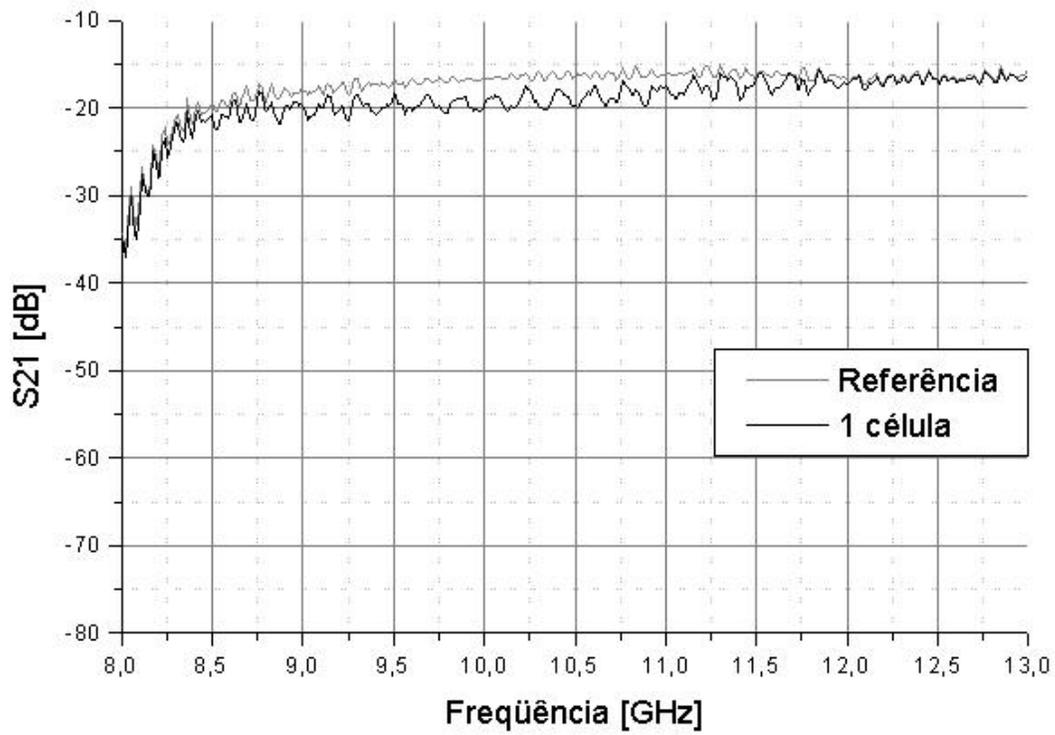


Figura 3.4.8: Inserção de 1 célula unitária - modo TM

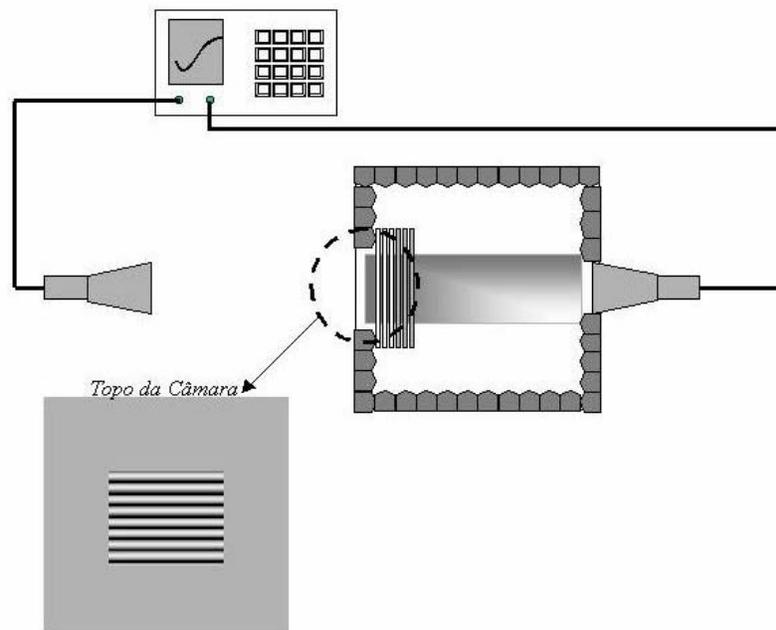
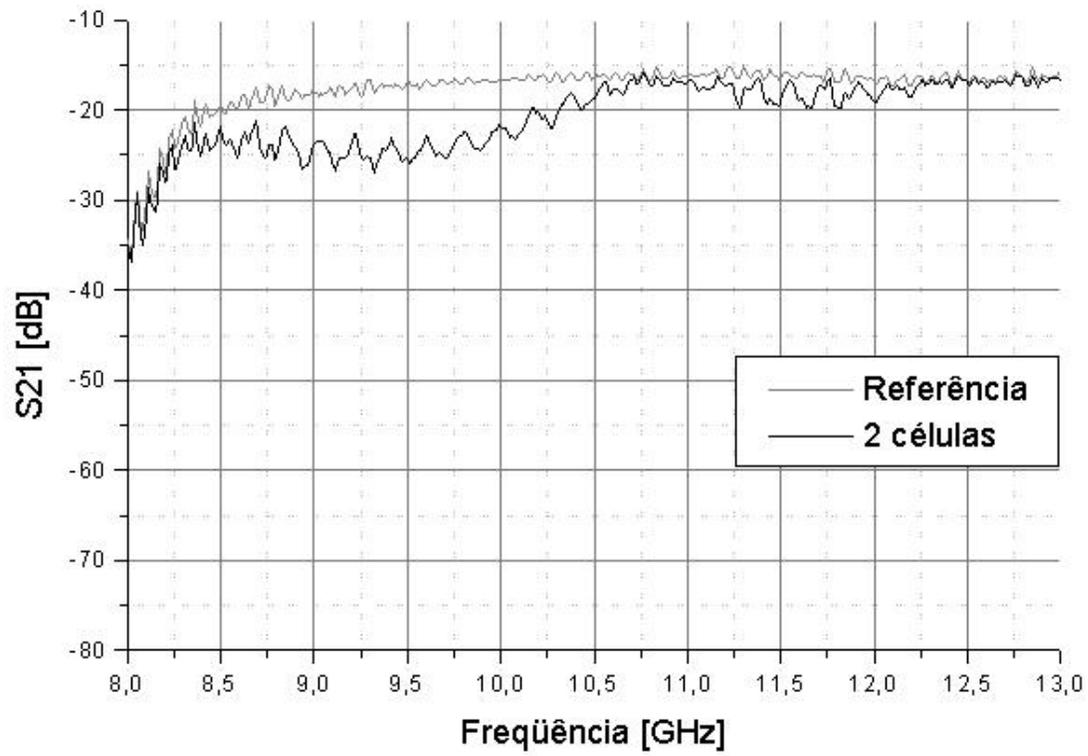


Figura 3.4.9: Inserção de 2 células unitárias - modo TM

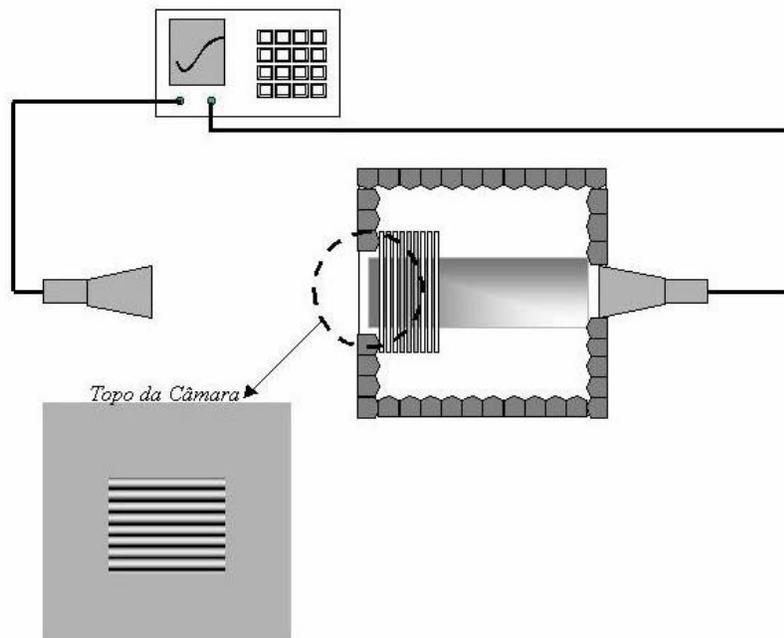
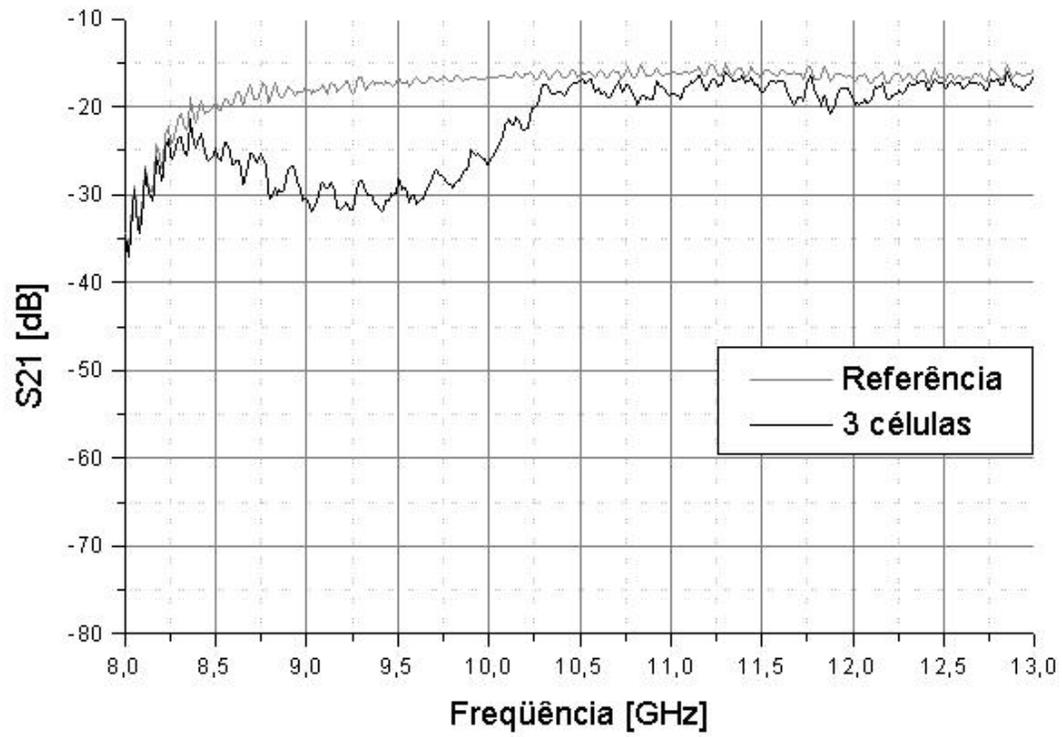


Figura 3.4.10: Inserção de 3 células unitárias - modo TM

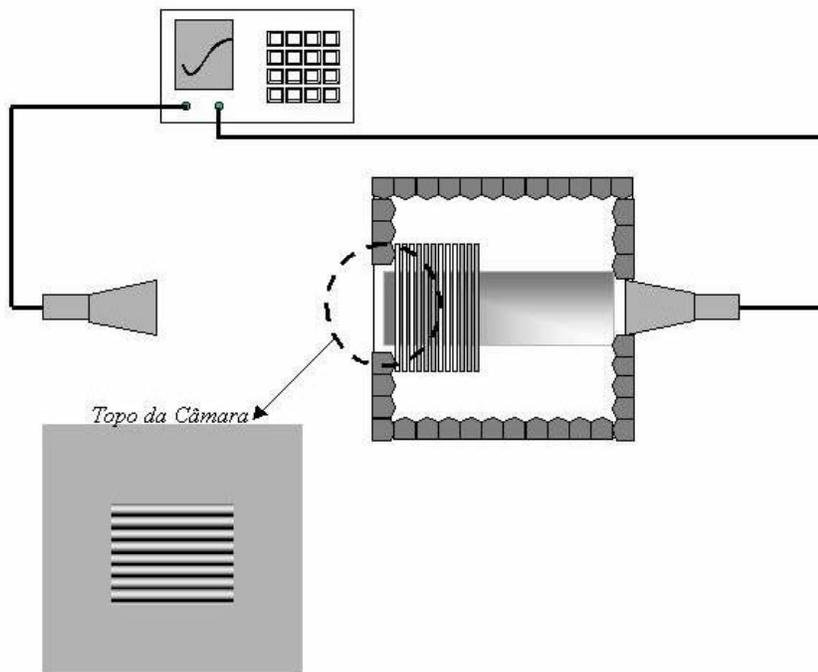
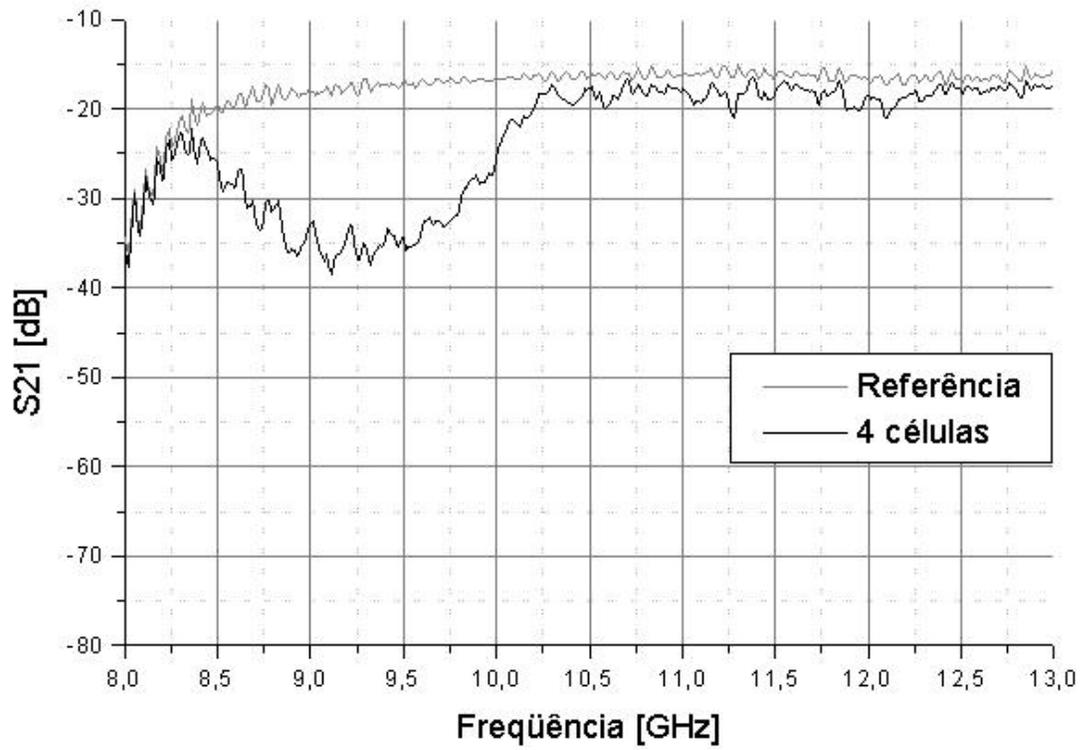


