Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação

Departamento de Micro-onda e Óptica

METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE DESENVOLVIMENTO DE GRADES METAMATERIAIS COM PERMISSIVIDADE QUASE-ZERO E NEGATIVA

Autor: Eduardo José Sartori

Orientador: Prof. Dr. Hugo E. Hernandez Figueroa

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Nome: Prof. Dr. Antônio Roberto Panicali

Nome: Prof. Dr. Sílvio Ernesto Barbin

Nome: Prof. Dr. Paulo Cardieri

Nome: Prof. Dr. Gustavo Fraidenraich

Campinas, 14 de dezembro de 2009

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

Sartori, Eduardo José
Metodologia experimental de desenvolvimento de grades metamateriais com permissividade quase-zero e negativa / Eduardo José Sartori. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Hugo Enrique Hernández Figueroa.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

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

Título em Inglês: Experimental methodology to development of metamaterial grids with near-zero and negative permittivity
Palavras-chave em Inglês: Metamaterials, Negative refractive index, ENZ, bandgap
Área de concentração: Telecomunicações e Telemática
Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica
Banca examinadora: Sílvio Ernesto Barbin, Antônio Roberto Panicali, Gustavo Fraidenraich, Paulo Cardieri
Data da defesa: 14 de dezembro 2009
Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica e de Computação.

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Eduardo José Sartori

Data da Defesa: 14 de dezembro de 2009

Título da Tese: "Metodologia Experimental de Desenvolvimento de Grades Metamateriais com Permissividade Quase-Zero e Negativa"

Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa (Presidente): ______________________

Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin: ______________________

Prof. Dr. Antônio Roberto Panicali: ______________________

Prof. Dr. Gustavo Fraidenraich: ______________________

Prof. Dr. Paulo Cardieri: ______________________

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a DEUS, por toda a ajuda e orientação a mim dispensada até hoje;

À minha família, pela paciência e compreensão durante todo esse período;

Ao Prof. Dr. Hugo E. Hernandez Figueroa, não somente pela orientação mas, acima de tudo, pela nossa grande amizade;

Aos amigos do DMO, pelo apoio na realização deste trabalho;

À Dra. Milene Heloísa Martins, que foi uma das maiores responsáveis pela minha entrada na carreira acadêmica;

Ao Prof. Dr. Antônio Roberto Panicali, por todos os anos de amizade e influências em relação à minha escolha pelo eletromagnetismo como carreira profissional;

Aos grandes amigos, Alexandre Silva, Carlos Henrique da Silva, Gustavo Calixto, Luciano Prado e Luiz Carlos de Freitas Junior, minha eterna gratidão;

A José Eduardo Bertuzo, Wladinei Menegassi, Mauro Massanori Miyashiro e Rodrigo Sales, todos do Instituto de Pesquisas Eldorado, agradeço pelo apoio técnico e pessoal;

Aos amigos Ivan Vigiato, Luis Felipe Mattos e Almir Pomeranzi, da IME Instrumentos de Medição Ltda., agradeço pela fundamental ajuda em todo o período em que estive elaborando o presente trabalho;

E finalmente, a todos da FEEC/UNICAMP que, de alguma forma, tiveram participação na realização desta tese de doutorado.

Dedico este trabalho
aos meus pais, Elza e Oswaldo,
minhas irmãs, Elaine e Adriana e,
acima de tudo, a você, Milene,
que foi a maior Luz,
sempre disponível nos momentos
em que mais necessitei.

Este trabalho teve apoio financeiro do Instituto De Pesquisas Eldorado - Campinas - SP

Resumo

Metamateriais são estruturas ou arranjos geométricos feitos a partir de materiais comuns, dielétricos, condutores, magnéticos ou por combinação destes. Os metamateriais caracterizam-se principalmente por apresentarem propriedades especiais de permissividade (ε) e permeabilidade (μ) não encontradas nos materiais em estado natural, cujo principal efeito é o índice negativo de refração ($n < 0$). Essas características permitem seu emprego em diversos tipos de aplicações em eletromagnetismo e óptica, tais como filtros passa-faixa e rejeita-faixa, espelhos dielétricos, super lentes etc. Normalmente, o equacionamento envolvido no cálculo de parâmetros dos metamateriais são complexos e, na maioria das vezes, necessitam de apoio computacional.

Por este motivo, o presente trabalho traz um estudo experimental sobre dois tipos de comportamento metamaterial, o de permissividade quase-zero e negativa, analisando seu desempenho sob vários aspectos geométricos e de características dos materiais envolvidos, além de propor uma metodologia de desenvolvimento, a qual possibilita um rápido dimensionamento de diversos tipos de grades metamateriais, baseada em cálculos simples ou consulta direta a tabelas e curvas de projeto.

Abstract

Metamaterials are structures or geometric arrangements made from common materials, dielectrics, conductors, magnetic or a combination of these. Metamaterials are characterized mainly because of their special characteristics of permittivity (ε) and permeability (μ), not found in the materials at natural state, whose main effect is the negative index of refraction (n <0). These characteristics allow its use in several types of applications in electromagnetism and optics, such as band-pass and band-stop filters, dielectric mirrors, super lenses etc.. Typically, the equations involved in the calculation of parameters of metamaterials are complex and, in most cases, require high capability computational methods.

For this reason, this work presents an experimental study on two types of metamaterial behavior, near-zero and negative permittivity, examining its performance in several geometric aspects and characteristics of the materials involved, and propose a development methodology, which allows a fast scaling of various types of metamaterials grids, based on simple calculations or direct consultation tables and curves design.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

ω – Freqüência angular [rad/s];

a – Periodicidade da estrutura [m];

c – Velocidade da luz no vácuo [m/s];

k - Índice da frequência do modo em relação à periodicidade;

ξ - Frequência associada à estrutura metamaterial [GHz];

Fi - Frequência inicial da banda proibida [GHz];

Ff - Frequência final da banda proibida [GHz];

At - Atenuação máxima da banda proibida [dB]

Lb - Largura de banda [GHz]

ε - Permissividade relativa [F/m]

μ - Permeabilidade relativa [H/m]

σ - Condutividade elétrica [S/m]

Trabalhos afins publicados pelo autor

SARTORI, E.J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA; **A Simple and Efficient Method to Design Electromagnetic Band Gap Grids**. Microwave and Optical Technology Letters, Wiley. Submitted in oct/29/2009. ID: MOP-09-1554

SARTORI, E.J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA,; **Investigation on The Effect of Defects in Different Types of Ebg Grids**, EuCAP 2010 – Barcelona, Spain, 12-16 April 2010. Submitted in: oct/12/2009. ID 1849549.

SARTORI, E.J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H.E.; BERTUZZO, J.E.; **Defect effect over transmission through CPVC metamaterials dielectric grids.** 2nd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Pamplona, Spain, September 21-26, 2008.

SARTORI, E.J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H.E.; BERTUZZO, J.E.; **Estruturas Metamateriais Sintonizáveis Utilizando Polímeros de Baixo Custo.** MOMAG 2008: 13° SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 8° CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 07 a 10/set/2008, Florianópolis – SC, Brasil.

SARTORI, E.J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H.E.; BERTUZZO, J.E.; **Estudo do Comportamento de Grades Dielétricas Metamateriais de Baixo Custo**. 60ª Reunião Anual da SBPC, 13 a 18/07/2008, Campinas – SP, Brasil.

SARTORI, E.J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H.E.; BERTUZZO, J.E., **Metamaterial behavior of low cost PVC dielectric grids.** First International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, 22-26 October 2007, Rome, Italy.

SARTORI, E.J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H.E.; BERTUZZO, J.E.. **Tunable Bandgap Metamaterials Using Low Cost Dielectric Grids.** EUCAP 2007 - The Second European Conference on Antennas and Propagation, 11 - 16 November 2007, EICC, Edinburgh, UK.

SARTORI, E. J.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H. E. . **Montagem de Baixo Custo Para o Estudo Experimental de Metamateriais**. MOMAG - 12º SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica. 7º CBMAG – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Belo Horizonte, MG, 07 a 10 de agosto de 2006.

"Os progressos obtidos por meio do ensino são lentos;
já os obtidos por meio de exemplos
são mais imediatos e eficazes".

(Lucius Annaeus Seneca, 4a.C.- 65 d.C.)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivo

O presente trabalho vem trazer à comunidade científica e aos estudos de metamateriais, algumas contribuições não somente sob o aspecto tecnológico e científico, como também sob o aspecto econômico e ambiental, de substancial importância para a redução de custos dos processos produtivos e pela manutenção do meio ambiente. Os principais objetivos e contribuições deste trabalho são:

- Apresentar um estudo amplo sobre o comportamento de estruturas metamateriais cilíndricas dielétricas e metálicas;
- Oferecer um equacionamento simplificado e de rápida aplicação no projeto de grades metamateriais;
- Explorar os potenciais de emprego prático para as grades metamateriais, como dispositivos de controle de campos eletromagnéticos;
- Estimular o interesse de estudantes e profissionais pela área de eletromagnetismo, traduzindo conceitos e teorias complexas para linguagem prática e com aplicação imediata;
- Incentivar o estudos de fenômenos do eletromagnetismo através do emprego de estruturas construídas a partir de materiais de baixo custo e fácil obtenção, estimulando o interesse nos estudos de aplicações de materiais recicláveis em ambientes onde geralmente são utilizados materiais nobres (dispositivos de micro-ondas, por exemplo).

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

- O **Capítulo 1** faz uma introdução histórica e teórica sobre os metamateriais, desde os primeiros meios eletromagnéticos artificiais até aos mais recentes avanços sobre o assunto;

- O **Capítulo 2** apresenta detalhadamente toda a metodologia de projeto, proposta principal deste trabalho, desde a concepção teórica até às aplicações experimentais;
- O **Capítulo 3** traz a validação do método proposto no **Capítulo 2**, através de uma série de medições e ensaios laboratoriais, devidamente comentado para cada um dos casos estudados;
- No **Capítulo 4** são apresentados os comentários gerais e a conclusão do trabalho, além dos potenciais para desenvolvimento de trabalhos futuros, principalmente em função de alguns resultados já obtidos no âmbito das simulações computacionais.
- Nos **ANEXOS I** e **II** são apresentados todos os dados para o projeto das grades metamateriais discutidas ao longo deste trabalho.

1.2 Introdução

O conceito de materiais eletromagnéticos artificiais surgiu no final do século 19, com as primeiras experiências em micro-ondas, realizadas por Bose [1], com meios hoje conhecidos como meios quirais. Em 1925, Georges Lakhovsky, um engenheiro russo publicou seu trabalho sobre uma possível cura para o câncer [2], através de um gerador de ondas eletromagnéticas acoplado a um ressoador [3], cujo aspecto se assemelhava aos ressoadores em anéis divididos (SSR), utilizados posteriormente por Pendry, já como estruturas metamateriais somente em 1999 [4]. Em 1948, Kock [5] construiu lentes aplicadas a micro-ondas empregando diversos tipos de estruturas metálicas, tais como esferas, discos e lâminas, dispostas periodicamente, alterando significativamente o comportamento da permissividade e permeabilidade desse conjunto, considerado como meio artificial.

No ano de 1968 o cientista russo Veselago [6] 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 [7] em 1962.

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 [7], 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.* [4], 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 ressoador 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 Fig. 1.1. 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.

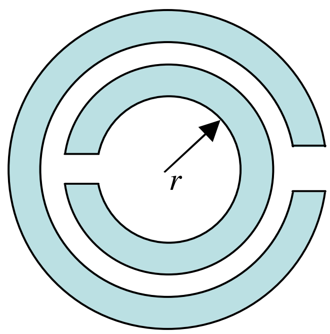


Fig. 1.1: Ressoador em anel dividido (SRR) para produzir um meio efetivo com permeabilidade negativa..

A partir da concepção de como construir um meio que apresentasse individualmente ε ou μ negativos, o próximo passo foi combinar estes dois meios de modo a produzir um terceiro, obtendo-se esses dois efeitos simultaneamente. Isto foi realizado recentemente por Smith *et al.* [8], em maio de 2000. Desde então, vários trabalhos têm sido apresentados ao meio científico, procurando explorar novos efeitos e descobrir novas aplicações para este particularmente interessante material. Em seguida, Smith *et al.* também propuseram métodos mais confiáveis para o cálculo dos valores de ε e μ utilizando métodos baseados em diferenças finitas [9].

O primeiro estudo da propagação de ondas em meios apresentando ε e μ negativos foi apresentado por Ziolkowski *et al.* [10], 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 conseqüência direta do uso do metamaterial. Shelby *et al.* [11], 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.

Ressoadores SRR, isolados e acoplados, foram investigados em profundidade por Balmaz *et al.* [12], 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.* [13], 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.* [14] 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.. Através desta superfície a radiação em forma de um feixe estreito é emitida fazendo um ângulo de 90^{o} com a mesma, independente do ângulo de incidência das ondas (excitação) propagando-se dentro desse meio. Para uma freqüência 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^{o} e 12,5^{o} 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.* [15], com estudos teóricos e resultados experimentais.

A combinação, de arranjos geométricos de diferentes tipos de estruturas, pode resultar, basicamente, em quatro tipos de meios [16]: 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 LH (ε, μ negativos),como ilustra o gráfico da Fig. 1.2.

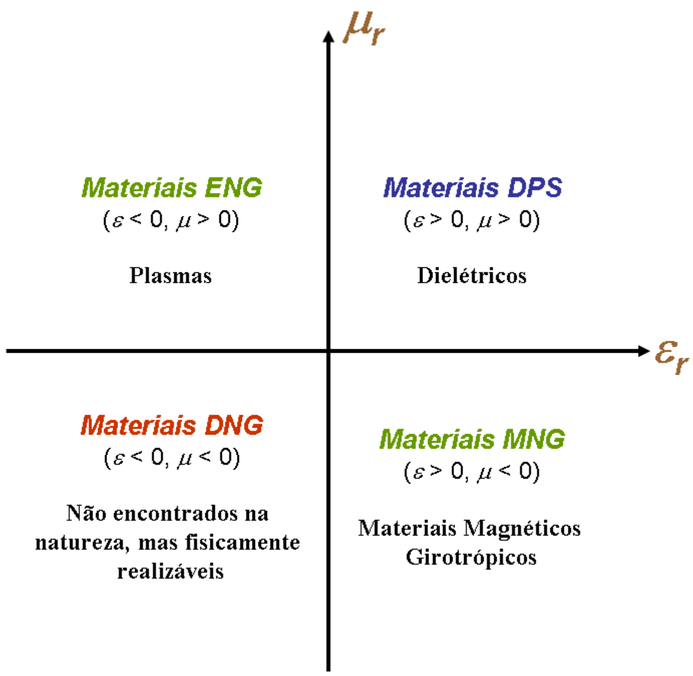


Fig. 1.2: Os quatro comportamentos para ε e μ nos meios metamateriais.