Figura 3.4.11: Inserção de 4 células unitárias - modo TM

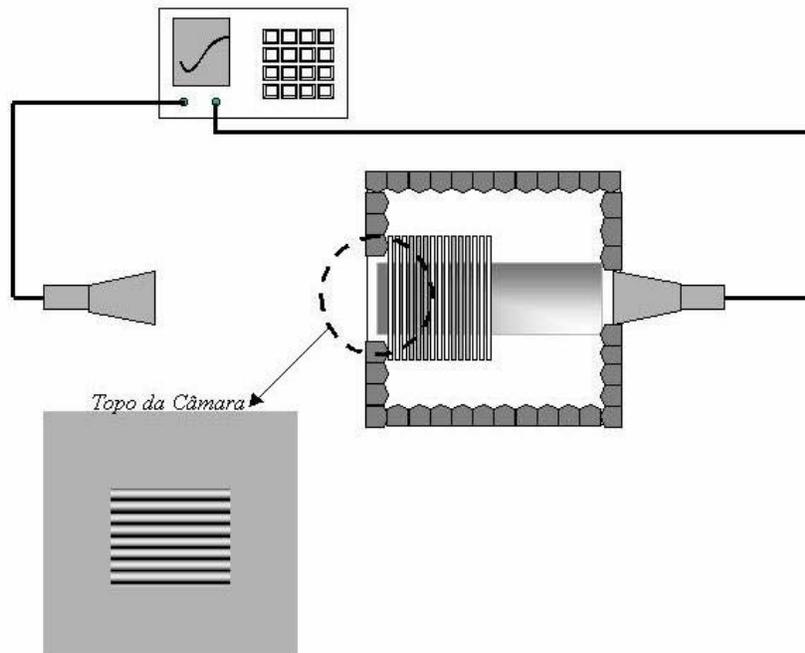
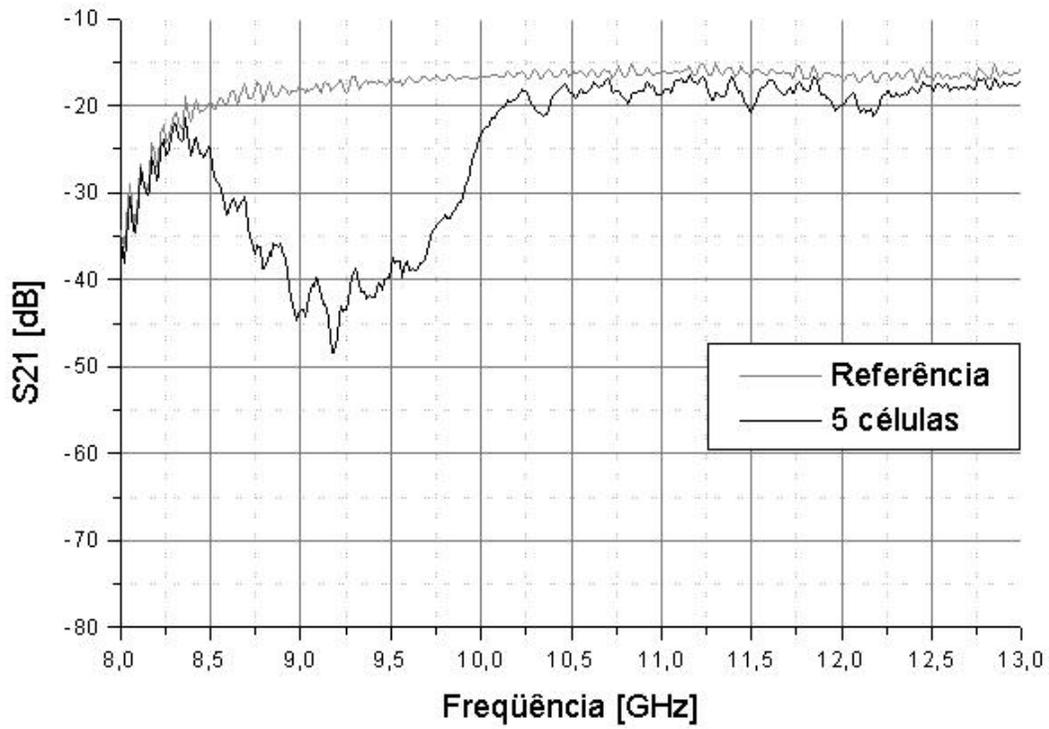


Figura 3.4.12: Inserção de 5 células unitárias - modo TM

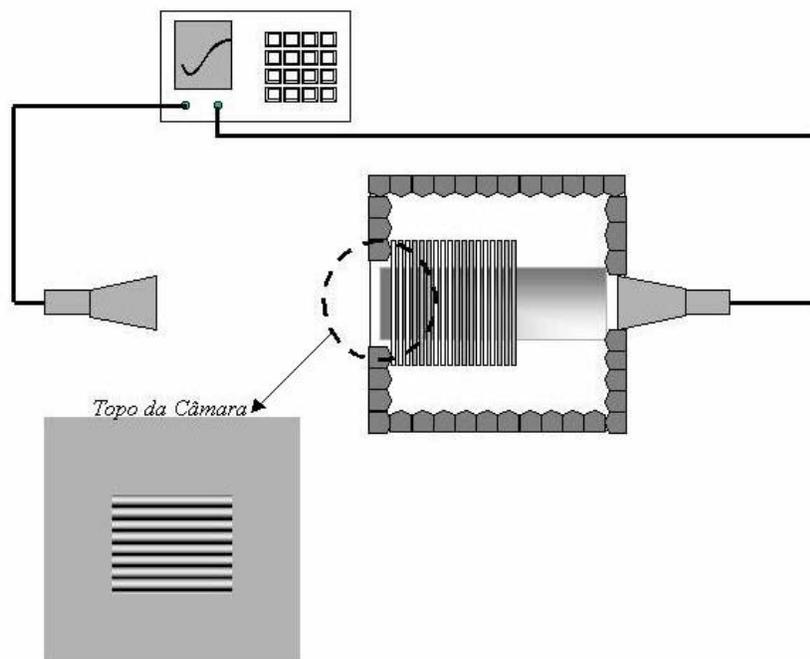
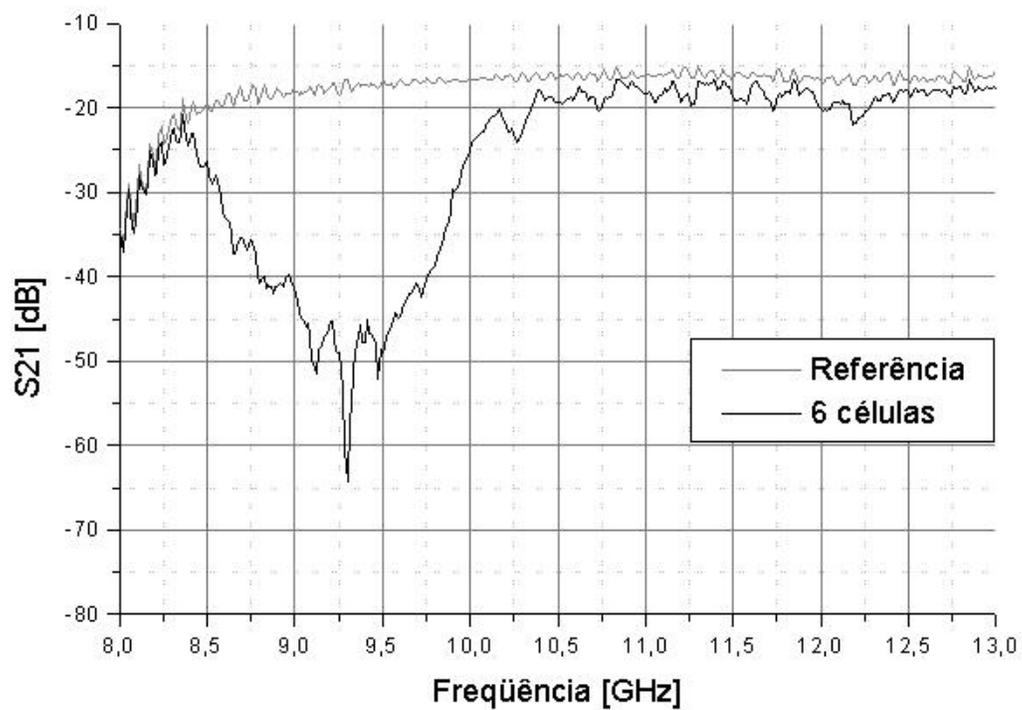


Figura 3.4.13: Inserção de 6 células unitárias - modo TM

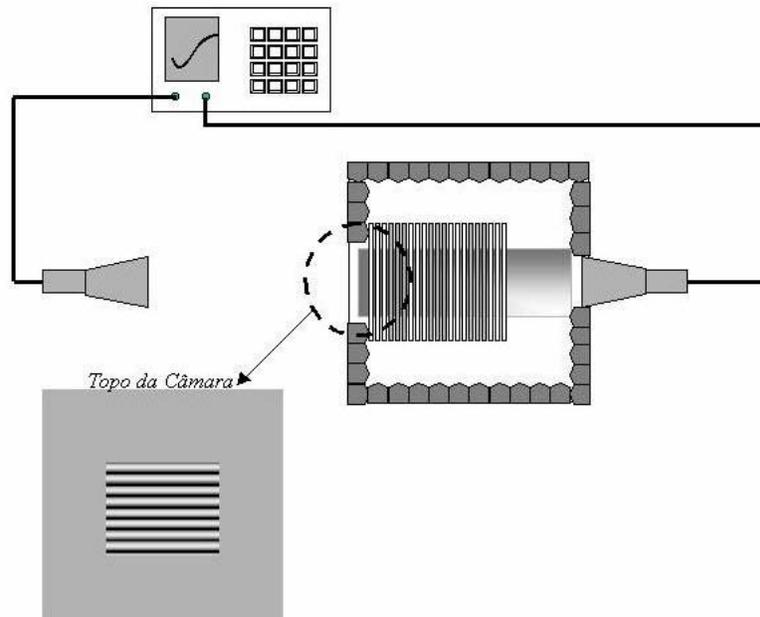
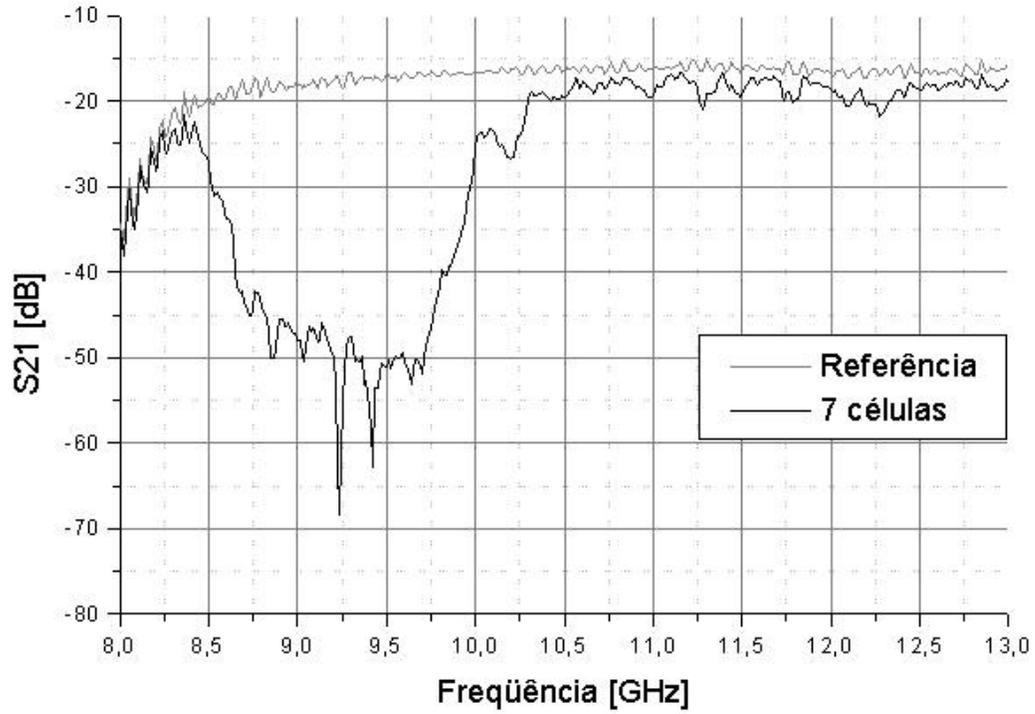


Figura 3.4.14: Inserção de 7 células unitárias - modo TM

As **Figuras 3.4.15 e 3.4.16** apresentam os resultados para medições com as grades formando um ângulo de 45° com a parede da câmara, na região de entrada. Em particular, a Figura 3.4.16 apresenta os resultados quando um defeito é introduzido no conjunto das grades. Esse defeito é provocado retirando-se uma célula unitária da região central do conjunto, de maneira que permaneçam dois conjuntos formados por três células unitárias cada, espaçados de uma célula unitária. Todas as medidas apresentadas a partir deste ponto foram efetuadas para o modo TM.

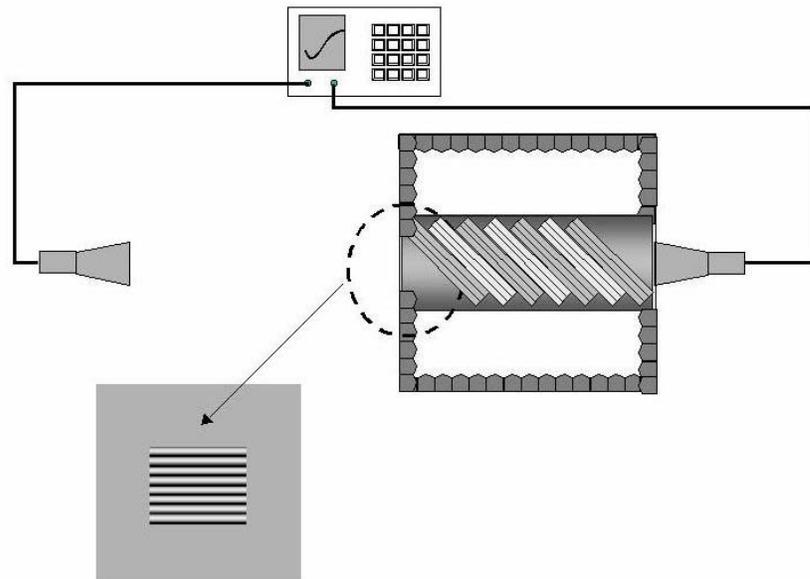
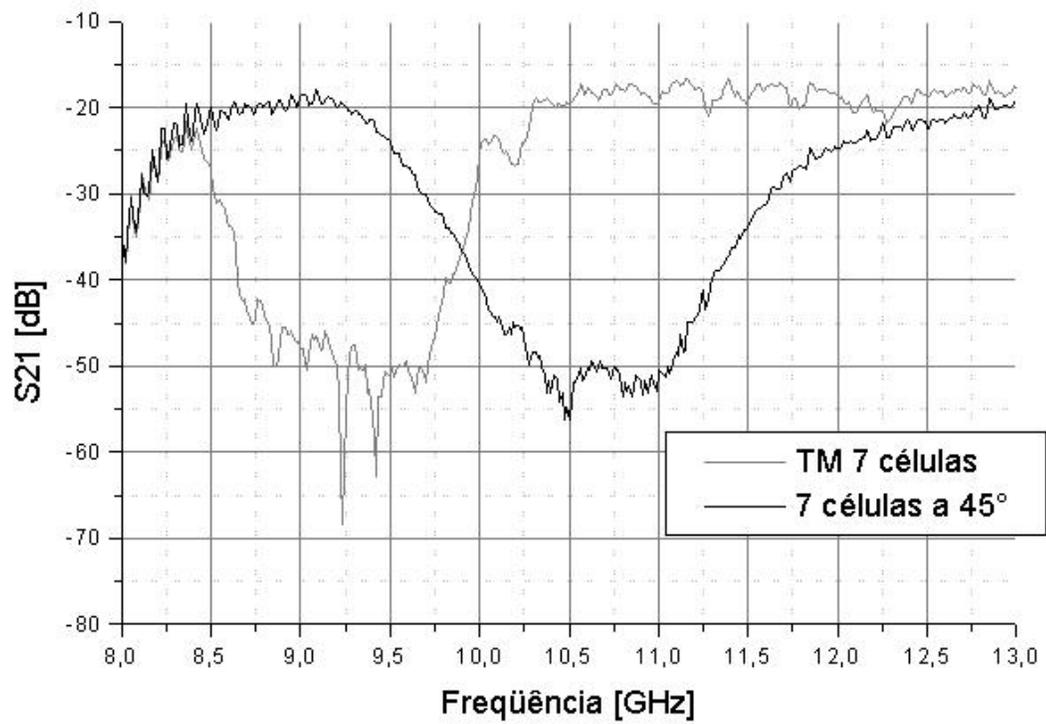


Figura 3.4.15: Grades a 45° com a parede da câmara na região de entrada

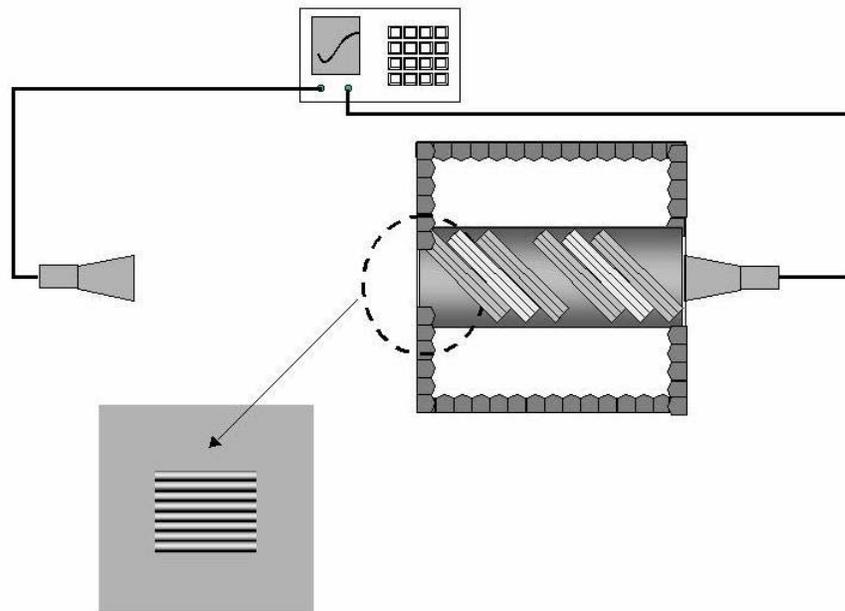
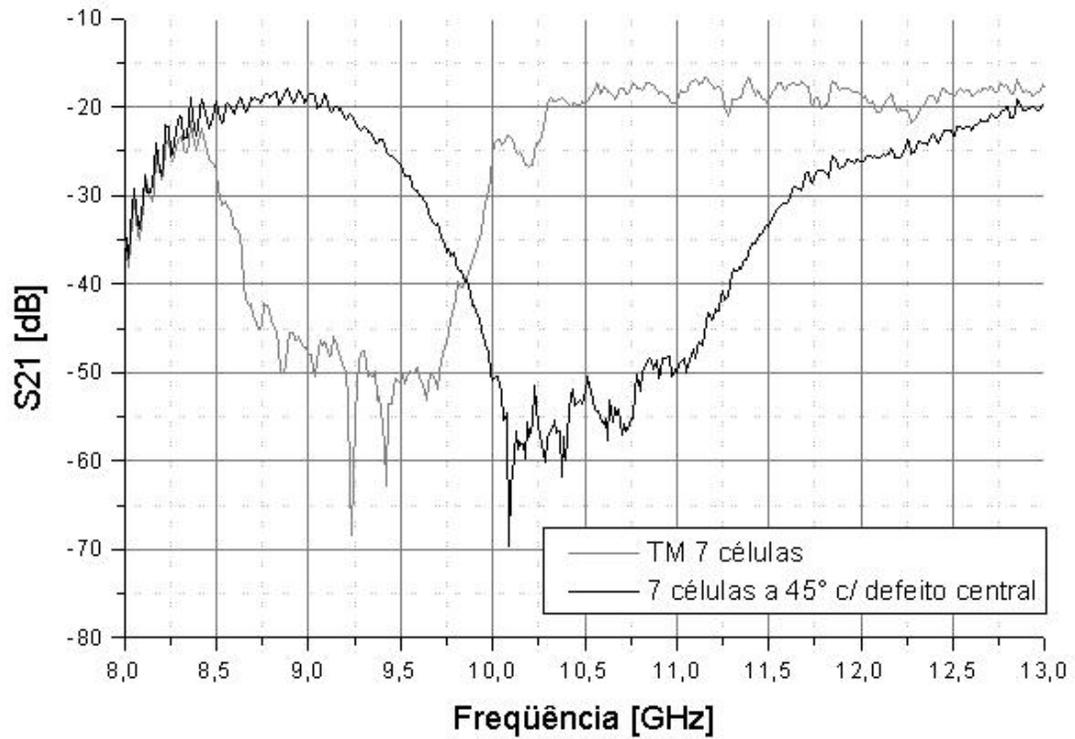


Figura 3.4.16: Grades a 45° com defeito central

Outras medidas foram efetuadas para avaliar-se o comportamento de várias outras configurações de defeitos.

Primeiramente, as sete células unitárias foram dispostas paralelamente, com espaçamento entre si de 1 célula unitária. Logo após, retirou-se a célula unitária central, permanecendo as outras na mesma configuração anterior. Os resultados obtidos dessas medições estão apresentados nas **Figuras 3.4.17 e 3.4.18**.

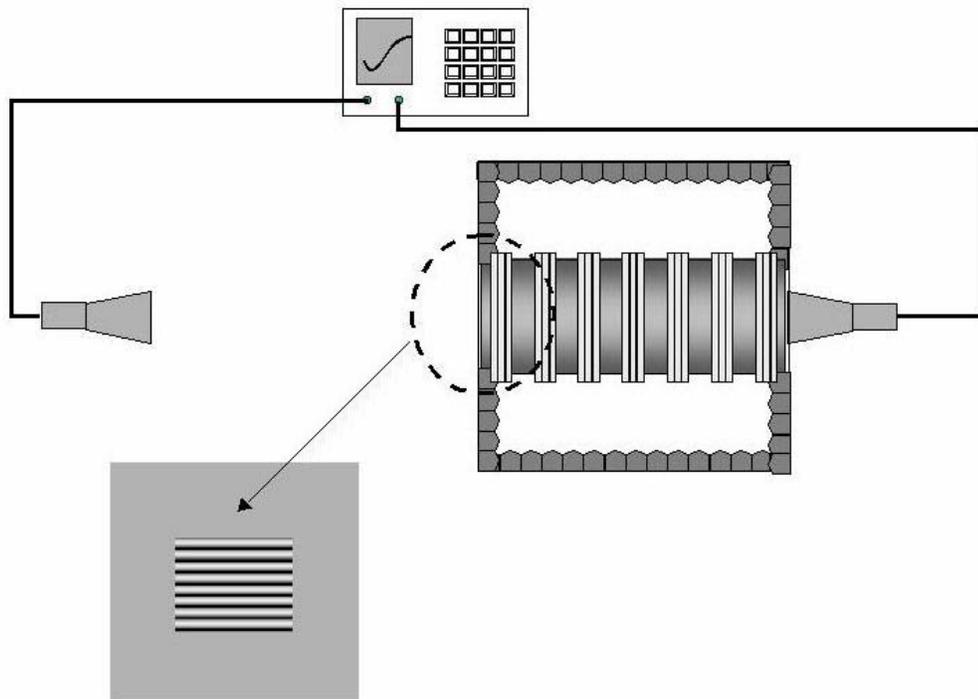
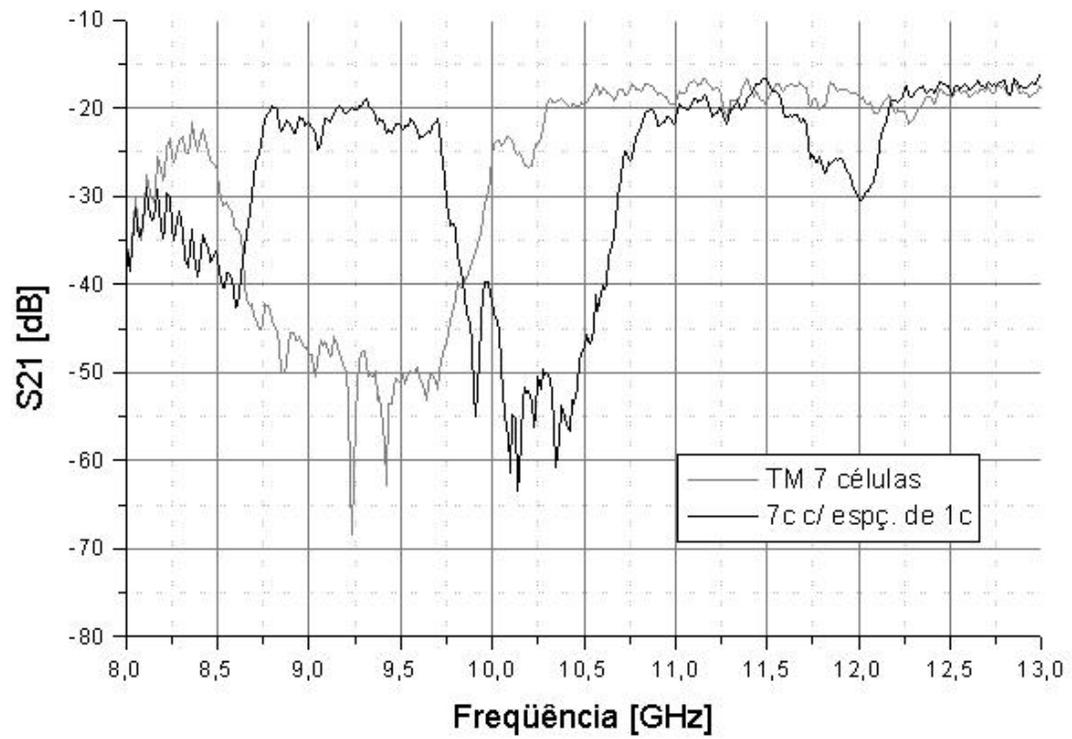


Figura 3.4.17: 7 células unitárias com separação equivalente a 1 célula

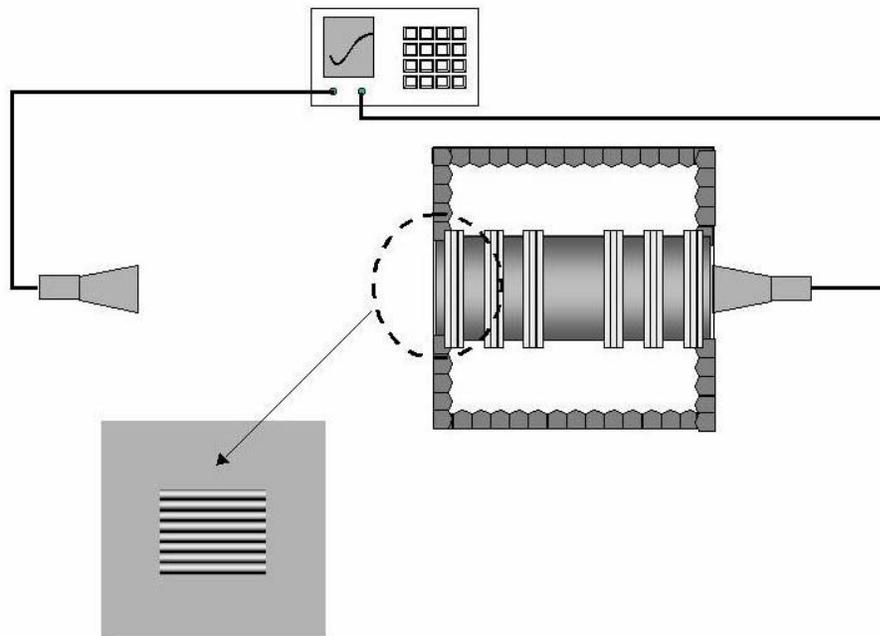
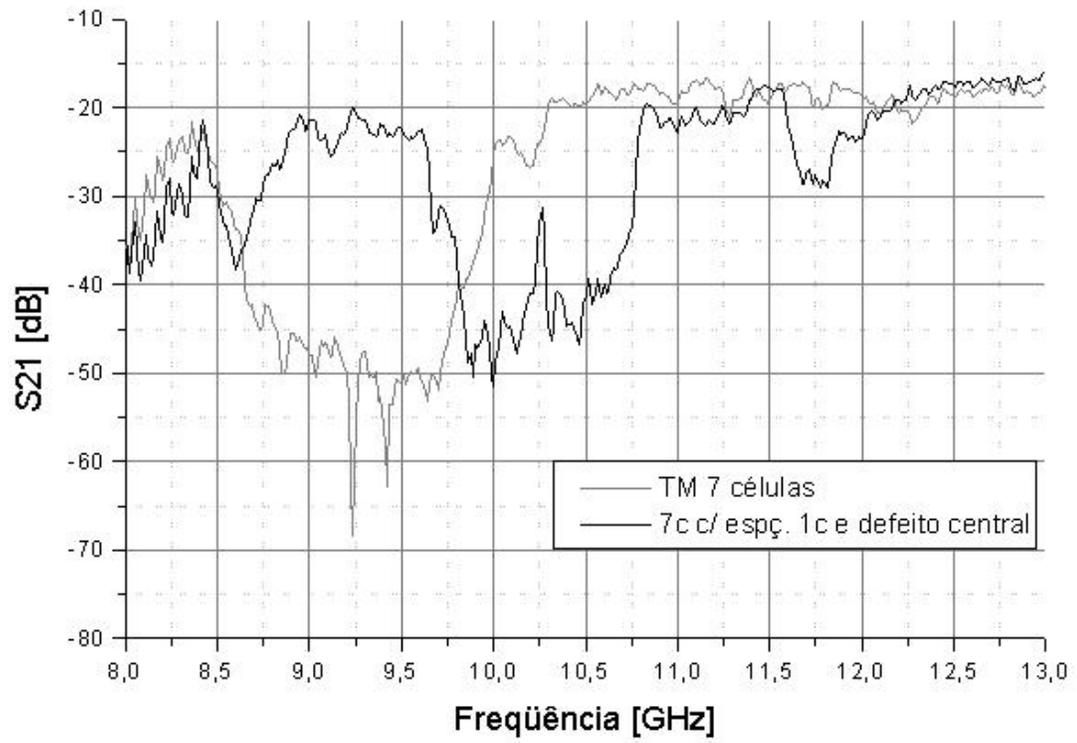


Figura 3.4.18: Idem 3.4.17, retirando-se a célula central

Outros resultados interessantes foram obtidos com a introdução de defeitos, mas com a seguinte configuração:

- dois blocos de 3 células unitárias agrupadas;
- mantendo um bloco em posição fixa, na região de entrada de sinal da câmara e afastando-se o segundo bloco, a distâncias de 1, 2, 3 e 4 células unitárias, respectivamente (**Figura 3.4.19**).