Um dos meios desenvolvidos e avaliados pelo LEMAC - UNICAMP (Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado e Computacional "Prof. Dr. Ruy Fragassi Souza") foi o obtido através de grades dielétricas [17], utilizando-se materiais de baixo custo. Esses materiais, no caso, tubos de CPVC (Cloreto de Polivinila Clorado), são facilmente encontrados no mercado varejista de materiais para construção, na forma de tubos e conexões para utilização com água aquecida.

Com essa estrutura, foram observados resultados interessantes, como por exemplo, a obtenção de bandas proibidas de propagação [18] e possibilidade de sintonização de bandas de passagem [19]. Os resultados obtidos com as estruturas de CPVC demonstraram-se muito semelhantes aos obtidos em estruturas tubulares em acrílico [20], com a vantagem do baixo custo e fácil obtenção do CPVC.

Os metamateriais podem ser definidos como materiais compostos que apresentam características, sob o ponto de vista eletromagnético e óptico, não encontradas na natureza. O maior interesse nos metamateriais é a possibilidade de se criar um meio com índice de refração negativo ($n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu}$), o que ofereceria um grande universo de aplicações. Dentre essas aplicações estão as super-lentes [21], cujo índice de refração negativo proporcionado pelos metamateriais possibilita a colimação muito maior do que em lentes comuns. Também estão os materiais absorvedores de campos eletromagnéticos [22][23], os quais podem ser utilizados em diversas aplicações onde haja a necessidade de controle da reflexão de ondas, mas com dimensões físicas reduzidas.

Outra aplicação interessante é em relação a antenas, proporcionando características tais como alta diretividade e miniaturização[24].

Uma das aplicações mais recentes dos metamateriais é a obtenção de invisibilidade de objetos metálicos em frequências de micro-ondas [25], onde um cilindro de cobre foi envolvido por uma estrutura metamaterial, a qual proporcionou um guiamento da onda incidente, de forma que o cilindro não oferecesse quaisquer tipos de influências sobre a mesma (Fig. 1.3).

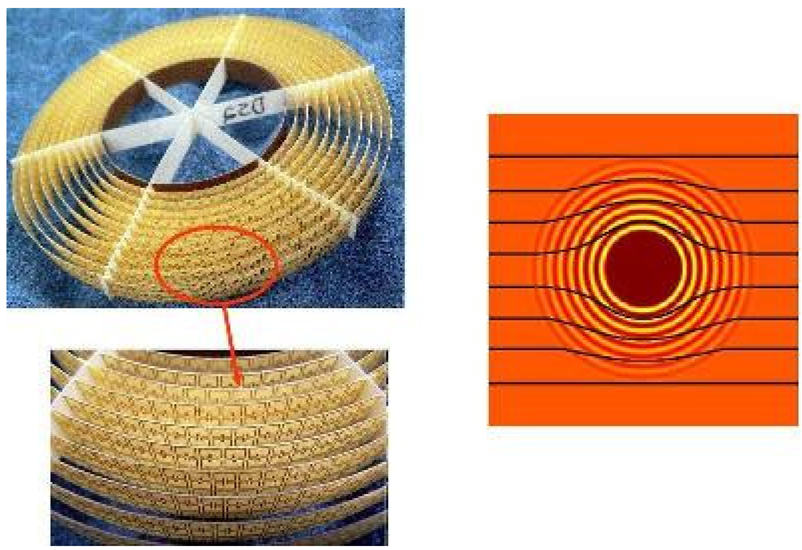


Fig. 1.3: Estrutura metamaterial e o efeito de invisibilidade.

Existem ainda uma série de outras aplicações e possibilidades que vêm sendo exploradas para o uso de metamateriais, como é o caso de ressoadores miniaturizados [26], guias fotônicos [27], espelhos para micro-ondas [28], além de aplicações em nanotecnologia [29] e também na faixa dos THz (TeraHertz)[30]. Neste último, estão sendo testados dispositivos de chaveamento de alta velocidade, baseados em estruturas metamateriais em AsGa, com dimensões da ordem de 50μm.

Os metamateriais oferecem um vasto campo de estudos e aplicações em diversas áreas da tecnologia, constituindo um poderoso meio para o desenvolvimento de novos produtos e técnicas em eletromagnetismo, micro-ondas e fotônica.

1.3 Comportamento Físico dos Metamateriais

As principais características que definem a propagação de uma onda em um meio material são a permissividade elétrica (ε) e a permeabilidade magnética (μ) desse meio, onde podem assumir parcelas reais e complexas:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' \quad (1.1.a)$$

$$\mu = \mu' + j\mu'' \quad (1.1.b)$$

onde ε', μ' são reais e ε'', μ'' são as parcelas complexas em função das perdas no material.

Para um meio isotrópico, equação de dispersão de onda em um meio material pode ser resumida a:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \cdot n^2 \quad (1.2)$$

onde k é o vetor de onda, ω é a frequência angular (rad/s), c é a velocidade da luz no vácuo (m/s) e n^2 é o índice de refração do material dado por:

$$n^2 = \varepsilon \cdot \mu \quad (1.3)$$

Desconsiderando-se as perdas no material em relação ao cálculo de n, as propriedades ε e μ assumem valores puramente reais.

A Fig. 1.2 mostra que os metamateriais podem se apresentar de quatro maneiras, quanto à permissividade (ε) e permeabilidade (μ):

- $\varepsilon, \mu > 0$;
- $\varepsilon, \mu < 0$;
- $\varepsilon > 0, \mu < 0$;

- $\varepsilon < 0, \mu > 0$

Os materiais com ε, $\mu > 0$ constituem praticamente a grande maioria dos materiais comuns existentes na natureza, com exceção de uma região denominada de "quase-zero", a qual apresenta características particulares tanto para ε como para μ, e com grandes potenciais de aplicação prática [31].

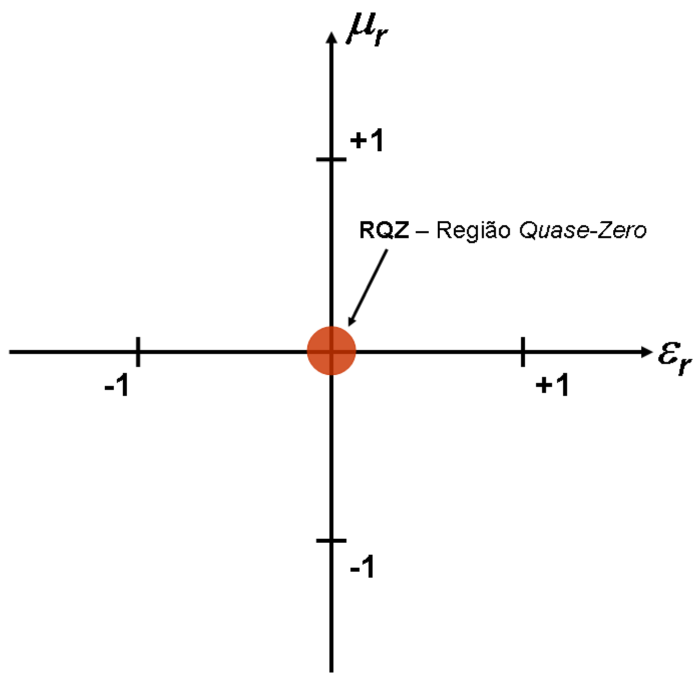


Fig. 1.4: Região para ε e μ "*quase-zero*".

Os materiais com permeabilidade e permissividade negativas são conhecidos por uma série de denominações diferentes, tais como meios de *mão-esquerda* (*LHM* - *left-handed media*) [32-37], em alusão à contrariedade à *regra da mão-direira* (*RHM* - *right-handed media*), normalmente adotada para descrever os campos eletromagnéticos em meios normais; meio com índice de refração negativo [33]; metamateriais duplo-negativo (*DNG* - *double-negative*) [38].

Meios com permissividade e permeabilidade positivas (ε, $\mu > 0$) são designados como meios *duplo-positivos* (*DPS* - *double-positive media*). O meio com permissividade menor que zero e permeabilidade maior que zero ($\varepsilon < 0$, $\mu > 0$) é denominado como meio *Epsilon-Negativo* (*ENG* - *epsilon-negative media*) [39][40]. Meios com permissividade maior que zero e permeabilidade menor que zero ($\varepsilon < 0$, $\mu > 0$) são chamados de meio *Mu-Negativo* (*MNG - mu-negative media*)[41][42]. Finalmente, meios com permissividade e permeabilidade negativos ($\varepsilon < 0$, $\mu < 0$) são denominados meios *Duplo-Negativos* (DNG - *double-negative media*)[43].

Um dos modelos para descrever materiais dielétricos é o *modelo de Lorentz*. Esse modelo descreve a resposta temporal da componente do campo de polarização do meio à mesma componente do campo elétrico [31]:

$$\frac{d^2}{dt^2}P_i + \Gamma_L \frac{d}{dt}P_i + \omega_0{}^2 P_i = \varepsilon_0 \chi_L E_i \tag{1.4}$$

O primeiro termo corresponde à aceleração das cargas, enquanto que o segundo termo corresponde ao amortecimento do sistema com o coeficiente de amortecimento Γ_L. O terceiro termo corresponde às forças de recuperação com frequência característica $f_0 = \omega_0/2\pi$. χ_L é um coeficiente de acoplamento. A resposta no domínio da frequência, assumindo a dependência temporal $e^{+j\omega t}$, é dada por:

$$P_i(\omega) = \frac{\chi_L}{-\omega^2 + j\Gamma_L\omega + \omega_0{}^2}\varepsilon_0 E_i(\omega) \tag{1.5}$$

Os campos elétrico e de polarização são relacionado pela susceptibilidade elétrica de Lorentz como segue:

$$\chi_{e,Lorentz}(\omega) = \frac{Pi(\omega)}{\varepsilon_0 E_i(\omega)} = \frac{\chi_L}{-\omega^2 + j\Gamma_L\omega + \omega_0{}^2} \tag{1.6}$$

A permissividade é obtida por:

$$\varepsilon_{Lorentz}(\omega) = \varepsilon_0\left[1 + \chi_{e,Lorentz}(\omega)\right] \tag{1.7}$$

Existem vários casos especiais para os modelos de Lorentz. Por exemplo, quando a aceleração é pequena em relação aos outros termos na equação 1.4, obtém-se o modelo de Debye:

$$\Gamma_d \frac{d}{dt} P_i + \omega_0{}^2 P_i = \varepsilon_0 \chi_d E_i \quad \text{e} \quad \chi_{e\,,Debye}(\omega) = \frac{\chi_d}{j\Gamma_d \omega + \omega_0{}^2} \tag{1.8}$$

Quando a força de restauração do movimento pode ser desprezada, obtém-se o modelo de Drude:

$$\frac{d^2}{dt^2} P_i + \Gamma_D \frac{d}{dt} P_i = \varepsilon_0 \chi_D E_i \quad \text{e} \quad \chi_{e\,,Drude}(\omega) = \frac{\chi_D}{-\omega_0{}^2 + j\Gamma_D \omega} \tag{1.9}$$

onde o coeficiente de acoplamento é geralmente representado pela frequência de plasma $\chi_D = \omega_p{}^2$.

Para os metamateriais é necessária a introdução de generalizações nos modelos apresentados, como é o caso do modelo de segunda ordem 2TDLM (two-time-derivative Lorentz model) [44-46].

$$\begin{gathered}\frac{d^2}{dt^2} P_i + \Gamma_L \frac{d}{dt} P_i + \omega_0{}^2 P_i = \varepsilon_0 \chi_L E_i + \varepsilon_0 \chi_\beta \omega_p \frac{d}{dt} E_i + \varepsilon_0 \chi_\gamma \frac{d^2}{dt^2} E_i \\ \chi_{e\,,2TDLM}(\omega) = \frac{\chi_\alpha \omega_p{}^2 + j\chi_\beta \omega_p \omega - \chi_\gamma \omega^2}{-\omega^2 + j\Gamma_L \omega + \omega_0{}^2}\end{gathered} \tag{1.10}$$

O presente trabalho terá como foco principal o estudo do comportamento de dois meios: o ENG e o meio quase-zero para a permissividade (*EQZ - epsilon-quase-zero*).

Um exemplo de estruturas tipo ENG são as construídas com elementos metálicos não magnéticos (varetas de alumínio, por exemplo). Pela sua natureza física, o modelo para a permissividade efetiva dessas estruturas pode ser aproximado ao modelo de plasma. Tomando-se como exemplo uma estrutura periódica, construída por cilindros de alumínio com raio *R* e distanciamento periódico *a*, a permissividade efetiva (ε_{eff}) pode ser obtida pela Eq. 1.11 [47]:

$$\mathrm{Re}\{\varepsilon_{eff}\} = \varepsilon_1 \left(1 - \frac{2\pi c^2 / \varepsilon_1}{(\sqrt{2}a)\ln(\sqrt{2}\, a/R) \cdot \omega^2} \right) = 1 - \frac{2\pi c^2}{a^2 \ln(a/R) \cdot \omega^2 + a^2 \ln\sqrt{2} \cdot \omega^2} \tag{1.11}$$

Observa-se que, para $\omega < \omega_p$, $\varepsilon_{eff} < 0$. Em uma situação onde R = 3.00mm e a = 15.00mm, tem-se o seguinte comportamento para ε_{eff}, na faixa de frequências entre 3.0 – 6.0GHz:

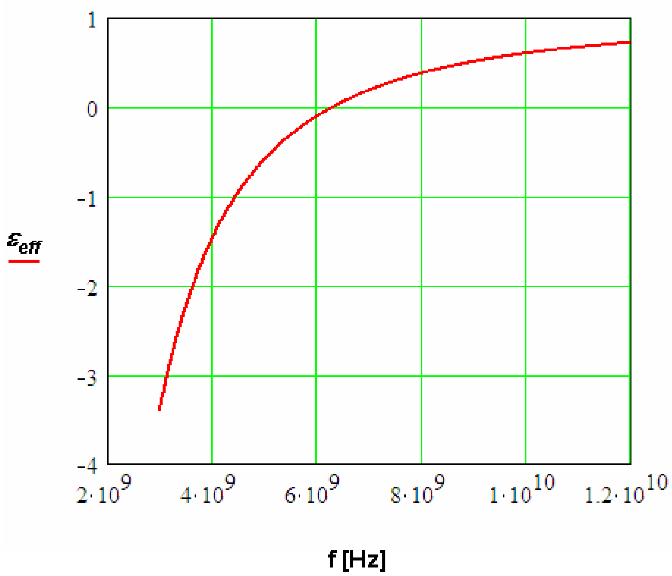


Fig. 1.5: Permissividade efetiva para uma estrutura periódica metálica não magnética.