Os resultados estão apresentados nas **Figuras 3.4.20 a 3.4.23**.

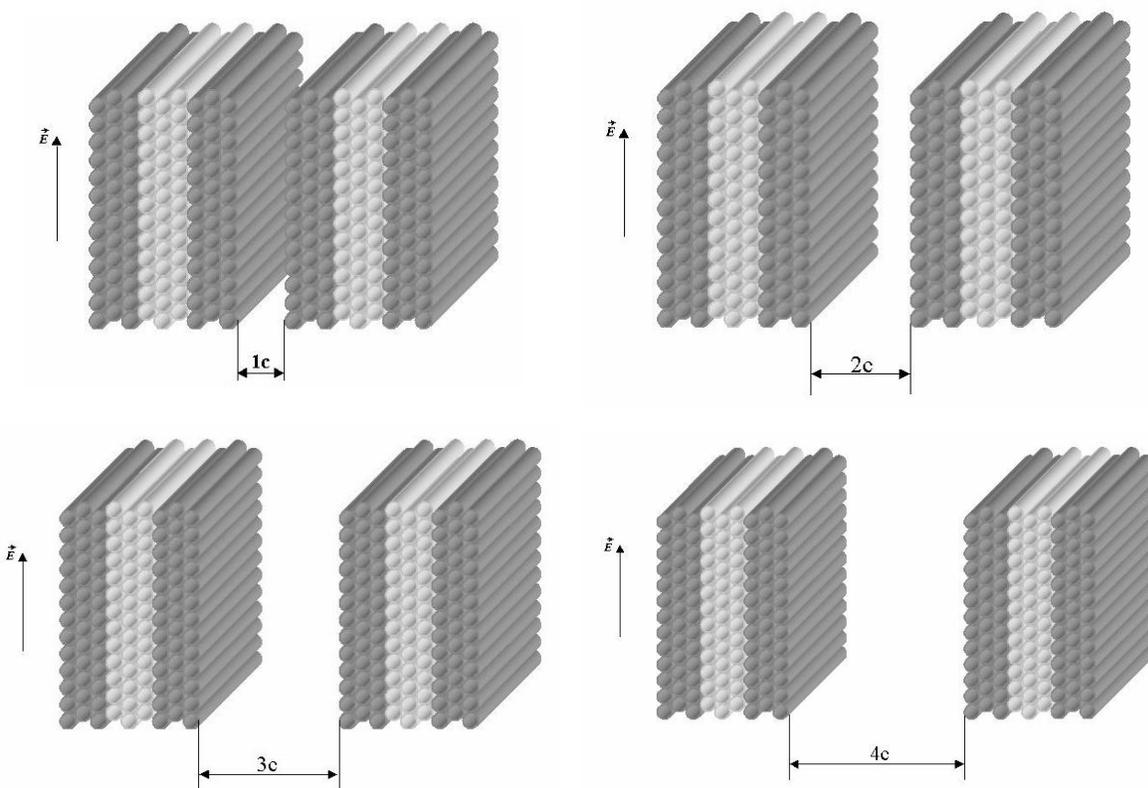


Figura 3.4.19: Afastamento de 1c a 4c

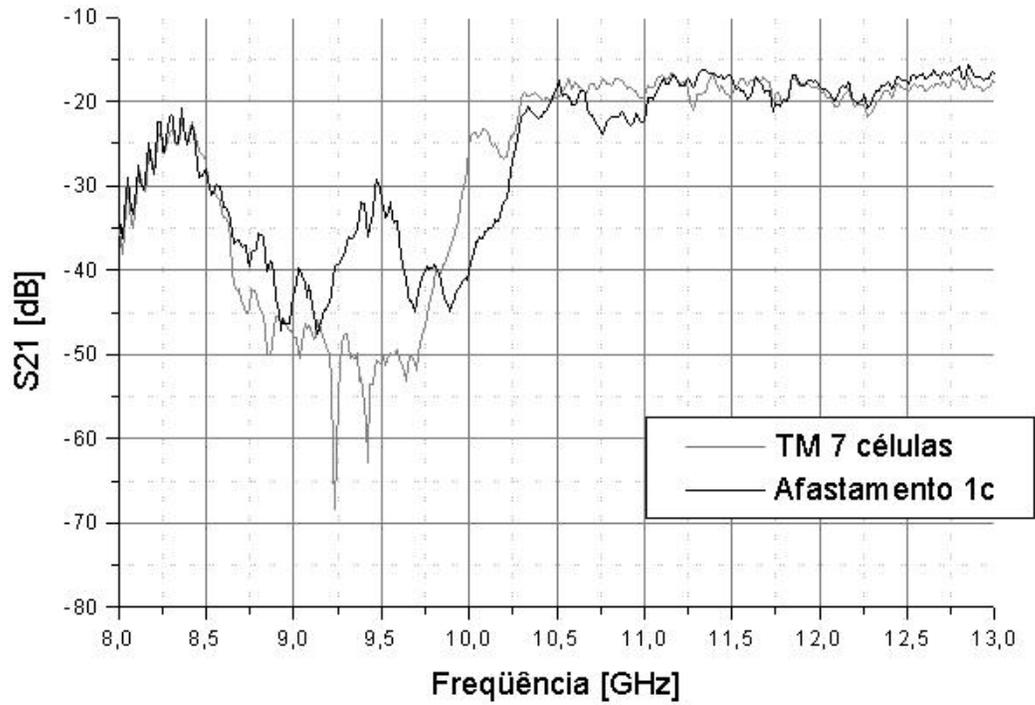


Figura 3.4.20: Afastamento de 1 célula

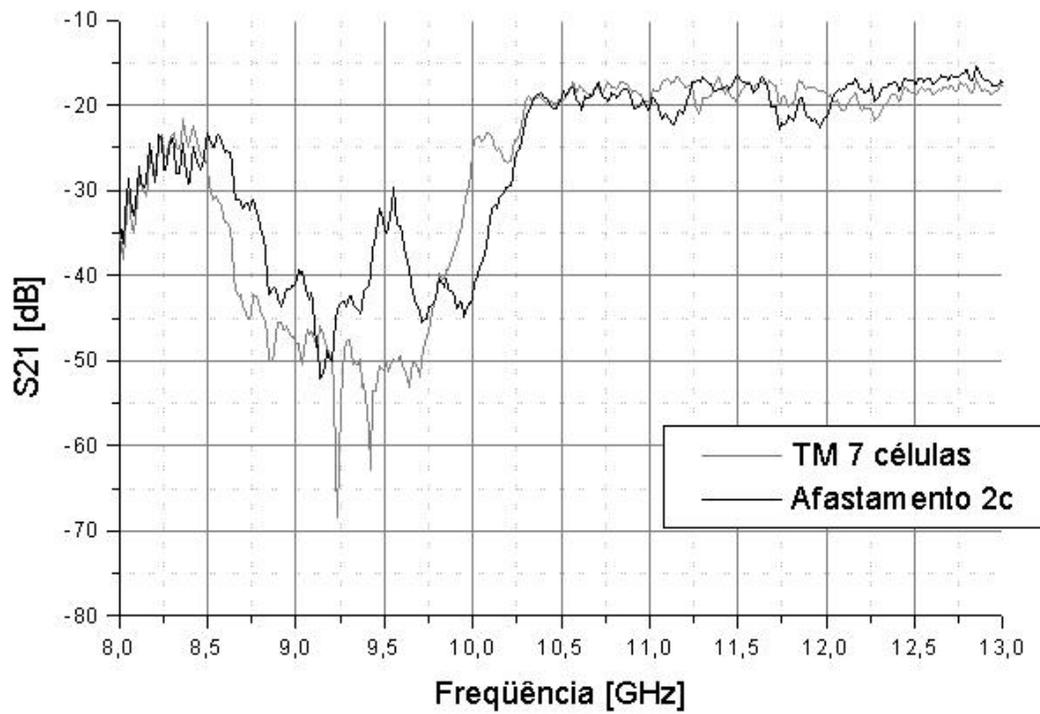


Figura 3.4.21: Afastamento de 2 células

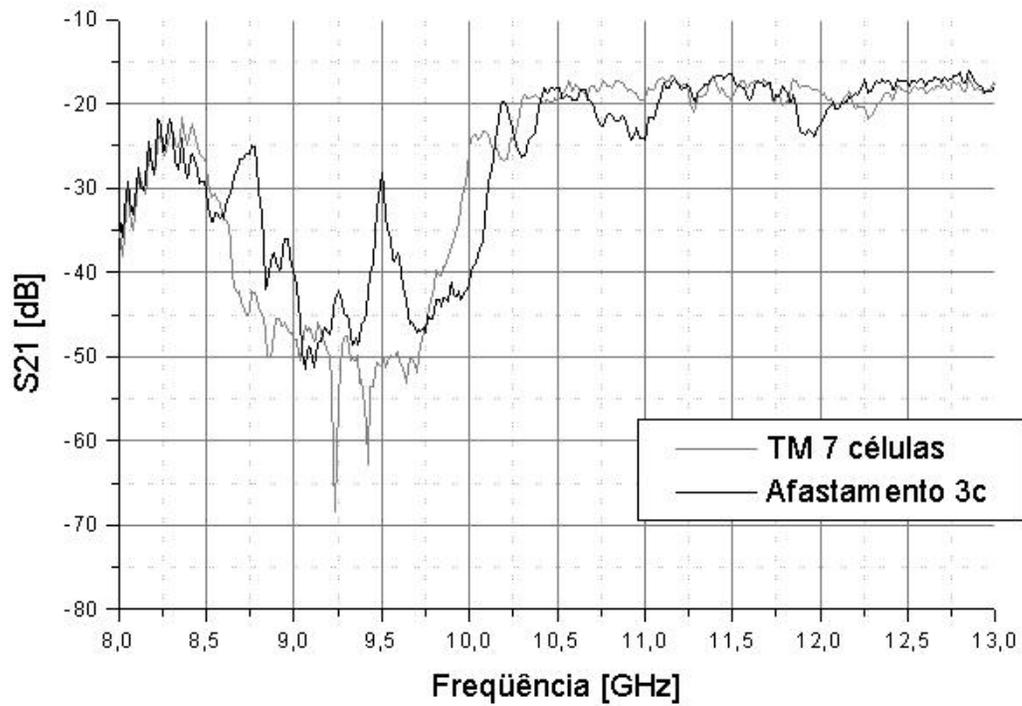


Figura 3.4.22: Afastamento de 3 células

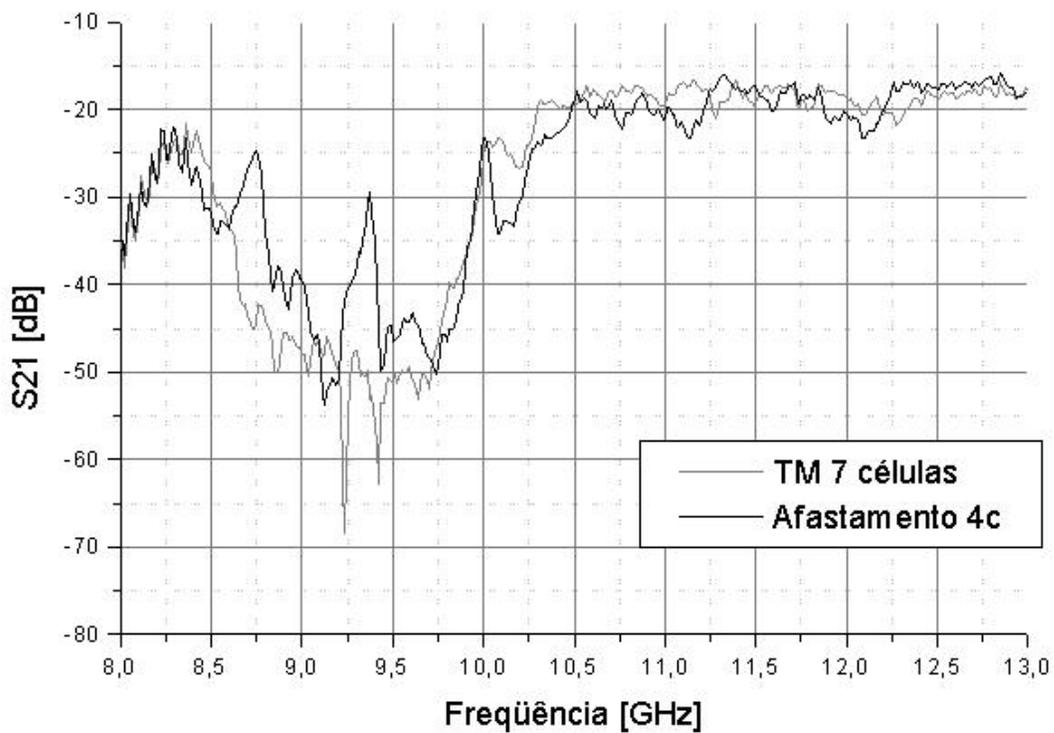


Figura 3.4.23: Afastamento de 4 células

A **Figura 3.4.24** apresenta o resultado da medição com o conjunto de 7 células unitárias dispostas na direção longitudinal, ou seja, os tubos perpendiculares à parede da região de entrada da câmara.

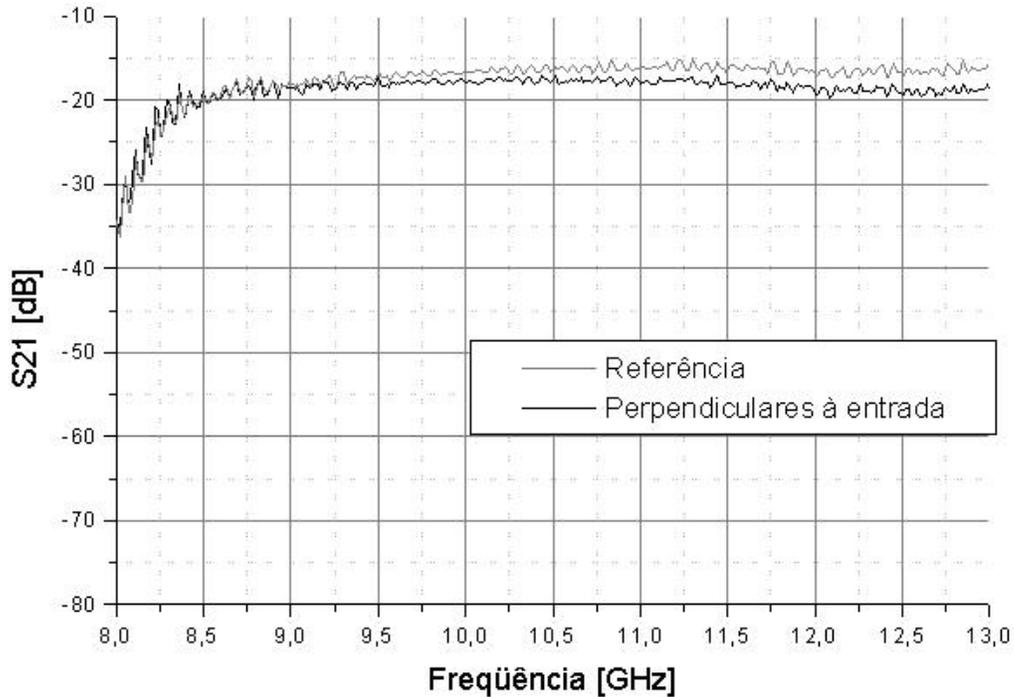


Figura 3.4.24: Tubos perpendiculares à parede da região de entrada da câmara

Para a exploração do comportamento do campo no interior dos defeitos das grades, foi construída uma sonda de campo elétrico, utilizando-se um pedaço de cabo coaxial semi-rígido ($Z_0 = 50 \Omega$), tendo em uma das extremidades um conector tipo SMA fêmea e na outra, um elemento de aproximadamente 5 mm, feito com o próprio condutor central do cabo, formando um pequeno monopolo. A sonda e a configuração de medição utilizada estão mostradas na **Figura 3.4.25**.

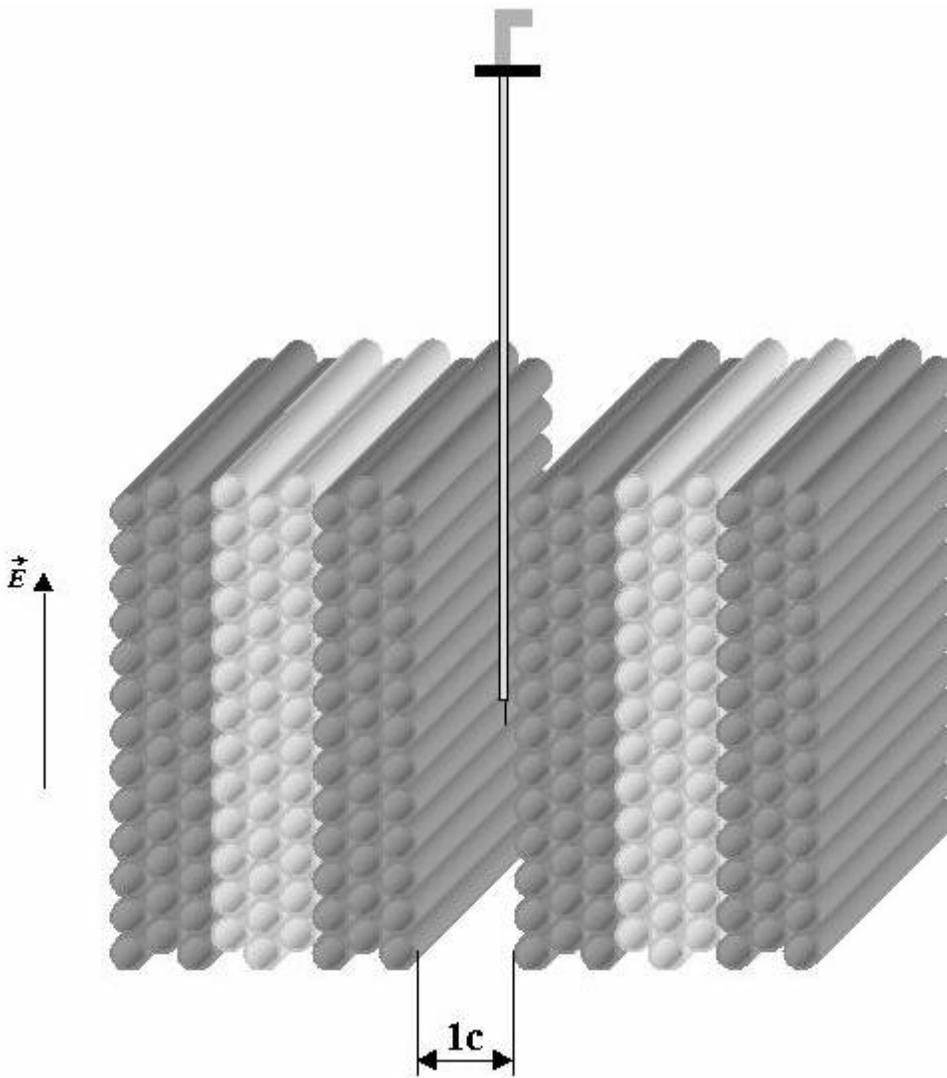


Figura 3.4.25: Sonda de campo inserida no defeito das grades dielétricas

O procedimento de calibração da sonda foi o seguinte:

- inseriu-se a sonda na câmara, sem nenhuma das grades em seu interior, na posição onde se localiza o defeito. A sonda foi conectada ao Analisador de Redes;
- foi conectada à antena receptora uma carga de 50Ω , tendo sido também selada a abertura da câmara para essa antena, por uma placa de material absorvedor. Os efeitos da não oclusão dessa abertura e do não casamento da antena receptora são mostrados na **Figura 3.4.27**;
- Obteve-se a curva de resposta da sonda em vazio (**Figura 3.4.26**).

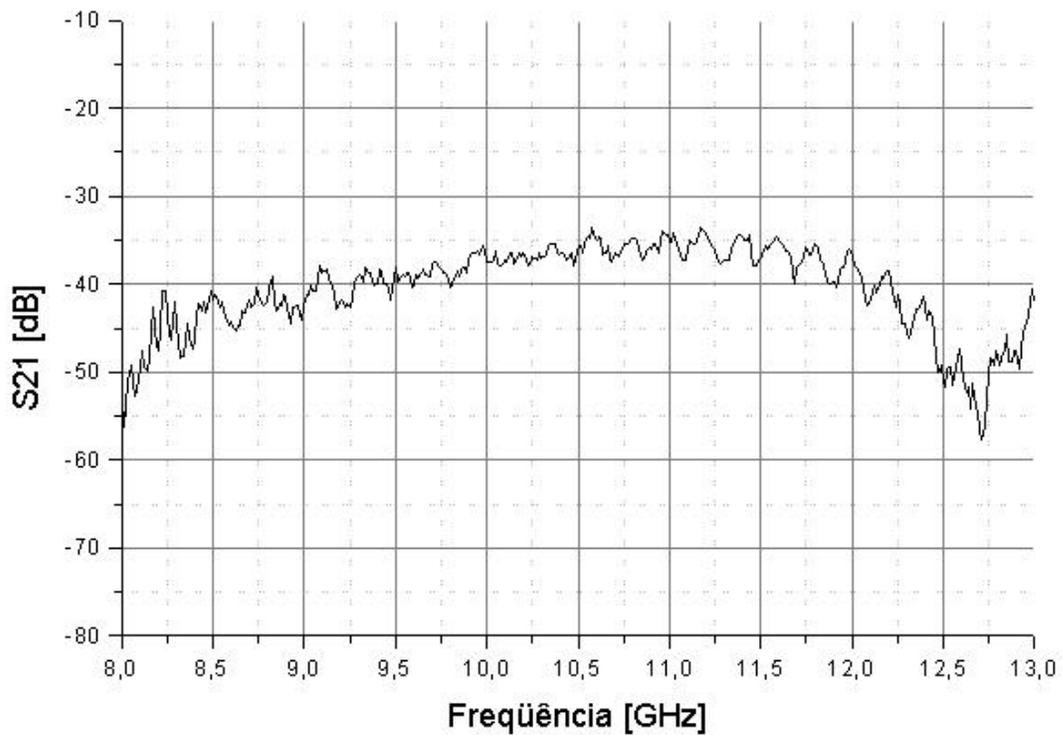


Figura 3.4.26: Curva de calibração da sonda

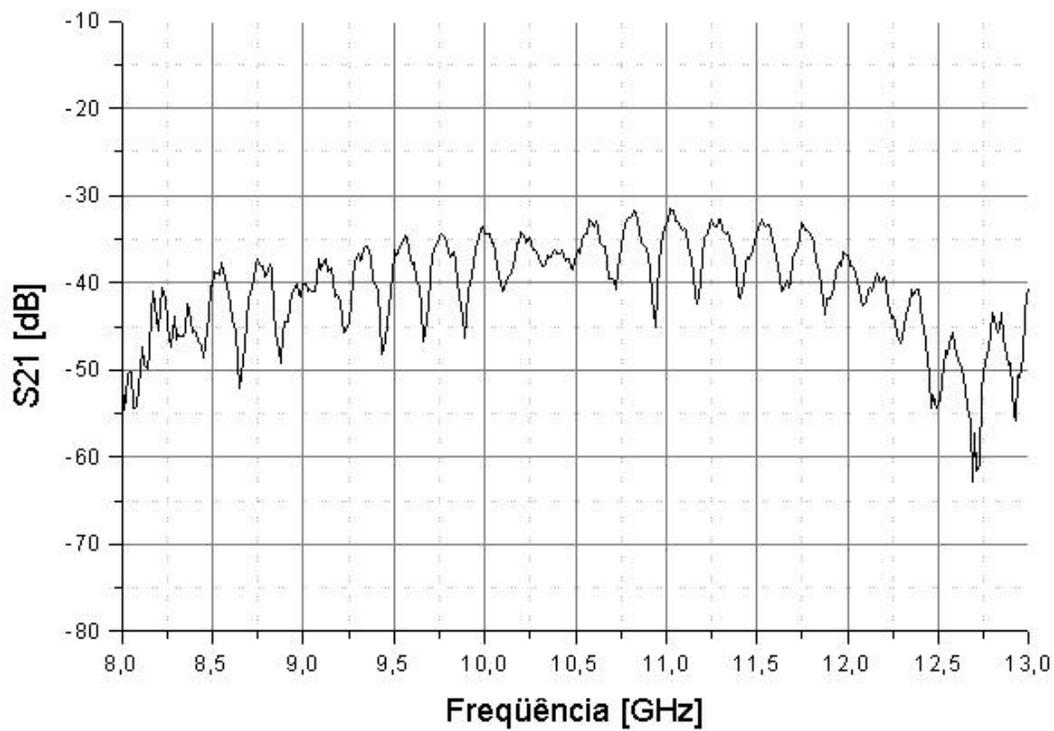


Figura 3.4.27: Influência da abertura da antena receptora sobre a calibração da sonda

A **Figura 3.4.28** apresenta o resultado da medição efetuada conforme mostrado no esquema da **Figura 3.4.25**.

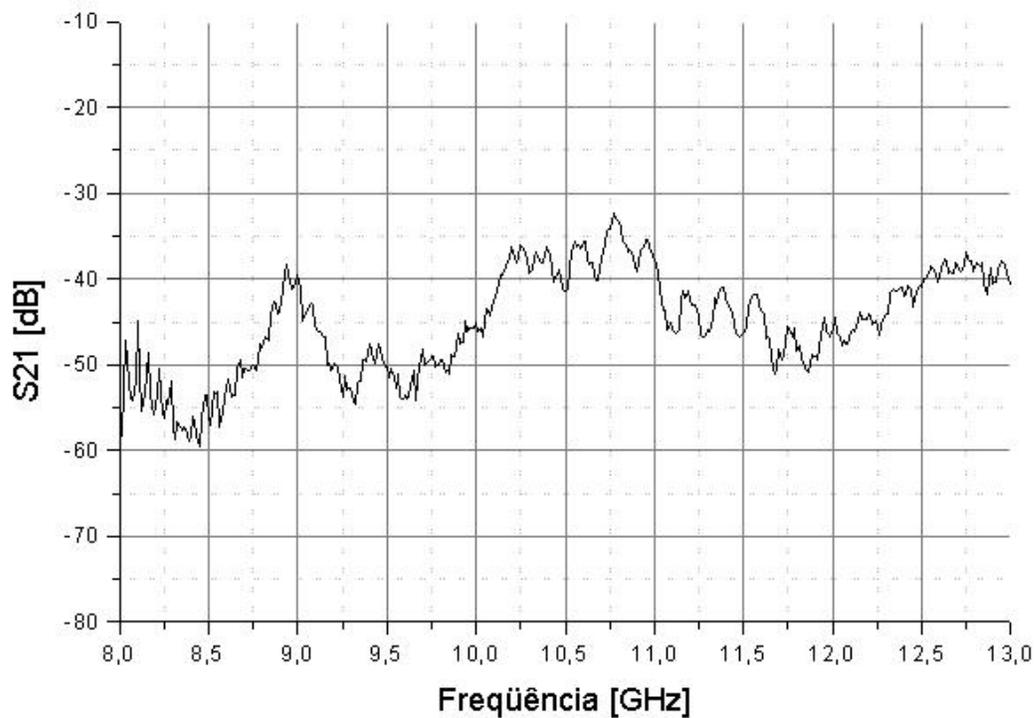


Figura 3.4.28: Medição com a sonda na região do defeito das grades

Como informação adicional, é apresentada, na **Figura 2.4.29**, a curva de atenuação do material absorvedor de RF utilizado na câmara de testes, obtida na montagem de ensaios.

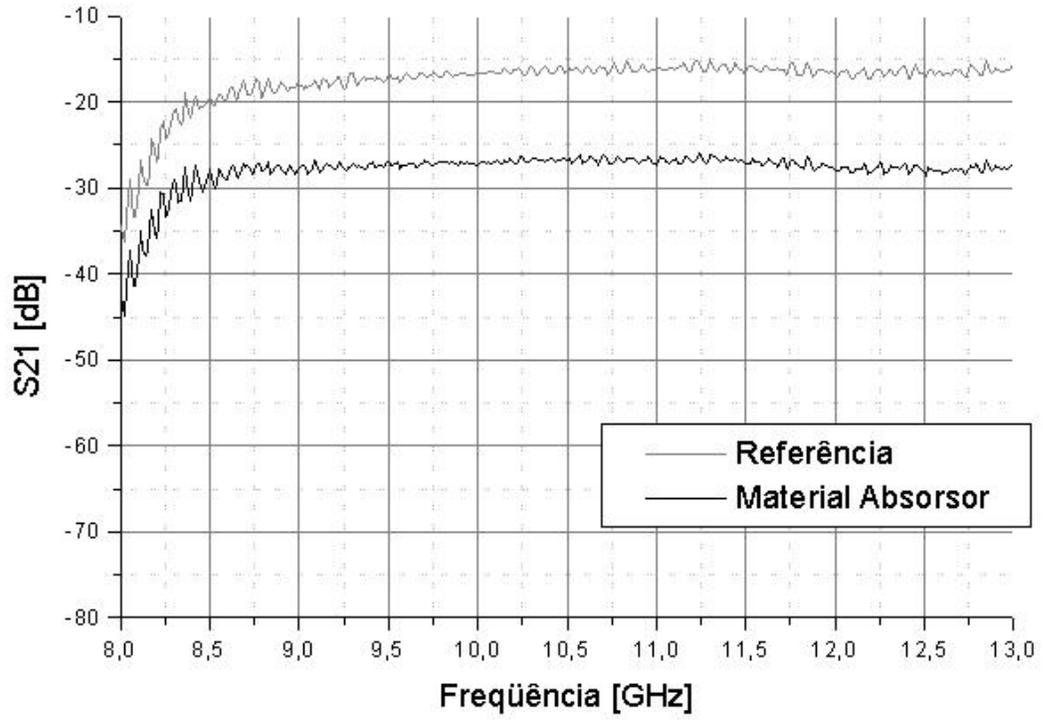


Figura 3.4.29: Curva de atenuação do material absorsor de RF

3.5. Comentários Sobre os Resultados Obtidos

Como apresentado na Figura 3.3.6.a, a montagem construída para a realização das medições apresentou uma boa resposta em frequência a partir de 8,0 GHz. Esse comportamento foi particularmente importante, principalmente em função das dimensões do tubo de PVC utilizado, pois segundo os cálculos teóricos, a banda proibida se localizaria entre 8,0 GHz e 10,0 GHz. Como as especificações técnicas da antena adquirida indicavam uma faixa entre 10,0 GHz e 15 GHz, esse resultado foi de substancial importância para a realização dos testes, uma vez que os tubos de PVC são comercializados em diâmetros padronizados, e o tubo de menor diâmetro disponível no mercado é o de 15 mm. Com o fechamento total da câmara, obteve-se uma boa atenuação para sinais externos, aproximadamente 40 dB, em toda a faixa de medição. Outros testes foram efetuados no sentido de se avaliar a interferência de objetos e movimentação próximos à câmara. Os resultados demonstraram que a montagem era bastante estável e o sinal entre as antenas bem diretivo, sofrendo alterações somente quando da inserção de objetos na direção de propagação entre as mesmas.