Estruturas metamateriais, as quais possuem pemissividade e/ou permeablidade zero ou muito menores que a unidade vêm sendo estudadas e demonstradas por vários grupos de pesquisas [48-59].

Para ilustrar esse comportamento, parte-se das equações de Maxwell:

$$\begin{aligned} \nabla \times E_\omega &= -j\omega\mu H\omega \qquad \nabla \cdot (\varepsilon E_\omega) = \rho_\omega \\ \nabla \times H_\omega &= j\omega\varepsilon E_\omega + J_\omega \qquad \nabla \cdot (\mu H_\omega) = 0 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Quando $\varepsilon(\omega) \cong 0$ e $\mu(\omega) \cong 0$, as equações de Maxwell são reduzidas a:

$$\begin{aligned} \nabla \times E_\omega &= 0 \qquad \nabla \cdot (\varepsilon E_\omega) = 0 \\ \nabla \times H_\omega &= J_\omega \qquad \nabla \cdot (\mu H_\omega) = 0 \end{aligned} \tag{1.13}$$

As equações à direta satisfazem as condições de meios com índice-zero para campos no espaço infinito. Para um cilindro infinito com material de índice-zero, disposto no espaço-livre, as soluções para uma linha infinita de corrente

$$J_\omega(r,\phi,z) = I_0 \frac{\delta(\rho)}{2\pi r}\hat{z} \qquad (1.14)$$

são, para $r \leq a$:

$$E_\omega(r,\phi,z) = -Z_0 \frac{I_0}{2\pi a}\frac{jH_0^{(2)}(k_0 a)}{H_1^{(2)}(k_0 a)}\hat{z}$$
$$H_\omega(r,\phi,z) = \frac{I_0}{2\pi r}\hat{\phi} \qquad (1.15)$$

E, para $r \geq a$:

$$E_\omega(r,\phi,z) = -Z_0 \frac{I_0}{2\pi a}\frac{jH_0^{(2)}(k_0 a)}{H_1^{(2)}(k_0 a)}\hat{z}$$
$$H_\omega(r,\phi,z) = \frac{I_0}{2\pi a}\frac{jH_1^{(2)}(k_0 a)}{H_1^{(2)}(k_0 a)}\hat{\phi} \qquad (1.16)$$

onde $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0}\sqrt{\mu_0}$.

Também tem-se demonstrado que é possível a determinação dos parâmetros ε e μ, na região quase-zero, através dos parâmetros de espalhamento (parâmetros S), obtidos experimentalmente com as estruturas metamateriais [60-62]. Os experimentos partem de medições das propriedades dos materiais pelo método do espaço-livre, obtendo-se as curvas de S_{11} e S_{21} em módulo e fase (Fig. 1.6).

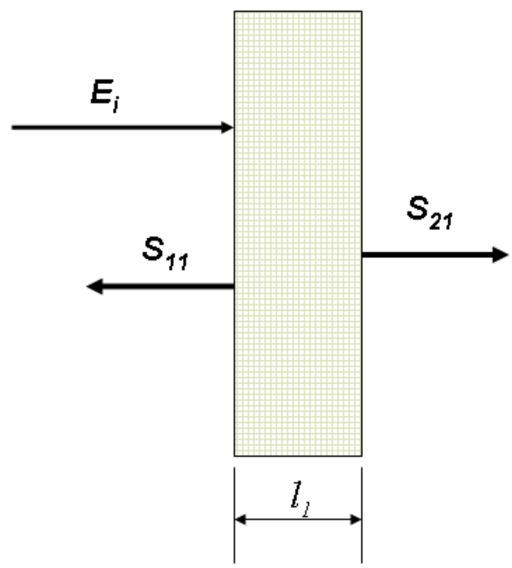


Fig. 1.6: Método do espaço-livre.

Dessa forma, obtendo-se os valores de S_{11} e S_{21} medidos para uma determinada estrutura metamaterial, podem-se obter os valores de ε e μ efetivos para essa estrutura através dos parâmetros índice de refração (n) e impedância (z) [63]:

$$\varepsilon = \frac{n}{z}, \quad \mu = nz \tag{1.17}$$

onde:

$$n = \frac{1}{kd}\cos^{-1}\left[\frac{1}{2S_{21}}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2)\right] \text{ e}$$

$$z = \pm\sqrt{\frac{(1 + S_{11}^2) - S_{21}^2}{(1 - S_{11}^2) - S_{21}^2}} \tag{1.18}$$

$$\text{p/: } k = 2\pi/\lambda$$

De posse dos parâmetros de reflexão e transmissão, medidos para uma dada estrutura dielétrica, conhecendo-se o valor da permissividade relativa dos materiais com os quais esta foi preparada, também é possível se obter o valor de $\varepsilon_{eff}(\omega)$ utilizando o equacionamento aplicado para uma transição ar-dielétrico-ar, com espessura l do dielétrico [64].

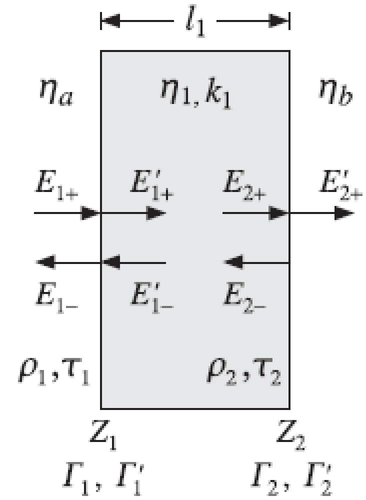


Fig. 1.7: Transmissão e reflexão em uma placa dielétrica simples.

Entretanto, para extração do valor de $\varepsilon_{eff}(\omega)$ das equações de transmissão e reflexão, há a necessidade de se aplicar um método numérico iterativo, pois tratam-se de equações transcendentais (1.19), onde Γ é o coeficiente de reflexão do campo e T, o coeficiente de transmissão na placa:

$$\Gamma = \frac{E_{1-}}{E_{1+}} = \frac{\rho_1 + \rho_2 e^{-2jk_1l_1}}{1+\rho_1\rho_2 e^{-2jk_1l_1}}, \qquad (1.19)$$

$$\mathrm{T} = \frac{E'_{2+}}{E_{1+}} = \frac{\tau_1 + \tau_2 e^{-jk_1l_1}}{1+\tau_1\tau_2 e^{-2jk_1l_1}}$$

onde cada termo é dado por:

$$\rho_1 = \frac{\eta_1 - \eta_a}{\eta_1 + \eta_a}, \quad \rho_2 = \frac{\eta_b - \eta_1}{\eta_b + \eta_1},$$

$$\tau_1 = 1 + \rho_1, \quad \tau_2 = 1 + \rho_2$$

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}} \qquad (1.20)$$

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1}$$

k_1 = número de onda no material

Este método é particularmente interessante para as estruturas puramente dielétricas, como as que serão apresentadas neste trabalho.

Capítulo 2

Metodologia de Projeto das Grades Metamateriais

2.1 Metodologias Analíticas de Projeto

Um dos problemas abordados neste trabalho foi a obtenção de um equacionamento que permitisse o projeto das grades dielétricas de uma forma simples e prática, considerando-se o maior número de variações possíveis, tanto na forma geométrica quanto em relação ao material dielétrico utilizado.

O desenvolvimento da teoria eletromagnética aplicada a essas grades parte, invariavelmente, das equações de Maxwell (2.1 a 2.4):

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \tag{2.1}$$

$$\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = 0 \tag{2.2}$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon E) = 0 \rightarrow E \cdot \nabla \varepsilon + \varepsilon (\nabla \cdot E) = 0 \tag{2.3}$$

$$\nabla \cdot (\mu H) = 0 \rightarrow H \cdot \nabla \mu + \mu (\nabla \cdot H) = 0 \tag{2.4}$$

Uma das soluções analíticas propostas para esse problema é obtida através de uma aproximação, pela manipulação das equações de Maxwell, considerando estruturas puramente dielétricas, onde a permeabilidade é sempre próxima à unidade [65], aplicando-se também o teorema de Bloch-Floquet para o meio periódico. Assim, tem-se(2.5 - 2.8):

$$\nabla \times E(r,t) + \mu_0 \frac{\partial H(r,t)}{\partial t} = 0 \tag{2.5}$$

$$\nabla \times H(r,t) - \varepsilon_0 \varepsilon(r) \cdot \frac{\partial E(r,t)}{\partial t} = 0 \tag{2.6}$$

$$\nabla \cdot [\varepsilon(r)E(r,t)] = 0 \tag{2.7}$$

$$\nabla \cdot H(r,t) = 0 \tag{2.8}$$

As equações de Maxwell na forma harmônica ficam (2.9 - 2.12):

$$\nabla \times E(r) + j\omega\mu_0 H(r) = 0 \tag{2.9}$$

$$\nabla \times H(r) - j\omega\varepsilon_0\varepsilon(r) \cdot E(r) = 0 \tag{2.10}$$

$$\nabla \cdot H(r) = 0 \tag{2.11}$$

$$\nabla \cdot [\varepsilon(r)E(r)] = 0 \tag{2.12}$$

Onde (2.13, 2.14):

$$D(r) = \varepsilon_0\varepsilon(r)E(r) \tag{2.13}$$

$$B(r) = \mu_0\mu(r)H(r) \tag{2.14}$$

Para efetuar o desacoplamento das equações, de modo a se obter apenas equações em função de *E* ou *H*, utiliza-se o seguinte procedimento:

- divide-se a Eq. 2.10 por $\varepsilon(r)$ e aplica-se o rotacional;
- utiliza-se a equação Eq. 2.9 para eliminar-se *E*;
- pode-se combinar as constantes ε_0 e μ_0 para compor a expressão da velocidade da luz no vácuo ($c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$).

Dessa maneira, obtém-se uma equação em função de H(r) (2.15):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)}\nabla \times H(r)\right) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \cdot H(r) \tag{2.15}$$

A Eq. 2.15 é chamada de equação mestra [65], a partir da qual são realizadas todas as análises aplicadas às estruturas periódicas. Para uma dada estrutura $\varepsilon(r)$, soluciona-se a Eq. 2.15 para determinar os modos de $H(r)$ e as frequências correspondentes, sujeitos às condições de polarização. Utiliza-se a Eq. 2.12 para obter $E(r)$ (2.16):

$$E(r) = \frac{j}{\omega\varepsilon_0\varepsilon(r)}\nabla\times H(r) \tag{2.16}$$

Esse procedimento garante que E(r) satisfaça o requisito de transversalidade ($\nabla\cdot\varepsilon E = 0$). Também é possível obter-se H(r) de E(r) da Eq. 2.11:

$$H(r) = \frac{j}{\omega\mu_0}\nabla\times E(r) \tag{2.17}$$

É importante notar que a permissividade é dada em termos de um tensor $\varepsilon(r)$, que é o fator determinante para a análise do fenômeno de banda proibida nas estruturas dielétricas. Pode-se, então, utilizando Teorema de Bloch-Floquet, considerar um comportamento para o meio onde:

$$\varepsilon(r) = \varepsilon(r+R) \tag{2.18}$$

onde R é uma combinação linear dos vetores primitivos de $\varepsilon(r)$. O fator R pode ser substituído pela periodicidade a, por exemplo. Pode-se expandir a expressão para $\varepsilon(r)$ (2.18) aplicando-se a transformada de Fourier [66], o que resulta numa expressão que relaciona a periodicidade a e a onda propagante no interior da estrutura periódica.

Outra análise que pode ser realizada, apesar de mais complexa, é a determinação do efeito do espalhamento em geometrias dielétricas cilíndricas e todas suas iterações [67]. O processo inicialmente é aplicado para um cilindro, com análise bi e tri-dimensional, para posterior expansão para análise multi-estrutural (vários cilindros), também em duas e três dimensões.

Um outro método, denominado *Método de Ondas Planas (PW – Plane Wave Method)* [31], é utilizado para calcular a relação de dispersão e a banda de estruturas de cristais fotônicos e estruturas periódicas perfeitas, considerando-os como sistemas infinitos. A relação de dispersão é determinada transformando-se o cálculo em um problema de auto-valores, com as respectivas auto-freqüências $\omega(k)$ associadas a cada vetor de onda k.

De uma forma geral, os métodos analíticos que descrevem o comportamento de estruturas periódicas são complexos, envolvendo recursos avançados de cálculo e até mesmo a necessidade do emprego de códigos computacionais. Isso, de certa forma, não constitui como uma praticidade para o pesquisador experimental, uma vez que os métodos tomam tempo em sua elaboração e solução. Também, os métodos tradicionais tornam-se pouco acessíveis ao iniciante na área de eletromagnetismo, uma vez que demandam conhecimento avançado sobre o assunto. Os métodos abordados até aqui são de extrema importância, principalmente para a investigação científica profunda sobre os metamateriais.

O método descrito a seguir é a proposta de uma ferramenta de apoio para o projeto de grades metamateriais, o qual permita a construção de estruturas que atendam aos requisitos eletromagnéticos desejados, dentro de uma aceitável precisão. Esse método, por ser experimental, apresenta algumas limitações (as quais serão devidamente comentadas), porém, condizentes com a situação real prática. Outra característica é ser uma ferramenta de acesso simples e ágil, quando do projeto de estruturas metamateriais.

2.2 Metodologia Experimental de Projeto

O equacionamento analítico para a determinação de parâmetros de estruturas metamateriais em muitas vezes é complexo e nem sempre possível. A presente proposta traz uma metodologia de projeto baseada em um amplo estudo numérico computacional, procurando estabelecer o comportamento de várias estruturas metamateriais sob determinadas condições de geometria, material e excitação.

Já existem códigos de análise numérica elaborados em técnicas diversas tais como o FDTD ("Finite-Difference Time Domain"), FEM ("Finite Element Method"), MoM ("Method of Moments") etc. Também existem no mercado programas que operam a partir de uma combinação de vários métodos numéricos, possibilitando não somente a realização de diversos tipos de análises numéricas em problemas eletromagnéticos, como também proporcionando uma excelente interface entre usuário e computador. O programa **CST Microwave Studio®** é um excelente exemplo desse tipo de ferramenta, oferecendo ao usuário uma interface gráfica ao mesmo tempo poderosa e muito simples de se operar, além de vários módulos de solução numérica. O CST tem sido utilizado em diversos trabalhos científicos e tecnológicos, inclusive no DMO, apresentando resultados bastante precisos em relação às condições reais.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta, foram adotados, inicialmente, os seguintes parâmetros a serem estudados:

- Frequências da banda proibida (inicial e final);
- Largura da banda;
- Profundidade (atenuação) da banda proibida;
- Influência da geometria das grades;
- Influência do material.

Dessa forma, o principal objetivo desse estudo focou, através de uma ampla análise das influências tanto do fator geométrico (r/a), como do fator material (ε_r), na obtenção de equacionamento simplificado, o qual permitisse com significativa precisão, a determinação das freqüências de ocorrência da banda proibida (inicial e final), além de outras informações tais como atenuação e largura da banda proibida. O equacionamento na forma aqui proposta não foi observado na literatura científica até o presente momento. Observa-se que o problema geralmente é tratado de forma isolada, apresentando o comportamento de estruturas dielétricas metamateriais em situações específicas, tanto para o fator geométrico (*r/a*) quanto para o fator material (ε_r).

O trabalho foi inicialmente dividido em duas partes:

1) Influência da geometria (*r/a*), onde ***r*** é o diâmetro e ***a*** é a distância entre centros.

2) Influência do material (ε_r)

O estudo foi realizado para estruturas dielétricas, principalmente considerando-se a utilização de materiais de baixo custo, cuja permissividade relativa varia entre 1.50 e 4.50. Além das estruturas dielétricas, também foi estudado o comportamento de grades metálicas construídas com materiais simples (ex.: alumínio). Para os dielétricos, as geometrias estudadas foram as seguintes:

- Tubos: as grades construídas com tubos aproximam-se muito aos cristais fotônicos constituídos por placas perfuradas ("*air holes*" - "buracos de ar");

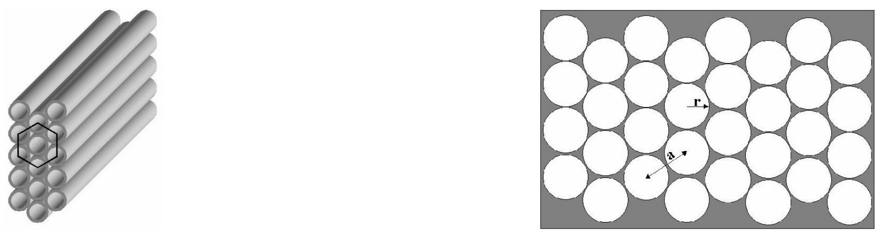


Fig. 2.1: Estruturas tubulares ("buracos de ar").

- Cilindros ("*rods*"): estruturas bastante difundidas na fabricação de cristais fotônicos e estruturas metamateriais;

Fig. 2.2: Estruturas cilíndricas ("*rods*")

Quanto à distribuição espacial dos elementos, foram estudados dois tipos: distribuição triangular e distribuição quadrada (Fig. 2.3 a 2.6):

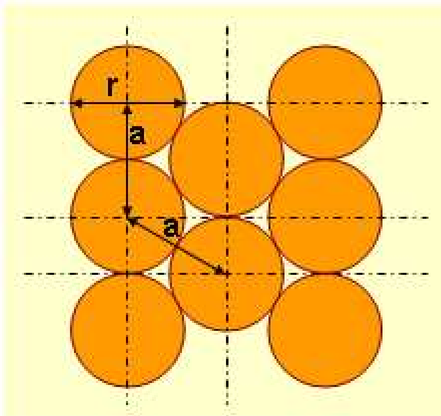


Fig. 2.3: Distribuição Triangular (TR) para cilindros

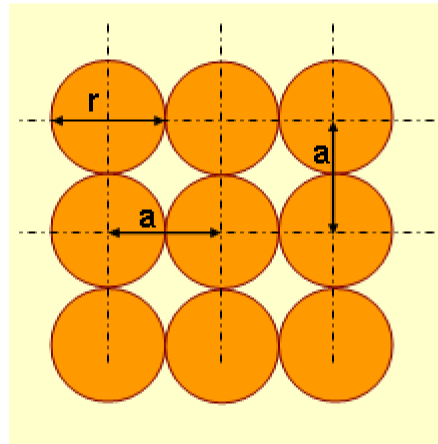


Fig. 2.4: Distribuição Quadrada (QD) para cilindros

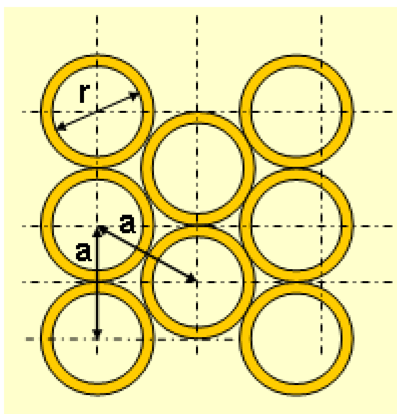


Fig. 2.5: Distribuição Triangular (TR) para tubos

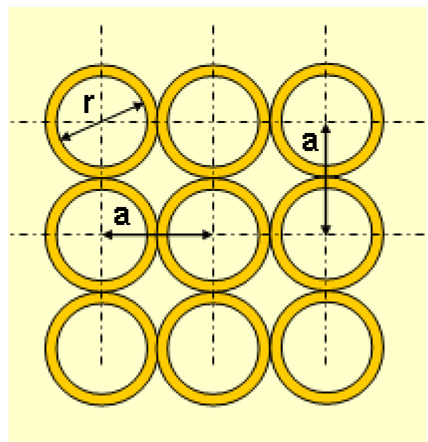


Fig. 2.6: Distribuição Quadrada (QD) para tubos

O estudo também foi efetuado para estruturas cilíndricas metálicas avaliando-se, nesse caso, apenas a influência da geometria (*r/a*). Os modelos computacionais foram submetidos a excitações de campo elétrico, tanto na polarização vertical (TM) como na polarização horizontal (TE), em relação à geometria das grades (Fig. 2.7).

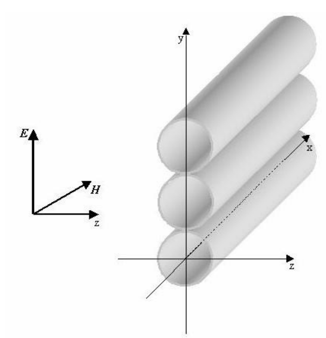


Fig. 2.7.a: Incidência modo TM

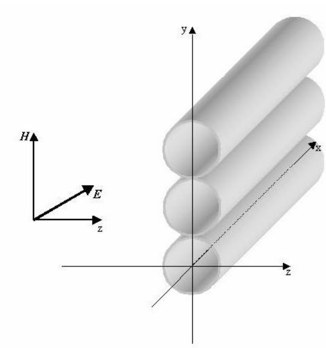


Fig. 2.7.b: Incidência modo TE

Um dos resultados obtidos pelo tratamento analítico das equações de Maxwell aplicando-se condições de contorno de estruturas periódicas, é a denominada *frequência do modo de propagação* ou *frequência de modo harmônico normalizada* para as estruturas, que está relacionada à dimensão física da periodicidade da estrutura (a) e o respectivo valor de um comprimento de onda que pode ser comportado nessa dimensão [65] e é dado pela relação:

$$k = \frac{\omega a}{2\pi c} \tag{2.19}$$

onde:

- ω – freqüência angular [rad/s];
- $\boldsymbol{a}$ – periodicidade da estrutura [m];
- $\boldsymbol{c}$ – velocidade da luz no vácuo [m/s];
- k - índice da frequência do modo em relação à periodicidade a [adimensional].

Da Eq. 2.19, pode-se obter uma expressão para a freqüência de ocorrência da banda proibida, associada à periodicidade da estrutura a. Essa frequência é dada em termos da relação (c/a), multiplicada pelo respectivo fator k_n, onde n pode indicar "inicial" ou "final" (Eq. 2.20):

$$f_n = k_n \cdot \frac{c}{a}, \text{ em [Hz].} \tag{2.20}$$

Para o presente trabalho, a relação (c/a) será identificada como ξ, de forma que a Eq. 2.20 fica:

$$f_n = k_n \cdot \xi \tag{2.21}$$

onde:

f_n - frequência onde "n" indica *inicial, final, intermediária* etc.;

k_n - fator relacionado à frequência "n";

Entretanto, o fator k_n é uma combinação de fatores que depende, no caso das grades dielétricas, dos fatores geométrico (r/a) e o material (ε_r) e é variável para cada situação de distribuição espacial (TR - Triangular, QD - Quadrada) e polarização (TE - Paralela, TM - Perpendicular). No caso dos metais exclui-se apenas o fator material pois, conforme será abordado oportunamente, a condutividade elétrica (σ) da maioria dos metais comuns não influencia nos resultados em frequência, podendo ser desconsiderado.

Para a análise da influência da geometria (r/a), utilizou-se um modelo de grade dielétrica no CST, para o qual se adotou como parâmetro variável o diâmetro interno dos tubos (d_i), mantendo-se fixo o diâmetro externo (d_e) e a permissividade relativa (ε_r) do material dos tubos.

No caso dos tubos, a distância entre centros (a) é determinada pelo seu diâmetro externo (d_e). Para a avaliação da influência do material, adotou-se um valor fixo para os diâmetros interno e externo do tubo, efetuando-se a variação da permissividade relativa (ε_r). Para as grades construídas com cilindros sólidos ("*rods*"), o parâmetro geométrico variável foi o diâmetro externo do cilindro (d_e). Os modelos adotados para as simulações no CST utilizaram uma estrutura com 21 (vinte e uma) camadas de elementos (tubos/cilindros).

As condições de contorno utilizadas no CST possibilitaram a simulação de excitação dos modelos por onda plana, polarizada paralela e perpendicularmente em relação ao eixo longitudinal dos elementos. Esse modelo é recomendado para a simulação de estruturas que apresentem periodicidade na direção de propagação da onda [68], pois utiliza apenas uma célula periódica representativa para toda a estrutura, otimizando o recurso computacional através de modelos mais leves e reduzidos. As demais células foram acrescentadas devido à relação entre o número de camadas da estrutura e a atenuação da banda proibida. Um exemplo de modelo utilizado para as simulações no CST é mostrado na Fig. 2.8.

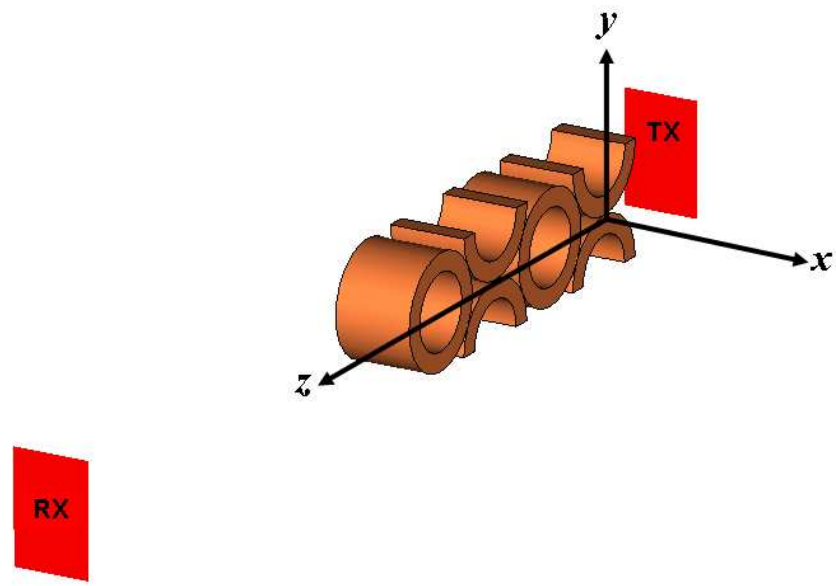


Fig. 2.8: Modelo adotado para as simulações no CST

Na figura, a porta de excitação está posicionada em z_{min}, sendo que a porta de recepção está posicionada em z_{max}, estando o campo elétrico polarizado verticalmente (em y). A Fig. 2.9 apresenta um detalhe da porta 1 (excitação). A propagação é realizada de z_{min} para z_{max}.

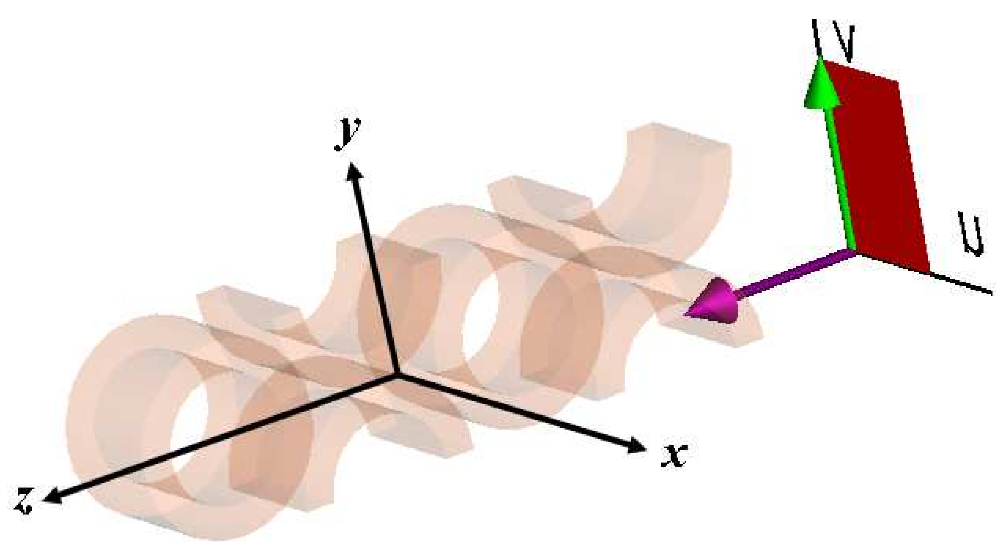


Fig. 2.9: Porta 1 – excitação. O campo elétrico aparece sobre o eixo y (em verde).

As condições de contorno aplicadas à estruturas são, respectivamente (para polarização perpendicular). Para a polarização paralela, as condições de contorno para as regiões $\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{min}/\max}$ e $\boldsymbol{y}_{\boldsymbol{min/max}}$ são invertidas, mantendo-se as mesmas para $z_{min/max}$.

- x_{min}, $x_{máx}$: parede magnética ($H_t = 0$), cujo campo magnético tangencial é nulo;
- y_{min}, $y_{máx}$: PEC (“*Perfect Electric Conductor*”) ou condutor perfeito, sobre o qual o campo elétrico tangencial é nulo ($E_t = 0$);
- z_{min}, $z_{máx}$: PML (“*Perfect Matching Layer*”) ou condição de campo aberto (“*open*”).

Os pontos de análise dos resultados foram selecionados da seguinte maneira:

- Freqüências inicial (*Fi*) e final (*Ff*) da banda proibida, em função da relação entre variação do diâmetro interno do tubo e distância entre centros (*r/a*);
- Variação da atenuação máxima na banda proibida, em função da relação geométrica (*r/a*).