As grades dielétricas utilizadas pelo Dr. Hickman em seu artigo [47] eram construídas com tubos de acrílico, com 1/2" (~12,7 mm) de diâmetro externo e 3/8" (~9,525 mm) de diâmetro interno e comprimento de 230 mm. Os tubos foram colados lado-a-lado no formato de placas, sendo estas placas dispostas camada sobre camada, resultando em uma distribuição de geometria hexagonal para os tubos. Ainda, foram efetuadas medições com a inserção de placas, para o modo TE e TM, até o número de 21 placas. As **Figuras 3.5.1.a e 3.5.1.b**¹³ apresentam os resultados obtidos pelo Dr. Hickman, para o modo TE e para o modo TM, respectivamente. Segundo o artigo, a frequência calculada para a banda proibida, utilizando-se um fator de 0,4 e para uma distância a de, aproximadamente, 12,7 mm foi em torno de 10 GHz (utilizando-se a equação (3.1.1), obtém-se $f_{bg} \cong 9,5$ GHz).

¹³ Figuras obtidas de [47]

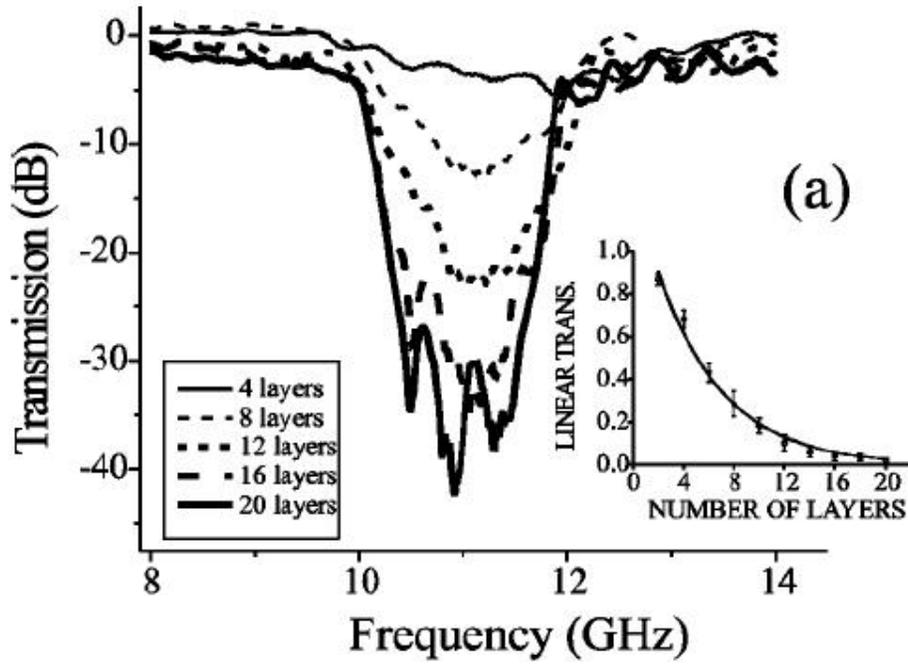


Figura 3.5.1.a: Resultados das medições em modo TM

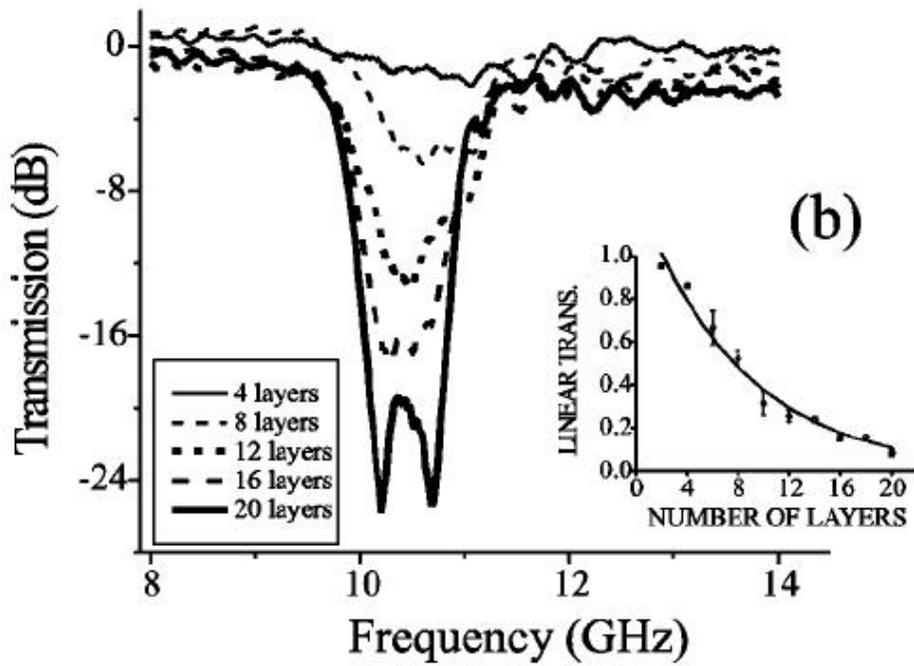


Figura 3.5.1.b: Resultados das medições em modo TE

Observa-se que para o modo TM, a atenuação chega ser de até 40 dB (20 camadas) sendo que, para o modo TE não ultrapassa o valor de 24 dB (20 camadas).

Para o modo TM, o efeito de banda proibida é mais acentuado que para o modo TE, pois, no primeiro, o fenômeno de espalhamento do campo eletromagnético sobre uma superfície de geometria cilíndrica[49], promove alterações mais sensíveis que para o segundo modo. No modo TM, o campo elétrico incide perpendicularmente sobre a geometria das grades, sofrendo deformação maior na sua trajetória. Para o modo TE, o campo elétrico incide paralelamente sobre os cilindros das grades, não sofrendo grandes alterações em sua trajetória. As **Figuras 3.5.2.a** e **3.5.2.b** ilustram o efeito de espalhamento para cada tipo de campo incidente.

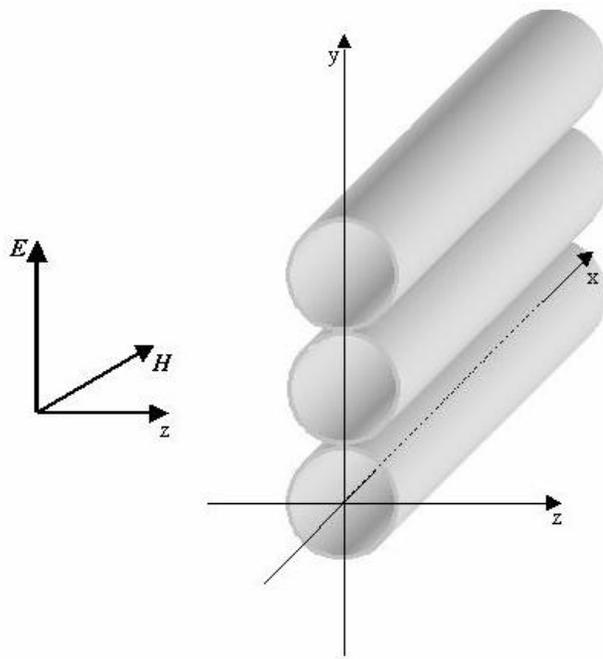


Figura 3.5.2.a: Incidência modo TM

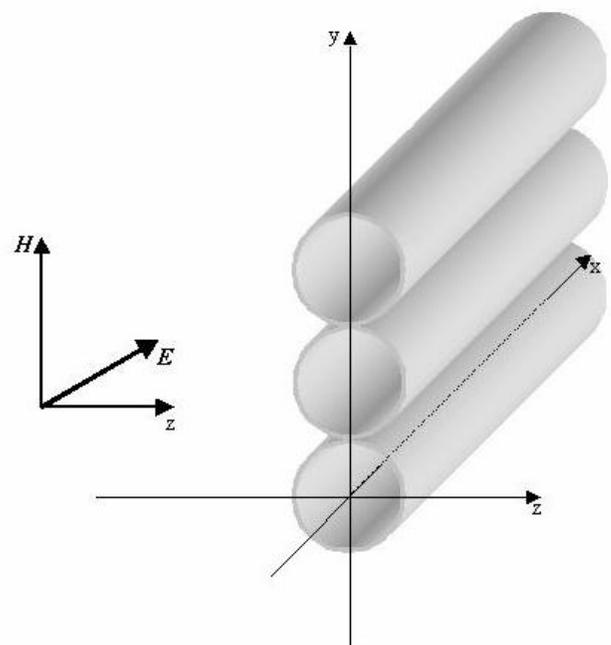


Figura 3.5.2.b: Incidência modo TE

Como as estruturas utilizadas para os ensaios são construídas em material dielétrico, o campo magnético H , que incide perpendicularmente sobre as grades para o caso TE, praticamente não sofre alterações, pois esse efeito seria melhor observado para o caso de utilização de estruturas metálicas [34], onde a condutividade do metal interfere no comportamento do campo magnético. Outro resultado interessante é o apresentado pela **Figura 3.4.24**, onde o efeito do espalhamento praticamente não é

percebido. A onda (TE, TM) incide sobre a região diametral dos tubos sendo que, em função da pequena espessura dos mesmos, comporta-se como um plano dielétrico (**Figura 3.5.3**).

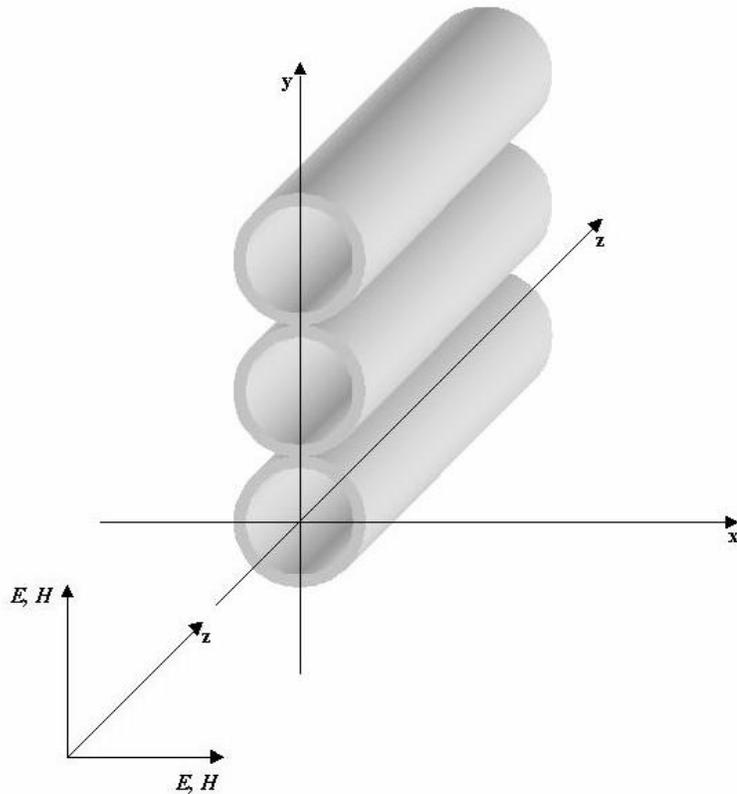


Figura 3.5.3: Incidência sobre a região diametral dos tubos

O presente trabalho utilizou tubos comerciais de PVC, com diâmetro externo de 15 mm e interno de 12 mm. Cada célula unitária foi construída pela superposição de três placas de tubos, cada uma contendo 13 tubos (com 250 mm de comprimento cada tubo), com dimensões finais de 250 x 45x 195 mm (c x l x h) para cada célula unitária. Com um total de 7 células, obtém-se o número de 21 camadas, conforme utilizado em [47]. As frequências inicial e final para a banda proibida [22], calculadas para essas estruturas foram 8,00 GHz e 10,00 GHz respectivamente

Para as medições efetuadas no modo TM, as frequências inicial e final da banda proibida, obtidas experimentalmente, tiveram um pequeno desvio em relação às previamente calculadas. Porém, esse desvio não foi maior que 500 MHz. Observa-se que a banda proibida obtida com as grades de PVC tem largura de, aproximadamente, 1,5 GHz e atenuação de até 40 dB (**Figuras 3.4.8 a 3.4.14**).

Comparando-se os resultados obtidos nas medições com as grades de PVC e as apresentadas pelo artigo [47], utilizando tubos de acrílico, nota-se que os valores obtidos de atenuação, para o modo TM, diferiram pouco. No artigo do Dr. Hickman, a atenuação do sinal na banda proibida, para o modo TM, chegou a, aproximadamente, 35 dB para 20 camadas. No presente trabalho, para 21 camadas (7 células unitárias) obteve-se uma atenuação de aproximadamente 30 dB (**Figura 3.5.4**), para o modo TM, e cerca de 15 dB, para o modo TE (**Figura 3.5.5**).