Foram adotados três valores para a periodicidade (*a*), de 10, 15 e 20mm, com o intuito de se observar o comportamento eletromagnético das estruturas em relação à malha empregada no CST. Também, esse intervalo de ***a*** abrange uma importante faixa de frequências de micro-ondas, para as quais podem ser projetados interessantes dispositivos a partir das grades metamateriais. A malha adotada para todos os casos foi fixada em 25 células por comprimento de onda, o que se demonstrou ser mais do que suficiente para a estabilidade dos resultados. Adotou-se um número de passos para a variação dos parâmetros de simulação entre 16 e 17 (indicados nas tabelas a seguir como “pt.”), dependendo da situação. Dessa forma, foram realizados os seguintes conjuntos de simulações:

Tab. 2.1: Simulações para grades dielétricas para a = 10.00mm

	Arquivo	r (mm)	ε_r	Nº	Faixa (GHz)	Lt (mm)	ξ (GHz)
TR	tubos_tr_tm_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	tubos_tr_tm_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	tubos_tr_te_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	50	30.00
	tubos_tr_te_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	50	30.00
QD	tubos_qd_tm_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	tubos_qd_tm_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	tubos_qd_te_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	50	30.00

	tubos_qd_te_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	50	30.00
TR	cilindros_tr_tm_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	cilindros_tr_tm_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	cilindros_tr_te_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	50	30.00
	cilindros_tr_te_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	50	30.00
QD	cilindros_qd_tm_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	cilindros_qd_tm_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	10	30.00
	cilindros_qd_te_eps	8	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 30 GHz	50	30.00
	cilindros_qd_te_ra	1.0 – 9.0 (17 pt.)	3	21	1 – 30 GHz	50	30.00

r – diâmetro interno (tubo)/externo(cilindro); **TR** – distribuição triangular; **QD** – distribuição quadrada; **a** – distância entre centros; **Nº** - número de camadas de elementos; **Lt** – comprimento de cada elemento; **ξ** – (c/a)

Tab. 2.2: Simulações para grades dielétricas para a = 15.00mm

	Arquivo	r (mm)	ε_r	Nº	Faixa (GHz)	Lt (mm)	ξ (GHz)
TR	tubos_tr_tm_eps	12	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 20 GHz	10	20.00
	tubos_tr_tm_ra	2.0 – 14.0 (16	3	21	1 – 20 GHz	10	20.00
	tubos_tr_te_eps	12	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 20 GHz	50	20.00
	tubos_tr_te_ra	2.0 – 14.0 (16	3	21	1 – 20 GHz	50	20.00
QD	tubos_qd_tm_eps	12	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 20 GHz	10	20.00
	tubos_qd_tm_ra	2.0 – 14.0 (16	3	21	1 – 20 GHz	10	20.00
	tubos_qd_te_eps	12	1.5 – 4.5 (16 pt.)	21	1 – 20 GHz	50	20.00
	tubos_qd_te_ra	2.0 – 14.0 (16	3	21	1 – 20 GHz	50	20.00
TR	cilindros_tr_tm_eps	12	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 20 GHz	10	20.00
	cilindros_tr_tm_ra	2.0 - 14.0 (16 pt.)	3	21	1 - 20 GHz	10	20.00
	cilindros_tr_te_eps	12	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 20 GHz	50	20.00
	cilindros_tr_te_ra	2.0 - 14.0 (16 pt.)	3	21	1 - 20 GHz	50	20.00
QD	cilindros_qd_tm_eps	12	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 20 GHz	10	20.00
	cilindros_qd_tm_ra	2.0 - 14.0 (16 pt.)	3	21	1 - 20 GHz	10	20.00
	cilindros_qd_te_eps	12	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 20 GHz	50	20.00
	cilindros_qd_te_ra	2.0 - 14.0 (16 pt.)	3	21	1 - 20 GHz	50	20.00

r - diâmetro interno (tubo)/externo(cilindro); **TR** - distribuição triangular; **QD** - distribuição quadrada; **a** - distância entre centros; **Nº** - número de camadas de elementos; **Lt** - comprimento de cada elemento; **ξ** – (c/a)

Tab. 2.3: Simulações para grades dielétricas para a = 20.00mm

	Arquivo	r (mm)	ε_r	Nº	Faixa (GHz)	Lt (mm)	ξ (GHz)
TR	tubos_tr_tm_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	tubos_tr_tm_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	tubos_tr_te_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	50	15.00
	tubos_tr_te_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	50	15.00
QD	tubos_qd_tm_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	tubos_qd_tm_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	tubos_qd_te_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	50	15.00
	tubos_qd_te_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	50	15.00
TR	cilindros_tr_tm_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	cilindros_tr_tm_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	cilindros_tr_te_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	50	15.00
	cilindros_tr_te_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	50	15.00
QD	cilindros_qd_tm_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	cilindros_qd_tm_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	cilindros_qd_te_eps	16	1.5 - 4.5 (16 pt.)	21	1 - 15 GHz	50	15.00
	cilindros_qd_te_ra	2.0 - 18.0 (17 pt.)	3	21	1 - 15 GHz	50	15.00

r - diâmetro interno (tubo)/externo(cilindro); **TR** - distribuição triangular; **QD** - distribuição quadrada; **a** - distância entre centros; **Nº** - número de camadas de elementos; **Lt** - comprimento de cada elemento; **ξ** – (c/a)

Tab. 2.4: Simulações para grades metálicas (a = 20.00mm)

a (mm)	Arquivo	r (mm)	Nº	Faixa (GHz)	Lt (mm)	ξ (GHz)
10	metal_tr_tm	1.0 - 9.0 (17pts)	21	1 - 30 GHz	10	30.00
	metal_qd_tm	1.0 - 9.0 (17pts)	21	1 - 30 GHz	10	30.00
15	metal_tr_tm	2.0 - 14.0 (16 pts)	21	1 - 20 GHz	10	20.00
	metal_qd_tm	2.0 - 14.0 (16 pts)	21	1 - 20 GHz	10	20.00
20	metal_tr_tm	2.0 - 18.0 (17pts)	21	1 - 15 GHz	10	15.00
	metal_qd_tm	2.0 - 18.0 (17pts)	21	1 - 15 GHz	10	15.00
r - diâmetro interno (tubo)/externo(cilindro); **tr** - distribuição triangular; **qd** - distribuição quadrada; **a** - distância entre centros; **Nº** - número de camadas de elementos; **Lt** - comprimento de cada elemento; **ξ** – (c/a)						

Convenção:

- TR – distribuição espacial triangular;
- QD – distribuição espacial quadrada;
- TE – polarização transversal elétrica;
- TM – polarização transversal magnética;
- eps – variação de permissividade relativa (ε_r) com *r/a* fixo;
- ra – variação da geometria *r* (*di* para tubos; *de* para cilindros) com ε_r fixo;
- At – Atenuação ou profundidade máxima da banda proibida;
- ξ – (*c/a*).

As Fig. 2.10 e 2.11 a seguir apresentam o comportamento da relação (*r/a*) x *kFi* para a estrutura dielétrica tubular, distribuição quadrada, polarização TM, variação de *r/a*, para as três situações de *a*, como um exemplo da estabilidade proporcionada pelo modelo adotado no CST.

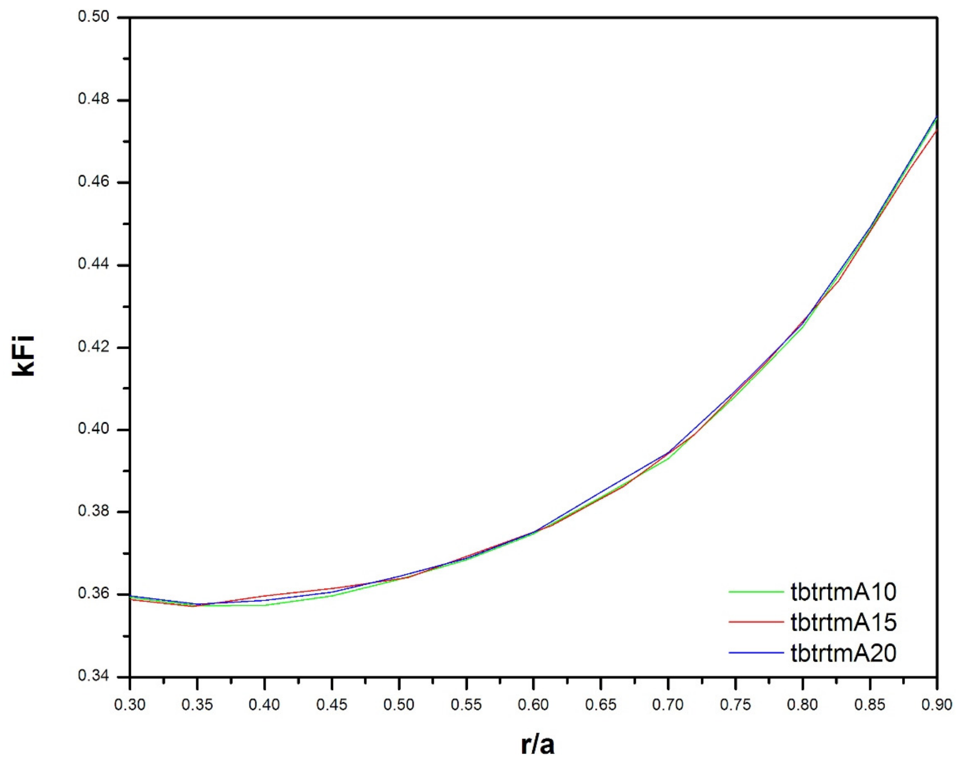


Fig. 2.10: Perfil de *r/a* x *kFi* para três valores de *a*.

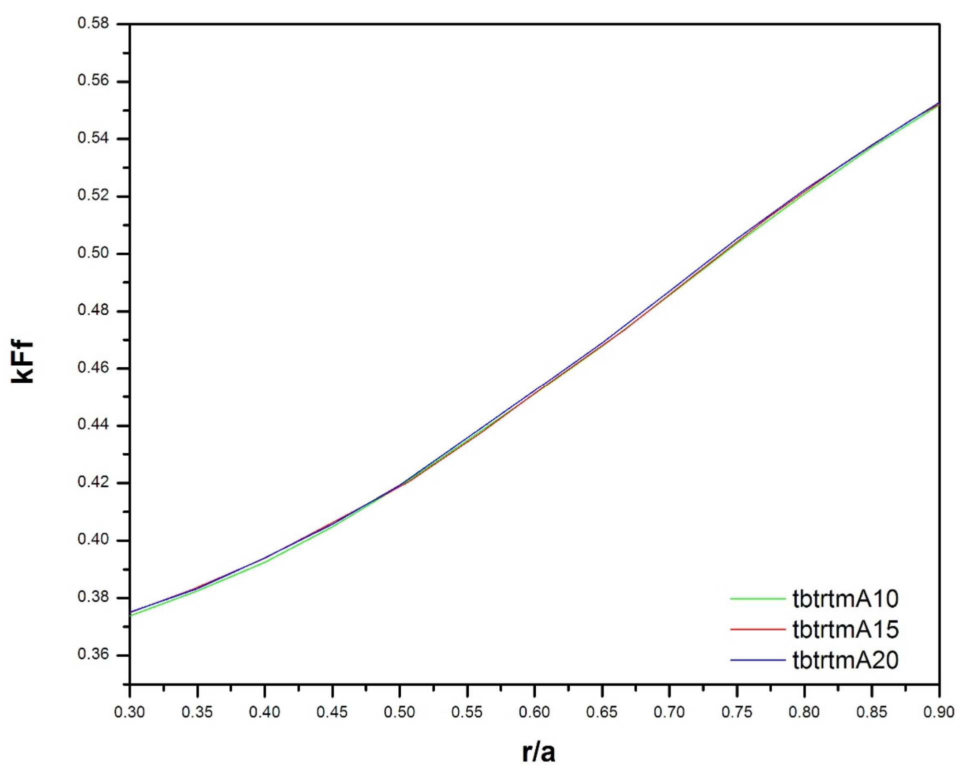


Fig. 2.11: Perfil de *r/a* x *kFf* para três valores de *a*.

Através das simulações, foi obtido um extenso conjunto de resultados, os quais possibilitaram uma análise detalhada do comportamento das grades em função da variação geométrica (*r/a*) e do material (ε_r). A partir destes dados, foram construídas curvas que demonstram o perfil de variação dos parâmetros *Frequência Inicial (Fi), Frequência Final (Ff), Largura de Banda Proibida (Lb)* e *Atenuação Máxima (At).* Os valores de *Fi* e *Ff* foram tomados do ponto de queda de 3.00 dB em relação ao sinal transmitido *S21* (Fig. 2.12).

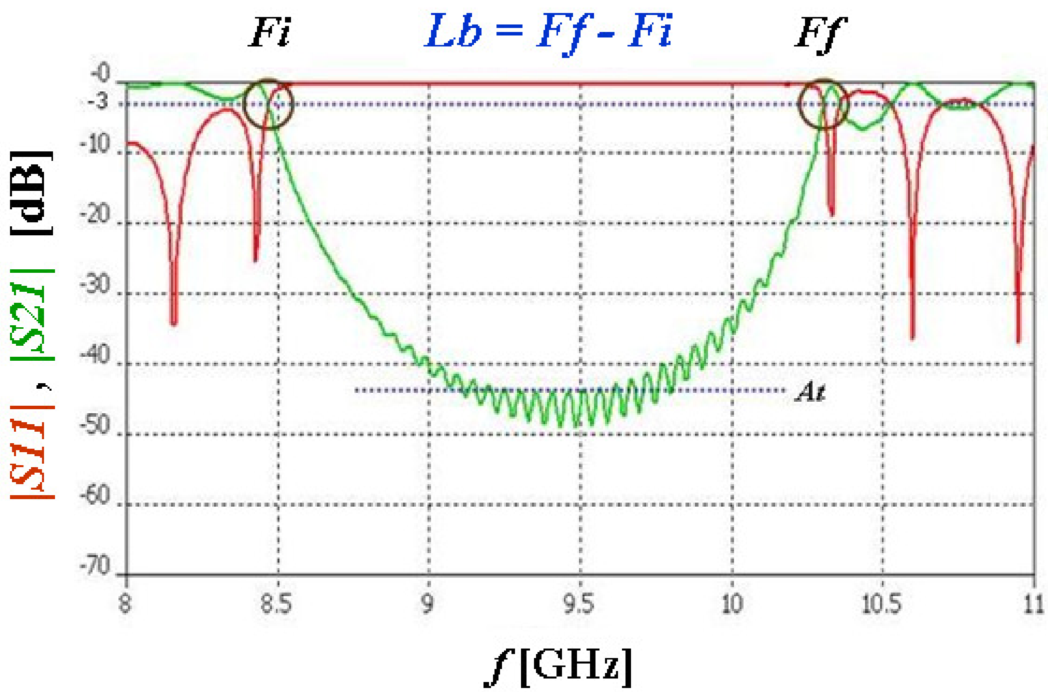


Fig. 2.12: Parâmetros estudados na banda proibida.

2.3 Análise das Simulações e Equacionamento Geral

Conforme exposto, os valores de *frequência* da banda proibida são referenciados a um valor de ξ (eq. 2.21) para cada estrutura, obtendo-se assim um fator multiplicador *k* para cada caso. As estruturas estudadas apresentaram comportamentos distintos para cada situação de polarização, material e distribuição geométrica.

Tomando-se como exemplo a estrutura dielétrica tubular, em distribuição triangular (TR), polarização TM, variação *r/a* (para ε_r fixo), podem-se observar os respectivos comportamentos das frequências *Fi* (Fig. 2.13), *Ff* (Fig. 2.14) e *Lb* (Fig. 2.15), além do perfil de atenuação máxima *At* (Fig. 2.16) para essa estrutura:

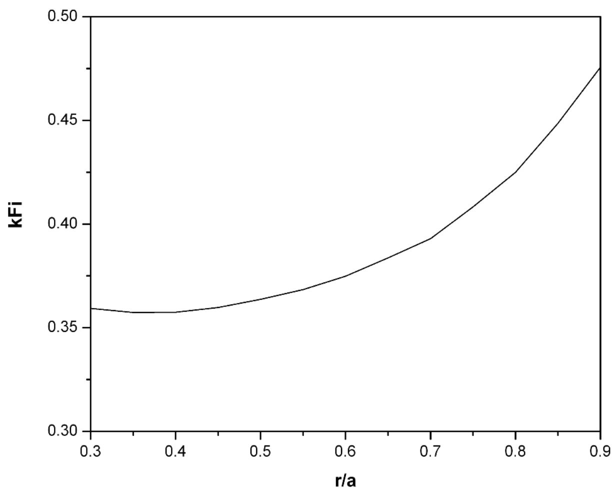


Fig. 2.13: tubos_tr_tm_kFi

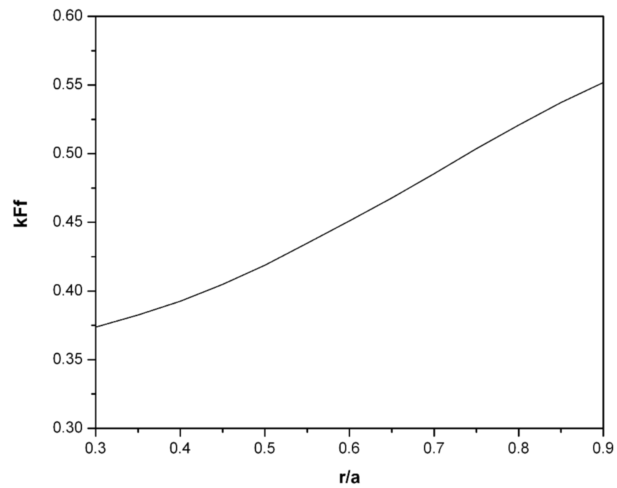


Fig. 2.14: tubos_tr_tm_kFf

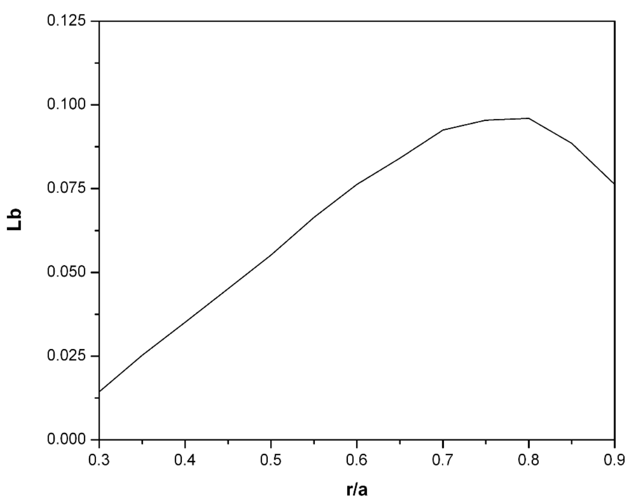


Fig. 2.15: tubos_tr_tm_Lb

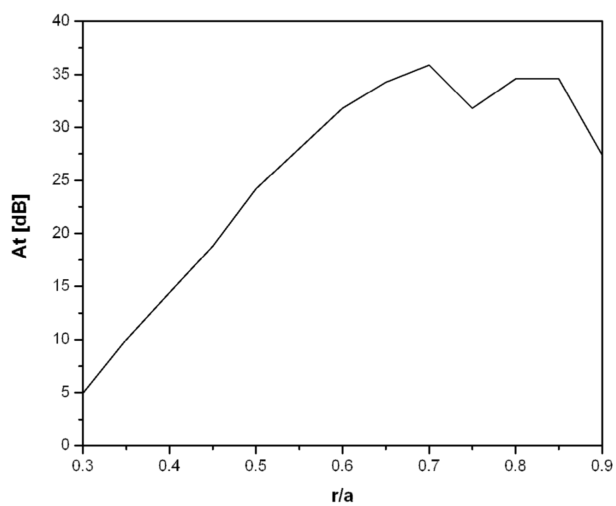


Fig. 2.16: tubos_tr_tm_At

As curvas mostradas nas Figs. 2.13 a 2.16 ilustram a influência da variação geométrica da estrutura, para uma permissividade relativa fixada em ε_r = 3.00. Para a avaliação da influência das características do material, efetuou-se a simulação fixando-se o valor de *r/a* = 0.80, e fazendo-se variar o valor de ε_r entre os valores 1.50 e 4.50. Da mesma forma que no caso anterior, foram obtidas curvas com os perfis de variação de *Fi, Ff, Lb* e *At*, agora em função da permissividade relativa do material. As respectivas curvas estão apresentadas nas Fig. 2.17 a 2.20:

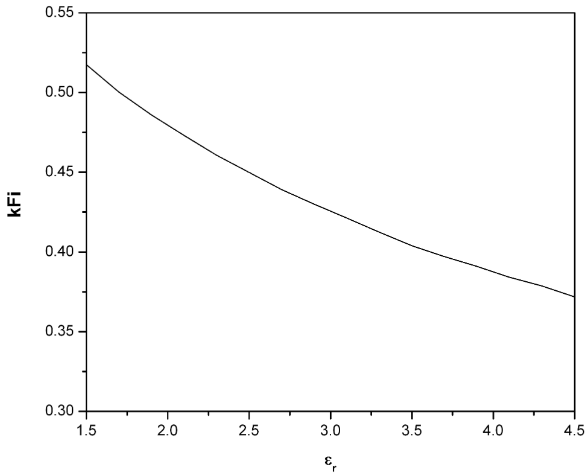


Fig. 2.17: tubos_tr_tm_kFi

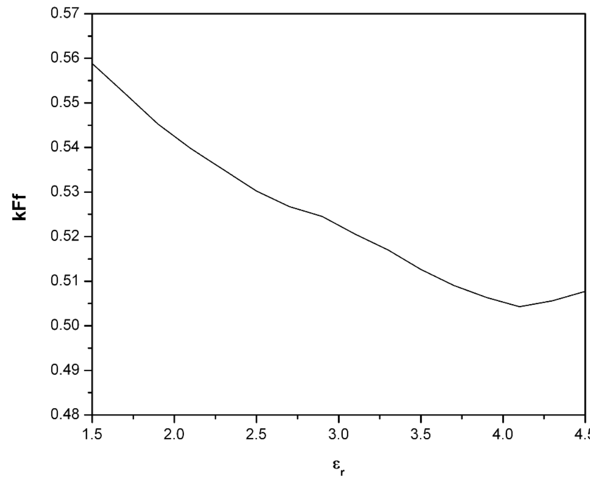


Fig. 2.18: tubos_tr_tm_kFf

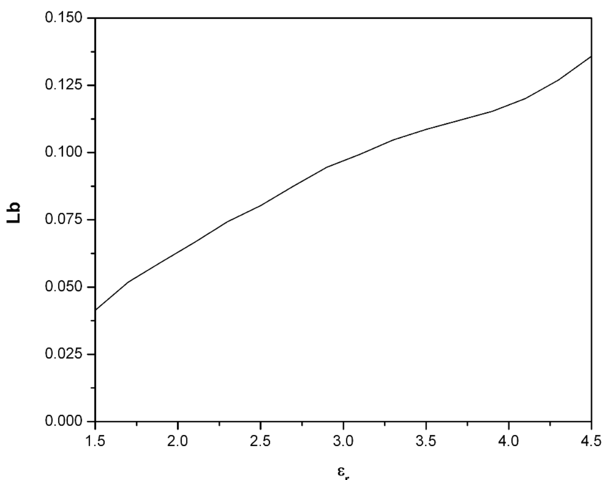


Fig. 2.19: tubos_tr_tm_Lb

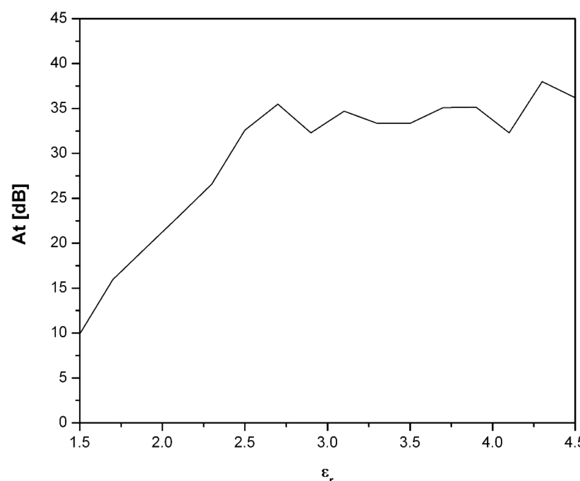


Fig. 2.20: tubos_tr_tm_At

Os valores referenciais para a simulação das estruturas foram adotados em função de que em r/a = 0.80, observaram-se as maiores larguras de banda proibida em praticamente todos os casos e, ε_r = 3.00 também ter se demonstrado como um valor intermediário no intervalo estudado de permissividades relativas.

O que se observa em uma primeira análise é que a banda proibida tende a se deslocar de forma ascendente em frequência, quando apenas se varia a relação r/a (Fig. 2.13 e 2.14). Já para o caso onde r/a é fixo, a variação de ε_r faz com que a banda proibida se desloque de maneira descendente em frequência (Fig. 2.17 e 2.18). Em ambos os casos, tanto a largura de banda proibida como sua atenuação máxima são também afetadas pelas variações de *r/a* e ε_r. No caso apresentado como exemplo, o aumento de ε_r tende a promover maiores valores de atenuação da banda enquanto que a variação *r/a* apresenta um pico de atenuação e passa a decrescer quando a relação tende à unidade ($r/a \cong 1.00$). É importante ressaltar que em todos os casos estudados (tanto para os dielétricos como para os metais), os limites que apresentam maior incerteza estão relacionados à proximidade das extremidades inferior e superior de faixa para cada grandeza (*r/a* e ε_r). Em alguns casos, somente se consegue obter resultados significativos a partir de um valor um pouco mais distante das extremidades da faixa (como exemplo, dados significativos a partir de $r/a = 0.3$ em uma faixa $.10 < r/a < .90$). Todas as limitações sobre os resultados serão discutidos à frente, de forma integral e detalhada para cada caso.

Considerando-se que o comportamento da banda proibida é afetado, de forma estrutural, pela geometria (*r/a*) e pelas características do material (ε_r), ficou evidente que, para a concepção de uma metodologia de projeto para as grades seria necessário primeiramente estabelecer uma relação entre esses dois fatores, além da aplicação dessa relação para todos os casos possíveis dentro do conjunto de estruturas estudadas. No caso, estabelecer a relação *r/a* e ε_r para tubos e cilindros, nas polarizações TM e TE, e distribuições TR e QD.

Tomando-se ξ (Eq. 2.20) como valor de referência para uma determinada estrutura, podem-se obter expressões gerais para o cálculo das freqüências iniciais e finais de banda proibida, em função da distribuição espacial geométrica (*r/a*) e do material dielétrico (ε_r).

O processo tem como partida as curvas obtidas para as variações de F_i e F_f em função de (*r/a*) e de (ε_r). Inicialmente, obtêm-se as curvas normalizadas em função ξ. A partir das curvas normalizadas em ξ, efetuou-se a combinação entre as curvas para freqüência inicial (*Fi*), freqüência final (*Ff*), e suas variações em função da relação geométrica (*r/a*) e do material dielétrico das estruturas (ε_r), considerando-se este último como material puramente real e sem perdas significativas. Esse modelo de material mostrou-se bastante adequado ao problema estudado, uma vez que um dos objetivos era a utilização de materiais simples, de fácil obtenção e de baixo custo.

Como mostrado na Eq. 2.21, o fator proporcional k_n deve ser uma relação entre *r/a* e ε_r. Essa relação foi estabelecida fixando-se a variação geométrica $r/a = 0.80$, e observando-se a variação percentual das grandezas *kFi, kFf, Lb* e *At* em função da variação de ε_r. Dessa maneira, o fator k_n passou a ser composto por dois outros fatores, ou seja:

$$kn = kn(r/a) \cdot kn(\varepsilon r) \tag{2.22}$$

onde:

- *n – Fi, Ff, Lb, At.*
- *kn(r/a)* – fator geométrico
- *kn(ε_r)* – fator de deslocamento percentual em função da variação da permissividade

As expressões foram obtidas através de interpolações polinomiais das curvas geradas nas simulações do CST. Através de polinômios de quarto grau foram obtidos resultados muito satisfatórios para a descrição do comportamento em todas as curvas geradas por simulação. Exemplos desses resultados podem ser observados a seguir, na variação do fator de *frequência inicial* (*kFi*) para a estrutura de tubos, distribuição triangular, polarização TM, na Fig. 2.21 para o caso de variação de *r/a* (permissividade fixada em ε_r = 3.00) e na Fig. 2.22, para o caso de variação de ε_r (fator geométrico fixo em *r/a* = 0.80).