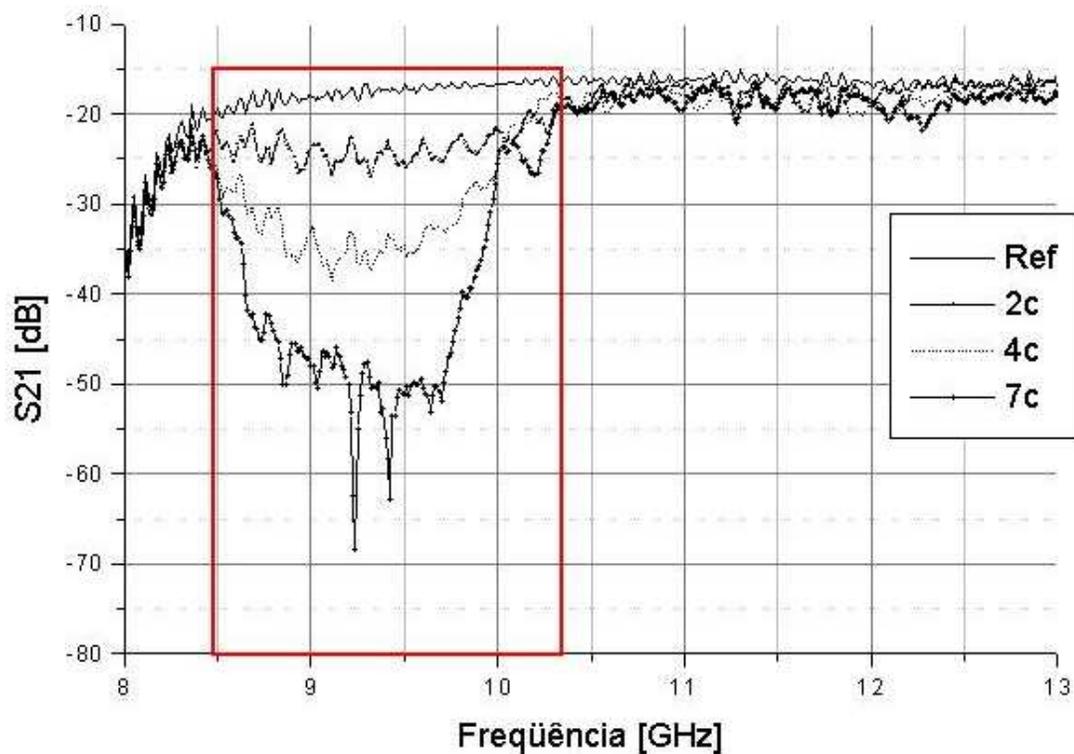


Figura 3.5.4: Resultado para modo TM sobre 21 camadas de tubos de PVC até (7 células unitárias)

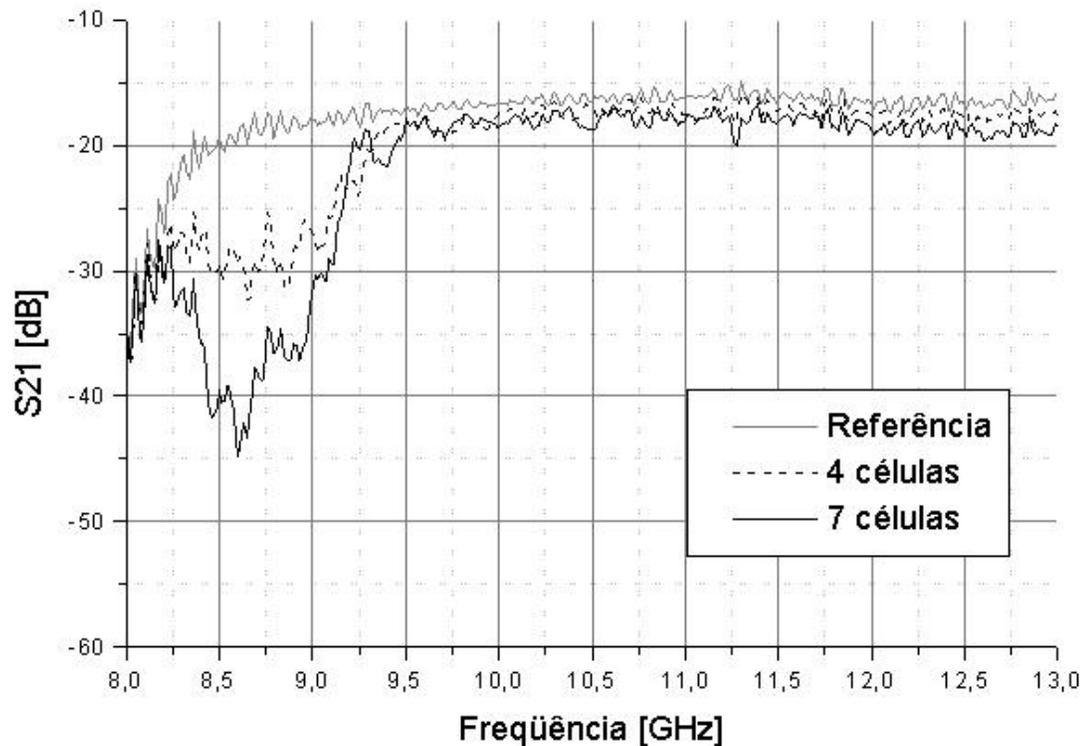


Figura 3.5.5: Resultado para modo TE sobre 21 camadas de tubos de PVC até (7 células unitárias)

As larguras de faixa de frequências obtidas, tanto para o modo TM como para o TE foram de $\sim 1,50$ GHz e $\sim 1,00$ GHz, respectivamente. O valor ligeiramente inferior obtido para o modo TE, em relação ao obtido pelo Dr. Hickman em seu trabalho (TM - 2,00 GHz) pode ter sido provocado devido à frequência inicial da banda proibida, para as estruturas em PVC, estar muito próxima da frequência inferior de corte da antena corneta.

Observando-se, novamente, os resultados obtidos no presente trabalho, nota-se que os comportamentos para o modo TE e TM confirmam o exposto sobre o fenômeno de espalhamento provocado para cada configuração geométrica.

De uma forma geral, os resultados obtidos com as grades em PVC foram muito semelhantes aos obtidos pelo Dr. Hickman, que utilizou grades em acrílico. A grande vantagem em se utilizar o PVC é o seu baixo custo em relação ao acrílico (cerca de 7% do valor) e a disponibilidade no comércio. Também, esse resultado indica a possibilidade de utilização de materiais mais simples para aplicações em microondas, para se obter efeito de banda proibida, uma vez que o PVC é um material além de simples, carregado com minerais e outras impurezas. O que normalmente se observa nas publicações científicas sobre o assunto é a construção de estruturas com materiais dielétricos sofisticados e de alto

custo, como o acrílico e a alumina [46]. O presente trabalho contribui para a criação de uma nova alternativa para a investigação dos referidos fenômenos, utilizando-se materiais de baixo custo.

Outro resultado interessante, apresentado pelo Dr. Hickman, está mostrado nas **Figuras 3.5.6.a** e **3.5.6.b**. Essas figuras referem-se ao efeito observado ao se efetuar o deslocamento do ângulo de incidência do campo sobre as grades dielétricas.

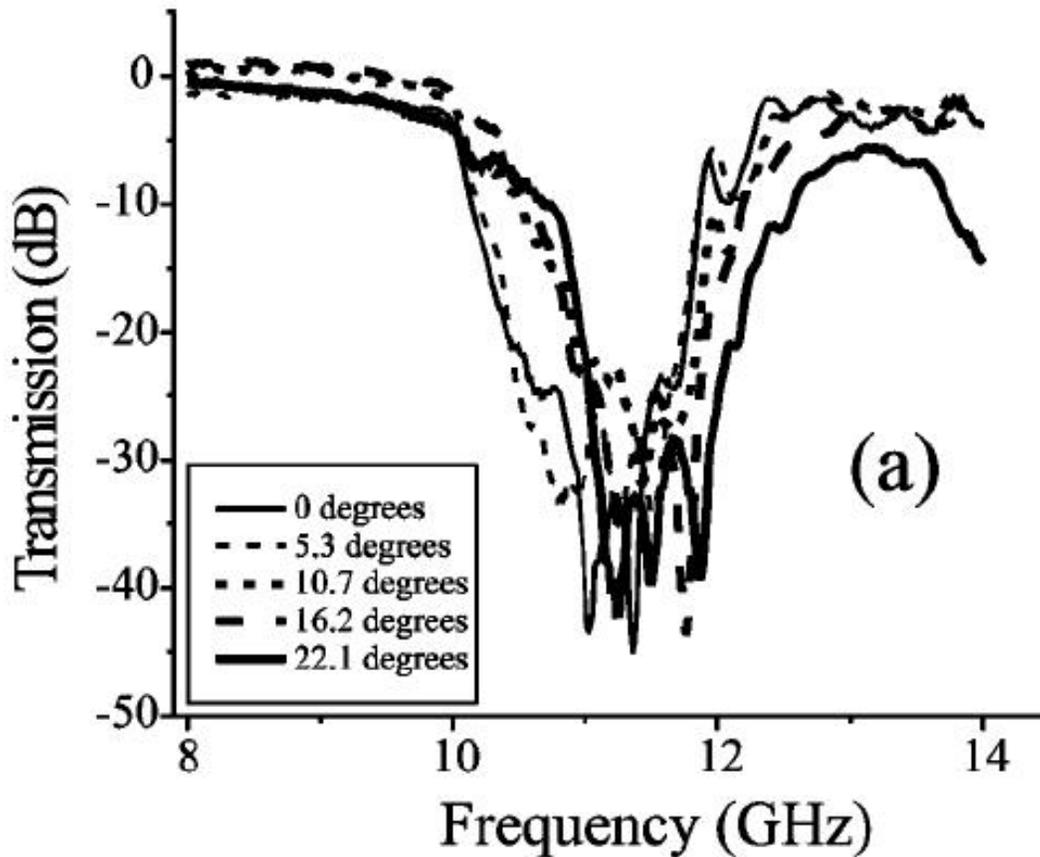
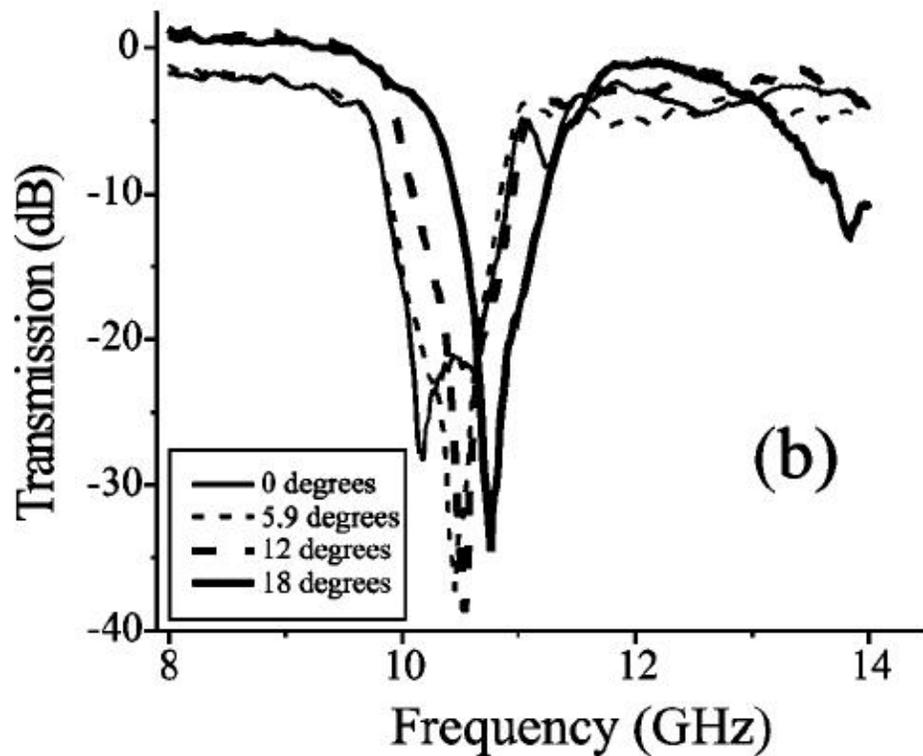


Figura 3.5.6.a: Modo TM



Figuras 3.5.6.b: Modo TE

Observa-se um deslocamento da frequência da banda proibida, tanto para o modo TE como para o modo TM, quanto maior for o ângulo. No presente trabalho, vários testes foram efetuados variando-se o ângulo de incidência sobre as grades. O gráfico mostrado na **Figura 3.4.15** apresenta o resultado obtido girando-se as grades dielétricas de 45°, para o modo TM. Nota-se um deslocamento bastante sensível das frequências da banda proibida, em relação à posição original. Escolheu-se esse resultado dentre os demais, por apresentar as diferenças mais acentuadas em relação aos outros. Esse efeito é particularmente interessante, pois apresenta a possibilidade de se trabalhar com várias geometrias e posicionamentos das grades dielétricas, para se ajustar as configurações de campo ou banda proibida ("sintonia mecânica").

Na literatura científica sobre estruturas de banda proibida [22], é apresentado o conceito de defeito da rede cristalina e seus efeitos sobre a transmissão nesta, ou seja, se inserida uma descontinuidade ou defeito em uma estrutura periódica, ocorre, na banda proibida, a transmissão de uma ou mais frequências. Esse defeito proporciona uma interferência construtiva na propagação, podendo ser visualizado, como exemplo, uma descontinuidade em um dielétrico multicamadas (**Figura 3.5.7**).

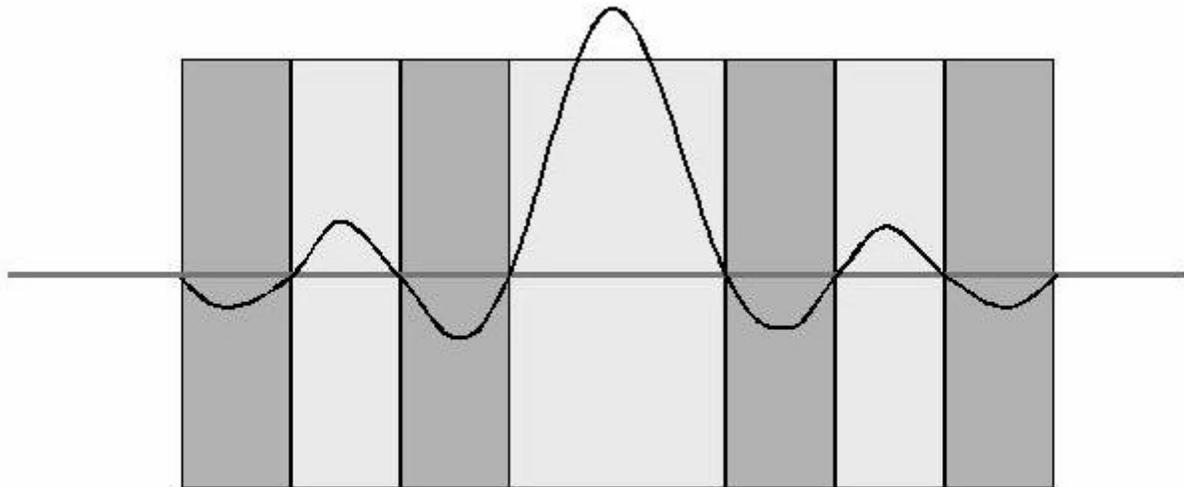


Figura 3.5.7: Interferência construtiva causada por descontinuidade em uma estrutura periódica

O Dr. Ozbay apresenta, em um de seus artigos publicados [46], um estudo bastante interessante para esse tipo de fenômeno, porém, para estruturas geométricas diferentes das estudadas aqui. Entretanto, esse princípio pode ser observado nas **Figuras 3.4.17 e 3.4.18**, onde foram inseridos defeitos nas grades dielétricas de PVC. No primeiro caso, onde as células unitárias apenas estão separadas entre si a uma distância de $1c$ (1 célula unitária) observa-se que há um deslocamento da banda proibida, passando esta, agora, para a faixa entre $\sim 9,75$ GHz a $\sim 10,75$ GHz. Ainda, pode-se observar que a faixa antes ocupada pela banda proibida, quando o campo incidia sobre as 7 células unitárias agrupadas, passou a permitir uma transmissão de, aproximadamente, 1 GHz de largura. Essa mudança no comportamento certamente está associada às múltiplas interferências causadas pelo afastamento regular entre as células unitárias. Provocando-se agora, um defeito adicional, retirando-se a célula unitária central da estrutura, nota-se o surgimento de transmissão de uma nova frequência, centrada na segunda banda proibida, em 10,25 GHz, pois houve uma alteração na uniformidade da estrutura anterior. Esse resultado é interessante, sob o ponto de vista que esse tipo de estrutura permite a mudança e controle de faixa de passagem, com pequenas alterações de sua geometria.

Os resultados apresentados nas **Figuras 3.4.20 a 3.4.23** indicam um efeito particularmente interessante. No primeiro caso, houve uma transmissão na frequência de 9,50 GHz, com a inserção do espaçamento de uma célula unitária. Afastando-se os blocos de grades dielétricas em múltiplos da

célula unitária, o efeito de transmissão praticamente se manteve, indicando a periodicidade do fenômeno. Esse efeito é interessante, pois possibilita a utilização de pequenas quantidades de material para se promover seletividade em frequência para dispositivos de transmissão, sem a necessidade, a um primeiro instante, de se preencher todo o caminho de propagação do sinal. Um exemplo de aplicação prática desse resultado é quando se deseja, em um enlace ou em um sistema guiado, efetuar uma seleção em frequência, bastando apenas inserir algumas grades na região da transmissão e na região da recepção, desde que as distâncias entre elas sejam múltiplos da distância necessária para promover o efeito. Cabe aqui ressaltar-se que, na literatura consultada até o presente momento, não há publicações ou estudos que apresentem esse tipo de resultado, tanto para estruturas semelhantes às utilizadas neste trabalho, como para outros tipos de grades dielétricas.

Já os resultados apresentados na **Figura 3.4.15**, demonstraram que, para as grades colocadas a 45° , inserindo-se um defeito na região central, não se observa efeito relevante.

As medições obtidas com a utilização da sonda de campo confirmaram a presença da energia na região do defeito nas grades, conforme apresentado pelo Dr. Ozbay [46] na região da banda proibida, indicando que há energia presente na faixa de transmissão do defeito, visível na **Figura 3.4.28**, apesar da precariedade do comportamento do sensor utilizado, o qual foi construído de forma artesanal e não totalmente adequado para essa finalidade.

Outras medições, com novas estruturas e equipamentos mais adequados (no caso de sensores, principalmente) serão efetuadas em trabalhos futuros, de maneira a explorar ao máximo as novas possibilidades de controle de campos eletromagnéticos proporcionadas por estruturas periódicas dielétricas, metálicas e combinadas (metálico-dielétricas).

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos através do presente trabalho apresentaram-se satisfatórios, podendo-se apresentar as seguintes conclusões:

- A estrutura de testes e medições construída é confiável para a realização de ensaios na faixa de frequência entre 8,5 GHz a 13 GHz, com uma ressalva para as frequências muito próximas aos 8 GHz, limite de corte inferior da antena corneta utilizada;
- A tecnologia de obtenção de banda proibida de frequências pode ser obtida para a faixa de microondas, utilizando-se materiais simples e de baixo custo;
- Esse fenômeno pode ser utilizado em várias aplicações práticas. Uma delas é a seletividade em frequência para dispositivos de transmissão;
- A montagem construída pode ser utilizada como uma ferramenta educacional interessante, para ensaios e visualização de vários efeitos de transmissão de sinais de microondas. Um exemplo disso seria o estudo do comportamento de vários tipos de materiais inseridos na direção de propagação;
- Com a estrutura implantada no laboratório, vários outros estudos poderão ser realizados, com novas estruturas e configurações periódicas.

Como já discutido no início deste trabalho, nos últimos vinte anos, tem-se observado um avanço tecnológico sem precedentes, nos mais diversos setores da sociedade produtiva. Sem dúvida nenhuma, um desses setores, que teve e continua tendo um papel crucial para esse avanço, é o de Tecnologia da Informação, que une vários aspectos tecnológicos, tais como telecomunicações, eletrônica, informática, logística etc.

É cada vez maior a necessidade da disponibilidade de grandes quantidades de informações, a velocidades também cada vez mais altas. Em outras palavras, deseja-se ter flexibilidade total para acessar e processar informações em quaisquer que sejam as situações e em qualquer ponto do planeta.

Os recursos mais desenvolvidos e adotados para essa finalidade, no setor de telecomunicações, têm sido a *fibra óptica* e as chamadas *comunicações sem-fio*. No primeiro, garantem-se altas taxas de transmissão, com baixíssimo ruído. Já no caso das comunicações sem-fio, a maior vantagem é o seu alto grau de mobilidade, uma vez que não depende de cabos ou condutores de conexão em geral.

Porém, a utilização maciça das comunicações sem-fio vem ocasionando um problema sério, o qual vem sendo mais evidenciado a partir da disseminação da *telefonia móvel celular* (mais acentuado a partir do final da década de 1980).

Esse problema é denominado “Interferência Eletromagnética (do inglês – *EMI* – *Electromagnetic Interference*) [1]. Isso ocorre devido à geração e transmissão de sinais de RF (rádio-freqüência), utilizados nas comunicações sem-fio, que estão presentes desde poucos kHz até dezenas de GHz.

Esses sinais podem causar interferências em equipamentos, sistemas e instalações, ocasionando desde mau funcionamento até graves acidentes. Outra questão sobre EMI, ainda mais recente, é a relacionada à possibilidade de campos eletromagnéticos desencadearem processos nocivos nos seres vivos. Este é o campo de estudo denominado de Efeitos Biológicos de Radiações Não-Ionizantes (RNI). Essa questão é extremamente polêmica, pois ainda não há evidências suficientes que atestem positiva ou negativamente quanto ao problema.

Com isso, o presente trabalho vem trazer à comunidade científica e aos estudos de Compatibilidade Eletromagnética, algumas contribuições não somente sob o aspecto técnico, como também sob o aspecto econômico, de substancial importância para a redução de custos dos processos produtivos. As principais contribuições deste trabalho são:

- O desenvolvimento e validação de uma metodologia de testes e medições para o estudo de estruturas periódicas eletromagnéticas especiais;
- A indicação de resultados satisfatórios, obtidos a partir do estudo de estruturas dielétricas metamateriais construídas com materiais de baixo custo, em relação aos normalmente utilizados (alumina, acrílico);
- Disponibilização da estrutura de testes e medições para ensino didático de alguma técnicas normalmente empregadas em Compatibilidade Eletromagnética;
- Um resultado interessante, utilizando as estruturas de baixo custo, para o controle da seletividade na transmissão de sinais entre dois pontos, com significativa redução de material. Esse resultado em particular (vide seção 3.5), não foi observado até o presente momento nas publicações científicas consultadas sobre o assunto.

A divisão do trabalho deu-se da seguinte forma:

- O **Capítulo 1** apresentou uma idéia geral sobre os conceitos e aplicações da Compatibilidade Eletromagnética, que é um dos motivadores do presente trabalho;
- No **Capítulo 2** foi apresentada uma discussão teórica sobre estruturas periódicas aplicadas em eletromagnetismo, conceito de metamateriais e estruturas de banda proibida;
- A construção e validação do ambiente de medição, construção das grades dielétricas, estudos de seu comportamento e análise dos resultados foi objeto de discussão do **Capítulo 3**;

Como trabalhos futuros, ficam ainda as seguintes necessidades:

- Elaboração de um equacionamento teórico mais apurado, de forma a descrever de forma mais refinada o comportamento de estruturas periódicas contínuas e com defeitos;
- Desenvolvimento de um código numérico que possibilite maior agilidade e velocidade nos estudos com tais estruturas;
- Projeto, desenvolvimento e prototipagem de dispositivos e equipamentos que se beneficiem do efeito proporcionado por grades dielétricas, inserindo também combinações de grades metálicas.

Alguns problemas impediram a realização de estudos teóricos mais refinados, tais como a indisponibilidade de programas computacionais adequados para a modelagem das estruturas e a escassez de material bibliográfico sobre o assunto, visto que esses estudos tomaram maior vulto a partir de meados do ano 2000.

6. REFERÊNCIAS

- [1] IEC, “IEC 50 (161): International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 161: Electromagnetic compatibility”. *IEC International Standard, 1990.*
- [2] Anatel, “Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil”. In *www.anatel.gov.br.*
- [3] Anatel, “Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz”. In *www.anatel.gov.br.*
- [4] J. D. Kraus, “Antennas”. *New York, McGrawHill, 1988.*
- [5] Anatel, “Diretrizes Para Limitação Da Exposição A Campos Elétricos, Magnéticos E Eletromagnéticos Variáveis No Tempo (Até 300 GHz)”. In *www.anatel.gov.br.*
- [6] IEC, “CISPR 22 - Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of information technology equipment”. *IEC International Standard, 1997.*
- [7] IEC, “IEC 61000-4-6 - Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 6: Immunity to conducted disturbances induced by radio-frequency fields”. *IEC International Standard, 1996.*
- [8] IEC, “IEC 61000-4-2 - Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 2: Electrostatic discharge immunity test”. *IEC International Standard, 1999.*
- [9] Anatel, “Regulamento Para Certificação De Equipamentos De Telecomunicações Quanto Aos Aspectos De Compatibilidade Eletromagnética”. Resolução 237, de 9 de novembro de 2000. In *www.anatel.gov.br*
- [10] M.L. Crawford, “Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells”, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-16, No. 4, pp. 189-195, 1974.
- [11] K. Malaric e J. Bartolic, “Design of a TEM-Cell with Increased Usable Test Area”. *Turk J Elec Engin*, VOL.11, NO.2 - 2003
- [12] C. Icheln, “The Construction and Application of a GTEM Cell”. *Master’s Thesis*, Technical University of Hamburg-Hamburg/Helsinki University of Technology. Nov/1995.

- [13] D. K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics". Reading, Mass.: Addison-Wiley, 1989.
- [14] TDK RFSOLUTIONS, "Chambers Brochure". In www.tdkrfsolutions.com.
- [15] TDK RFSOLUTIONS, "Absorbers Brochure". In www.tdkrfsolutions.com.
- [16] ANSI, "C.63: American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronics Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz-Specifications".
- [17] A. R. Panicali, E. J. Sartori, "Filtro de RF Para Cabos Multicondutores Utilizando o Princípio Absorção Eletromagnética". Fundação CPqD – Biblioteca, 1995.
- [18] Anvisa, "Resolução nº 444, de 31 de agosto de 1999: Adota a norma técnica brasileira NBR IEC 60601.1:Equipamento Eletromédico. Parte 1 Prescrições Gerais para Segurança e normas técnicas particulares brasileiras da série NBR IEC 60601.2.".
- [19] IEC, "IEC 61000-3-2 - Limits for harmonic current emissions (equipment input current up to and including 16 A per phase)". IEC International Standard, 2000.
- [20] Robert E. Collin: "Field Theory of Guided Waves", IEEE Press, Oxford University Press, second edition, 1990, ISBN 0-87942-237-8
- [21] E. B. Mano, "Polímeros como Materias de Engenharia". E. Blucher. São Paulo, 1991.
- [22] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade e J. N. Winn, "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light". Princeton, September 1995.
- [23] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics". *Physical Review Letters*, v. 58, p. 2059–2063, 1987.
- [24] Yong-Kee Yeo, "Fabrication of Photonic Band Gap Structures". Dept. of ECE. In users.ece.gatech.edu/~alan/11-27-Yeo%20Photonic%20Bandgap%20Fabrication.pdf
- [25] Y. Rahmat_Samii, "Electromagnetic Band-Gap Structures: Classification, Characterization and Applications". 11th International Conference on Antennas and Propagation, 17-20 April 2001, Conference Publication N°. 480 - IEE EBG_08
- [26] Jwo-Shiun Sun, "Efficiency of Various Photonic Bandgap (PBG) Structures". 3^o IEEE International Conference on Microwave and Milimeter Wave Technology – 2002.

- [27] Cyril Cheype *et al.*, “An Electromagnetic Bandgap Resonator Antenna”. *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, Vol. 50, No. 9, Setembro 2002
- [28] Fan Yang , “Applications of Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structures in Microwave Antenna Designs”. *In Proceedings – 3^o IEEE International Conference on Microwave and Milimeter Wave Technology – 2002.*
- [29] M. J. Hill e R. W. Ziolkowsk, “A High-Q Reconfigurable Planar EBG Cavity Resonator”. *IEEE Microwave And Wireless Components Letters* , Vol. 11, No. 6, June 2001
- [30] Jwo-Shiun Sun, “Efficiency of Various Photonic Bandgap (PBG) Structures”. *3^o IEEE International Conference on Microwave and Milimeter Wave Technology – 2002.*
- [31] L. C. M. Oliveira, “Aplicação De Estruturas Pbg Em Dispositivos Planares De Microondas - Linhas E Antenas - Em Substratos Dielétricos E Semicondutores: Desenvolvimento De Tecnologia E Caracterização”. *Tese de Mestrado. UNICAMP*, setembro de 2001.
- [32] V.G. Veselago, “Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Sigma and Mu”, *Sov. Phys. USPEKHI*, no. 10, p. 509, 1968.
- [33] W. Rotman, “Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-Plate Media”, *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP10, no. 82, pp. 82-95, janeiro 1962.
- [34] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins e W. J. Stewart, “Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena”, *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* Vol. 47, pp. 2075-2084, novembro 1999.
- [35] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser e S. Schultz, “Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity”, *Physical Rev. Lett.*, vol 84, no. 18, pp. 4184-4187, maio 2000.
- [36] D. R. Smith, D. C. Vier, N. Kroll e S. Schultz, “Direct Calculation of Permeability and Permittivity for a Left-Handed Metamaterial”, *Applied Physics Letters*, vol. 77, no. 14, pp. 2246-2248, 2 outubro 2000.
- [37] Richard W. Ziolkowski e Ehud Heyman, “Wave Propagation in Media Having Negative Permittivity and Permeability”, *Physical Review E*, vol. 64, pp. 1-15, 2001.

- [38] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser e S. Schultz, “Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial”, *Applied Physics Letters*, vol. 78, no. 4, pp. 489- 491, 22 janeiro 2001.
- [39] Philippe Gay-Balmaz e Olivier J. F. Martina, J., “Electromagnetic Resonances in Individual and Coupled Split-Ring Resonators”, *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 5, 1 Setembro 2002.
- [40] C. Caloz, C.-C. Chang e T. Itoh, “Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations”, *Journal of Applied Physics*, vol. 90, no. 11, pp. 5483-5486, 1 dezembro 2001.
- [41] Pendry *et al.*, “Metamaterial bends microwaves into beam”. In www.nature.com/nsu/021118/021118-13.html
- [42] G. Tayeb *et al.*, “COMPACT DIRECTIVE ANTENNAS USING METAMATERIALS”. *Institut Fresnel, UMR CNRS 6133, Faculté de Saint Jérôme, case 161, 13397 Marseille Cedex 20, France.*
Email: gerard.tayeb@fresnel.fr
- [43] H. Mosalled e K. Sarabandl , “Periodic Meta-Material structures in Electromagnetics: Concept, Analysis and Applications”. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, Volume: 2 , 16-21 June 2002 pp.380 - 383.*
- [44] M. Golosovsky, Y. Neve-Oz e D. Davidov, “Magnetic-field tunable photonic stop band in metallodielectric photonic crystals”. *Synthetic Metals* 139 (2003), pp. 705–709
- [45] EST/Lindgren, “On-line Product Catalog”. In www.emctets.com
- [46] E. Ozbay *et al.*, “MICROWAVE APPLICATIONS OF PHOTONIC CRYSTALS”. *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 41, 185–209, 2003
- [47] J. M. Hickmann , “Microwave measurements of the photonic band gap in a two-dimensional photonic crystal slab”. *Journal Of Applied Physics*, Vol. 92, Number 11, 1 Dezembro 2002
- [48] Solay Indupa do Brasil, in <http://www.solvayindupa.com.br/pvc/pvc.htm>
- [49] C. A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”. John Wiley, New York, 1989.
-