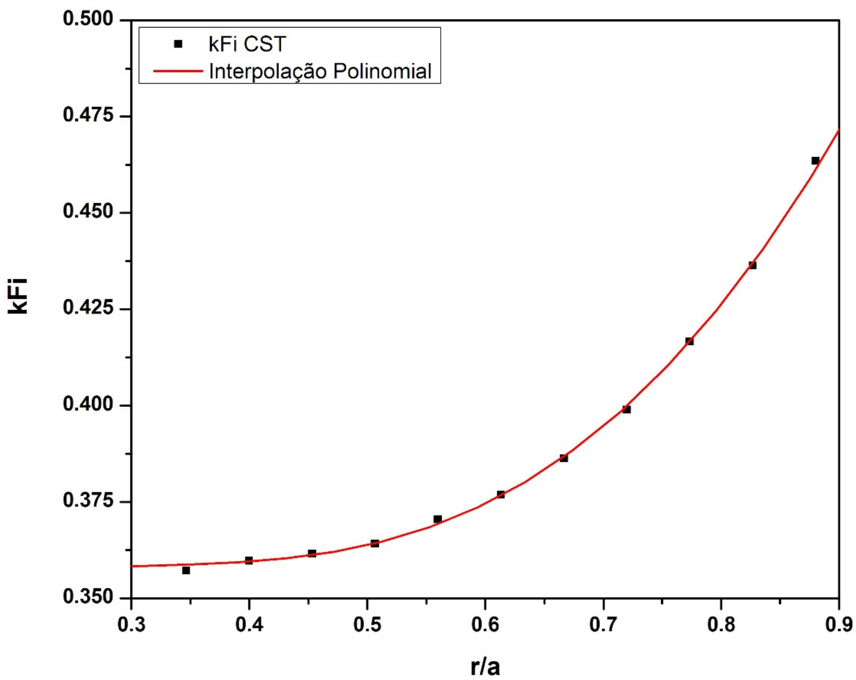


Fig. 2.21: tubos_tr_tm_ra_kFi

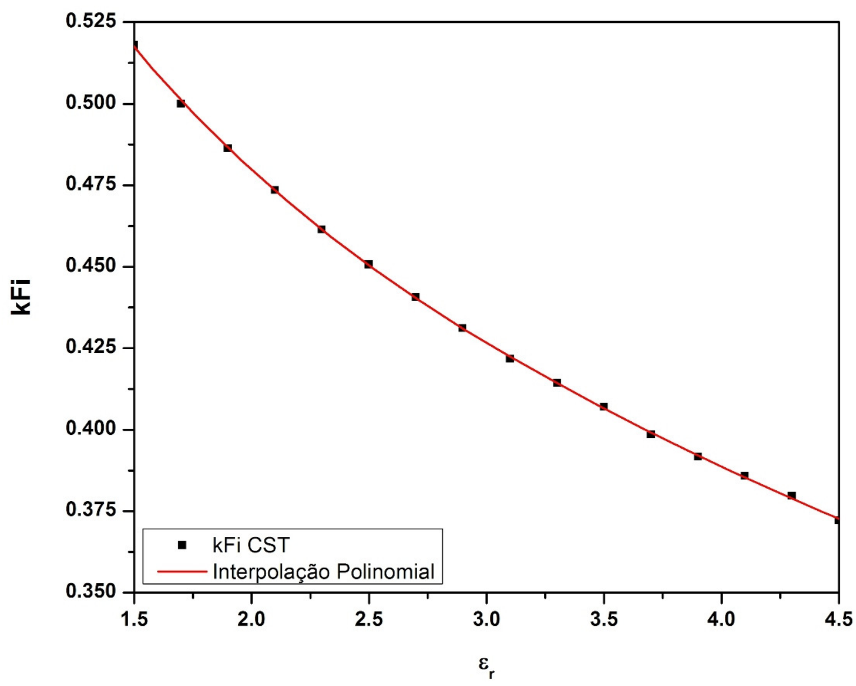


Fig. 2.22: tubos_tr_tm_eps_kFi

Os polinômios que descrevem as curvas das Fig. 2.21 e 2.22 são, respectivamente:

$$kFi(r/a) = 0.33214 + 0.2385(r/a) - 0.76721(r/a)^2 + 0.93939(r/a)^3 - 0.21152(r/a)^4 \qquad (2.23)$$

$$kFi(\varepsilon_r) = 0.7187 - 0.19758(\varepsilon_r) + 0.05323(\varepsilon_r)^2 - 0.00808(\varepsilon_r)^3 + 4.9189E\text{-}4(\varepsilon_r)^4 \qquad (2.24)$$

Seguindo e exemplo acima, foram obtidas expressões polinomiais para todas as situações estudadas através de simulações com o CST. Em todas as situações, o comportamento regular das curvas possibilitou uma aproximação polinomial extremamente precisa ($E < 0.3\%$), fato este que proporcionou maior confiança na concepção do método de projeto em questão.

Além de elementos de frequência, a profundidade ou atenuação da banda proibida é influenciada pela combinação *fator geométrico* (r/a) e material (ε_r), como se observa nas Fig. 2.23 e 2.24 abaixo (condição: tubos – TR – TM).

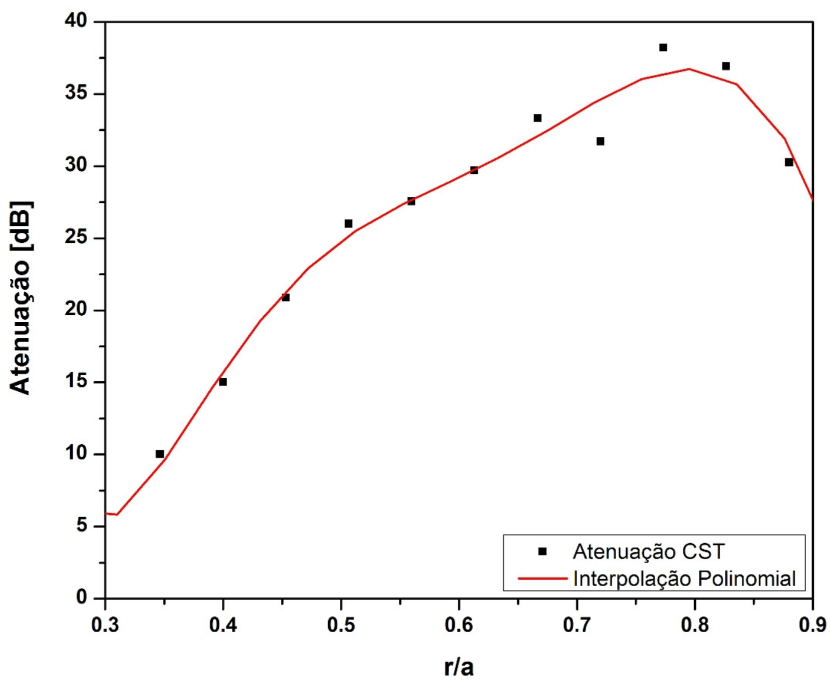


Fig. 2.23: tubos_tr_tm_ra_At

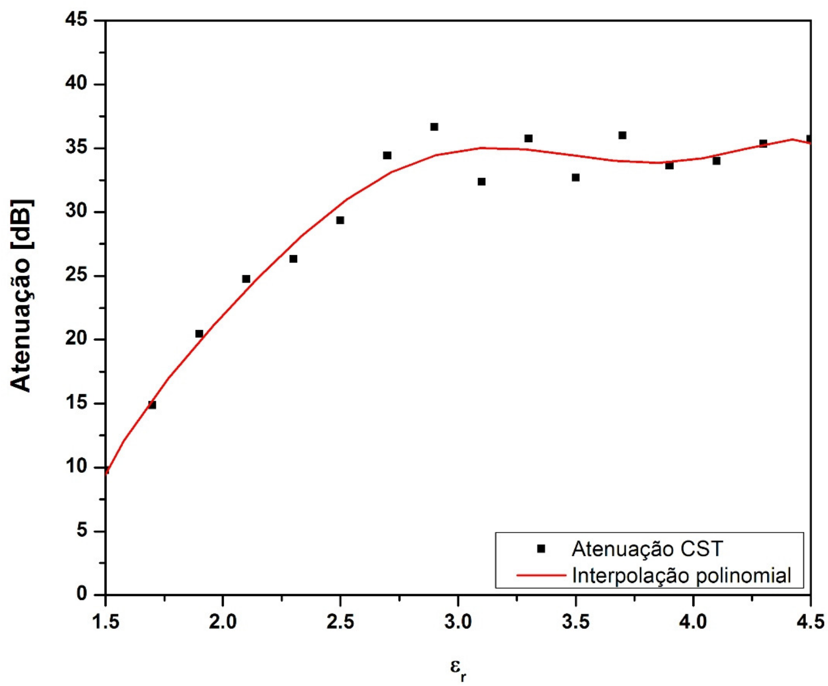


Fig. 2.24: tubos_tr_tm_eps_At

Para a obtenção de expressões que relacionassem tanto a influência do fator geométrico (*r/a*) como do fator material (ε_r), adotou-se o seguinte procedimento, baseado nas simulações CST:

- toma-se como base a curva da variação de parâmetros (*kFi, kFf, At*) em função da geometria;
- extrai-se o fator correspondente de cada situação (*kFi, kFf, At*) para o valor *r/a* = 0.80;
- divide-se a curva correspondente da variação de parâmetros (*kFi, kFf, At*) em função do material (ε_r) pelo valor obtido em *r/a* = 0.80. Os valores obtidos nessa operação indicam a variação percentual do parâmetro (*kFi, kFf, At*), o qual deve ser aplicado novamente na curva de variação geométrica (*r/a*), para cada caso de (ε_r).

Um exemplo dessa cálculo é mostrado na Tab. 2.5 a seguir:

Tab. 2.5: Relação entre a variação de *r/a* e ε_r sobre um determinado parâmetro da banda proibida

cilindro_qd_te_At											
Curvas CST					ε_r						
EPS	*At eps*	*r/a*	*At r/a*	*% eps / (r/a)*	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
1.5000	17.2196	0.1000	-	0.5163	-	-	-	-	-	-	-
1.6875	20.7140	0.1500	5.4690	0.6211	-	4.1494	5.0600	5.8054	6.3643	6.4436	5.4783
1.8750	23.6163	0.2000	14.4945	0.7081	7.4835	10.9969	13.4103	15.3859	16.8672	17.0774	14.5191
2.0625	26.0891	0.2500	21.4566	0.7823	11.0781	16.2791	19.8517	22.7762	24.9691	25.2802	21.4931
2.2500	28.2620	0.3000	26.7055	0.8474	13.7880	20.2614	24.7079	28.3478	31.0771	31.4644	26.7509
2.4375	30.2320	0.3500	30.5508	0.9065	15.7734	23.1789	28.2656	32.4297	35.5520	35.9950	30.6028
2.6250	32.0631	0.4000	33.2627	0.9614	17.1736	25.2364	30.7747	35.3084	38.7079	39.1902	33.3193
2.8125	33.7867	0.4500	35.0711	1.0131	18.1072	26.6084	32.4478	37.2280	40.8122	41.3208	35.1307
3.0000	35.4014	0.5000	36.1659	1.0615	18.6725	27.4391	33.4607	38.3901	42.0863	42.6107	36.2274
3.1875	36.8729	0.5500	36.6971	1.1056	18.9467	27.8421	33.9522	38.9540	42.7044	43.2366	36.7595
3.3750	38.1343	0.6000	36.7748	1.1434	18.9868	27.9010	34.0240	39.0364	42.7948	43.3280	36.8373
3.5625	39.0858	0.6500	36.4689	1.1720	18.8289	27.6689	33.7410	38.7117	42.4389	42.9676	36.5309
3.7500	39.5947	0.7000	35.8095	1.1872	18.4885	27.1687	33.1310	38.0118	41.6715	42.1908	35.8704
3.9375	39.4958	0.7500	34.7867	1.1843	17.9604	26.3927	32.1847	36.9261	40.4813	40.9857	34.8458
4.1250	38.5909	0.8000	33.3506	1.1571	17.2189	25.3031	30.8559	35.4016	38.8100	39.2936	33.4073
4.3125	36.6490	0.8500	31.4112	1.0989	16.2176	23.8316	29.0616	33.3429	36.5532	37.0086	31.4646
4.5000	33.4065	0.9000	28.8386	1.0017	14.8894	21.8799	26.6815	30.6122	33.5595	33.9777	28.8877

Na tabela, observa-se que para o valo de *r/a* = 0.80, o fator de atenuação resulta em *At* = 33.3506 dB. A curva *"%EPS / (r/a)"* é obtida pela divisão da curva "*At eps*" por esse fator. Da curva *"%EPS / (r/a)"*, obtêm-se os valores multiplicadores correspondentes a cada ε_r, os quais são multiplicados pela curva "*At r/a*" gerando todo um conjunto de dados que apresentam um parâmetro da banda proibida (no caso, a atenuação) em função da variação de *r/a* ε_r. Assim, são obtidas curvas para cada situação, as quais apresentam o comportamento da um parâmetro, em função da variação geométrica e material. Os gráficos mostrados nas Fig. 2.25, 2.26 e 2.27 são um exemplo desse tipo de resultado:

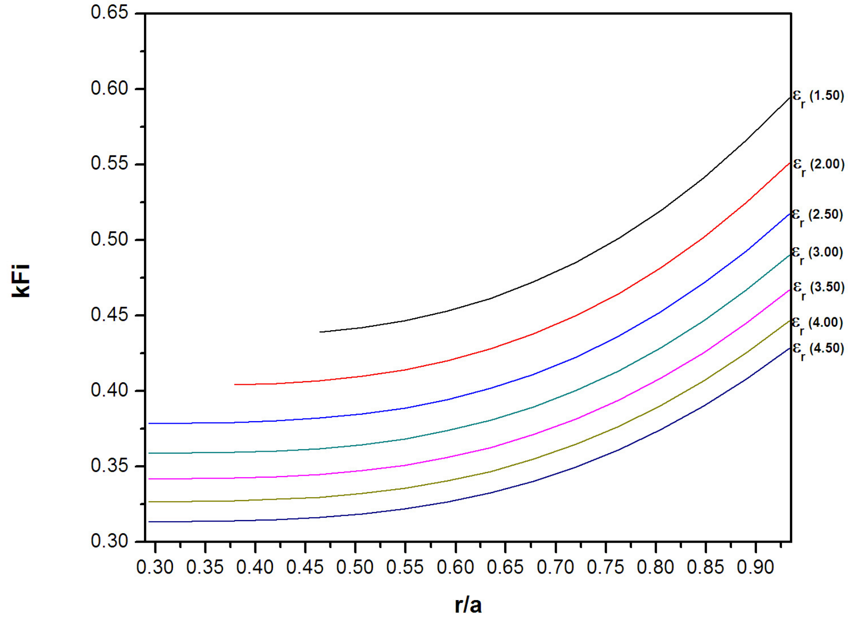


Fig. 2.25: Curva *r/a* x *kFi* para vários ε_r (tubo_TR_TM)

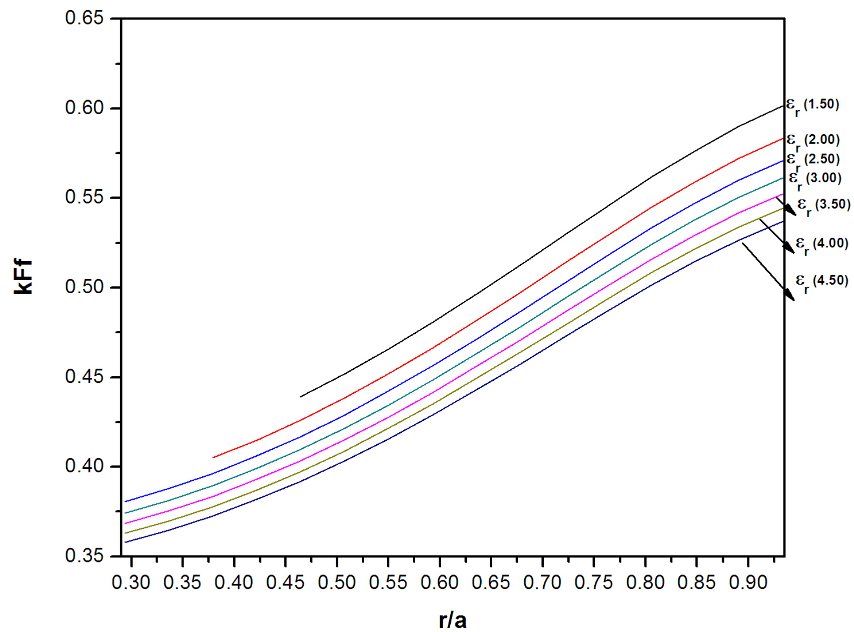


Fig. 2.26: Curva *r/a* x *kFf* para vários ε_r (tubo_TR_TM)

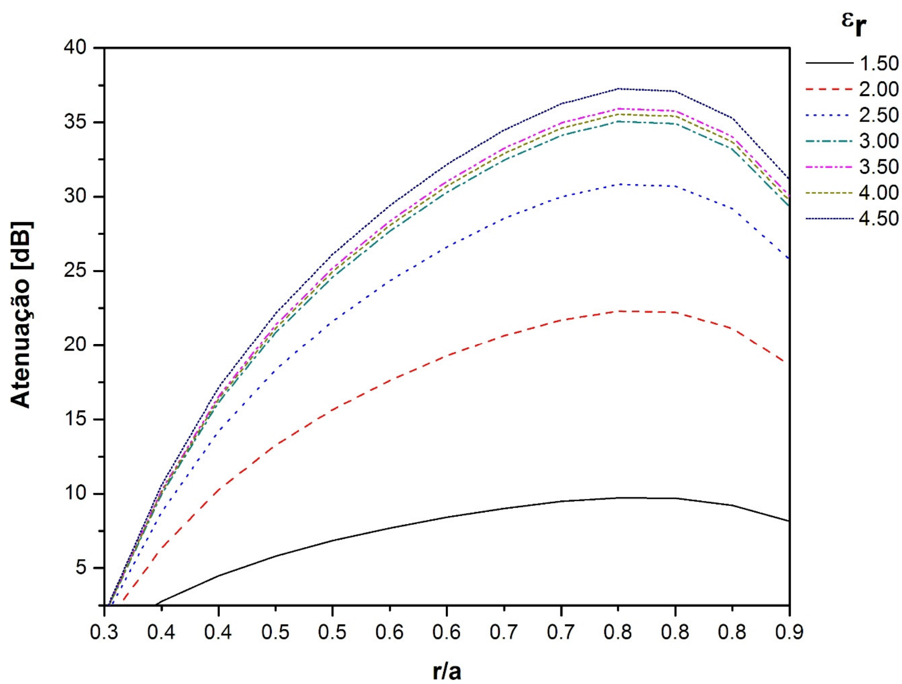


Fig. 2.27: Curva *r/a* x *At* para vários ε_r (tubo_TR_TM)

Portanto, partindo-se da Eq. 2.23 e 2.24, o equacionamento geral para a obtenção de um determinado parâmetro de frequência de banda proibida, em função de *r/a* e ε_r fica:

$$fn = kn(r/a) \cdot kn(\varepsilon r) \cdot \xi \qquad (2.25)$$

onde *kn(r/a)* e *kn(*ε_r*)* são expressões polinomiais de quarto grau. O tratamento matemático para a atenuação é realizado de forma semelhante:

$$At = kAt(r/a) \cdot kAt(\varepsilon r) \qquad (2.26)$$

onde:

- *At* – atenuação da banda proibida para uma determinada situação;
- *kAt(r/a)* – expressão polinomial para a variação da atenuação em função da geometria;
- *kAt(*ε_r*)* – expressão de variação percentual da atenuação em relação à variação das características do material dielétrico.

<u>Exemplo de aplicação</u>: deseja-se obter o valor de *frequência inicial* para a banda proibida, em uma estrutura composta por tubos, distribuição triangular, relação *r/a* = 0.72 e permissividade relativa de ε_r = 4.00. A Tab. 2.6 abaixo (Vide Anexo I), apresenta uma série de dados já calculados a partir dos polinômios próprios para a situação desejada. Com base nas informações acima, o fator de frequência inicial é *kFi* = 0.3648.

Tab. 2.6: Dados para *kFi* na situação tubos_tr_tm

TUBOS – TR – TM – kFi							
r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.2933	-	-	0.3785	0.3586	0.3417	0.3268	0.3134
0.3360	-	-	0.3789	0.3590	0.3420	0.3271	0.3137
0.3787	-	0.4041	0.3794	0.3595	0.3425	0.3276	0.3141
0.4213	-	0.4051	0.3804	0.3604	0.3434	0.3284	0.3150
0.4640	0.4389	0.4069	0.3821	0.3620	0.3450	0.3299	0.3164
0.5067	0.4420	0.4099	0.3849	0.3646	0.3474	0.3323	0.3187
0.5493	0.4467	0.4142	0.3889	0.3685	0.3511	0.3358	0.3220
0.5920	0.4531	0.4201	0.3945	0.3737	0.3561	0.3406	0.3266
0.6347	0.4615	0.4279	0.4018	0.3807	0.3627	0.3469	0.3327
0.6773	0.4722	0.4378	0.4111	0.3895	0.3711	0.3549	0.3404
0.7200	0.4853	0.4500	0.4225	0.4003	0.3814	**0.3648**	0.3499
0.7627	0.5011	0.4646	0.4363	0.4134	0.3939	0.3767	0.3612
0.8053	0.5198	0.4819	0.4525	0.4287	0.4085	0.3907	0.3747
0.8480	0.5414	0.5020	0.4714	0.4466	0.4255	0.4070	0.3903
0.8907	0.5662	0.5250	0.4929	0.4670	0.4450	0.4256	0.4082
0.9333	0.5942	0.5510	0.5173	0.4902	0.4670	0.4467	0.4284
Fórmulas:	kFi = 0.33214+0.2385(r/a)-0.76721(r/a)^2+0.93939(r/a)^3-0.21152(r/a)^4 kFi(%εr) =1.68538-0.46261(ε_r)+0.12438(ε_r)^2-0.01884(ε_r)^3+0.00114(ε_r)^4						

Para se obter a frequência inicial da referida banda proibida, deve-se multiplicar o valor de ξ correspondente à estrutura, pelo valor de *kFi* obtido na tabela. De acordo com a Eq. 2.20, ξ depende do valor da periodicidade da estrutura (*a*). Apenas como exemplo, para um valor de *a* = 15.00mm, tem-se:

$$fi = kFi \cdot \xi$$
$$fi = kFi(r/a) \cdot kFi(\varepsilon_r) \cdot \xi$$
$$fi = 0.3648 \cdot \frac{c}{a} = 0.3648 \cdot \frac{3\times10^8}{1.5\times10^{-2}}$$
$$\therefore\ fi \cong 7.30GHz$$

Procede-se da mesma forma para o cálculo da *frequência final* e da *atenuaçã*o da banda proibida, sendo que para esta última, não se utiliza o valor de ξ.

O ANEXO I apresenta na íntegra, as tabelas, gráficos e expressões polinomiais de parâmetros de frequência para todos os casos estudados, incluindo os metais. No ANEXO II são apresentados todos os dados para determinação da atenuação da banda proibida para os referidos casos. A validade das expressões é indicada pelas tabelas em cada caso, pois os intervalos ou posições não-válidos são representados por um traço, sem um valor correspondente. Para a determinação de valores intermediários aos mostrados nas tabelas, utilizam-se as expressões polinomiais correspondentes a cada caso e disponíveis nas referidas tabelas, aplicando-se a metodologia citada.

2.4 Comportamento Geral das Grades

As simulações realizadas com o CST permitiram o levantamento do comportamento geral, tanto em frequência como amplitude (atenuação), para os vários tipos de grades estudados. Esses resultados são importantes principalmente para a seleção de uma estrutura adequada a uma determinada necessidade. Dois pontos importantes em uma banda proibida são a sua largura de banda (*Lb*) e a profundidade ou atenuação (*At*), dependendo do tipo de aplicação. O gráfico mostrado na Fig. 2.28 apresenta o comportamento para a largura de banda obtida em cada um das situações estudadas.

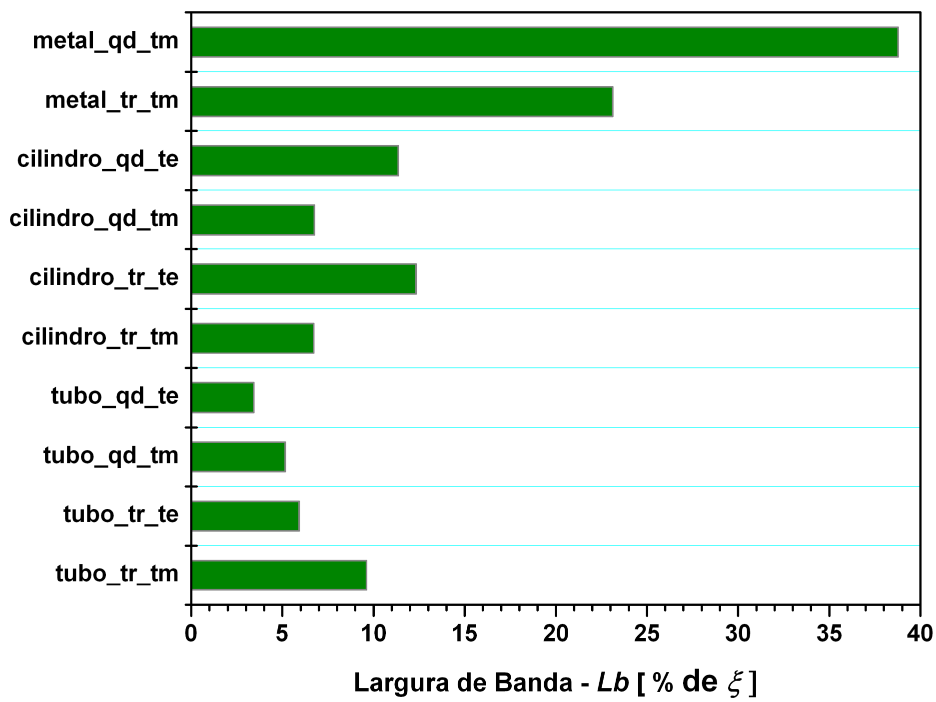


Fig. 2.28: Largura de banda proibida para as diversas estruturas estudadas

O gráfico mostrado na Fig. 2.29 apresenta o comportamento das estruturas em relação à atenuação máxima da banda proibida.

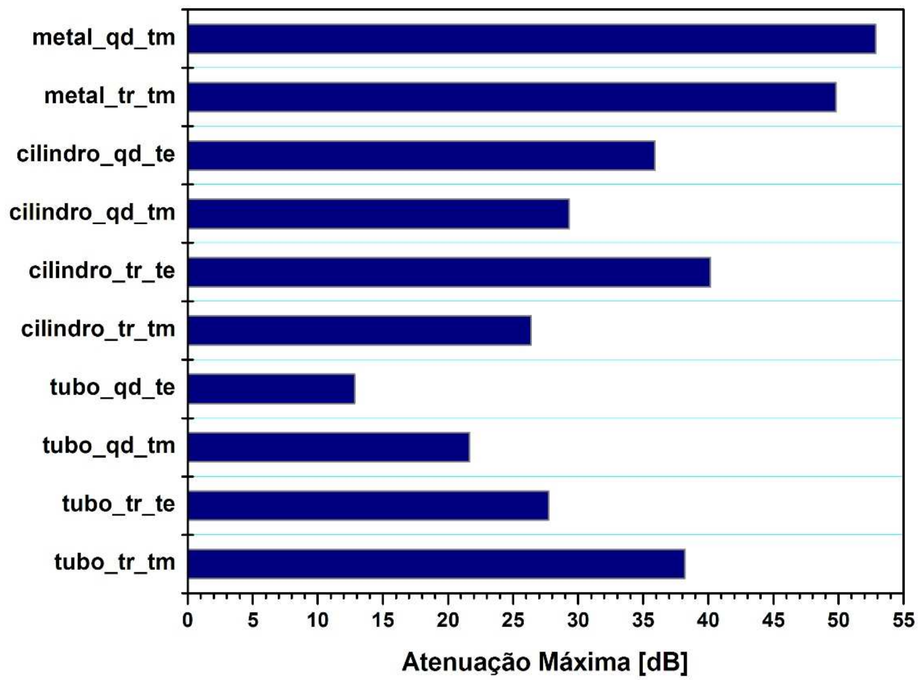


Fig. 2.29: Atenuação máxima de banda proibida para as diversas estruturas estudadas

No caso das estruturas dielétricas, tomando-se como referência os valores máximos para atenuação e largura de banda, a estrutura que melhor representa esta situação é a cilíndrica, na polarização triangular e polarização TE (cilindro_TR_TE). Já para as estruturas metálicas, o melhor desempenho é demonstrado pela situação QD_TM (lembrando que todas as estruturas metálicas estudadas são cilíndricas). Por sua vez, a estrutura de menor desempenho quanto à largura de banda e atenuação máxima é a cilíndrica QD_TE.

Conforme já comentado, as estruturas estudadas foram modeladas considerando-se materiais simples, puramente dielétricos ou condutores, sem perdas significativas. Em uma exploração da influência da condutividade elétrica (σ) sobre o comportamento das grades metálicas, observa-se que, mesmo para uma variação significativa desse parâmetro, não há alterações importantes sobre a banda proibida. O gráfico da Fig. 2.30 apresenta o referido teste para três situações ($\sigma = 10^7$; $5x10^7$ e $9x10^7$), para a situação de uma estrutura cilíndrica, distribuição triangular, polarização TM, com relação geométrica *r/a* = 0.80, sendo que o parâmetro condutividade elétrica (σ) foi variado numa faixa de 10^7 S/m a 10^6 S/m

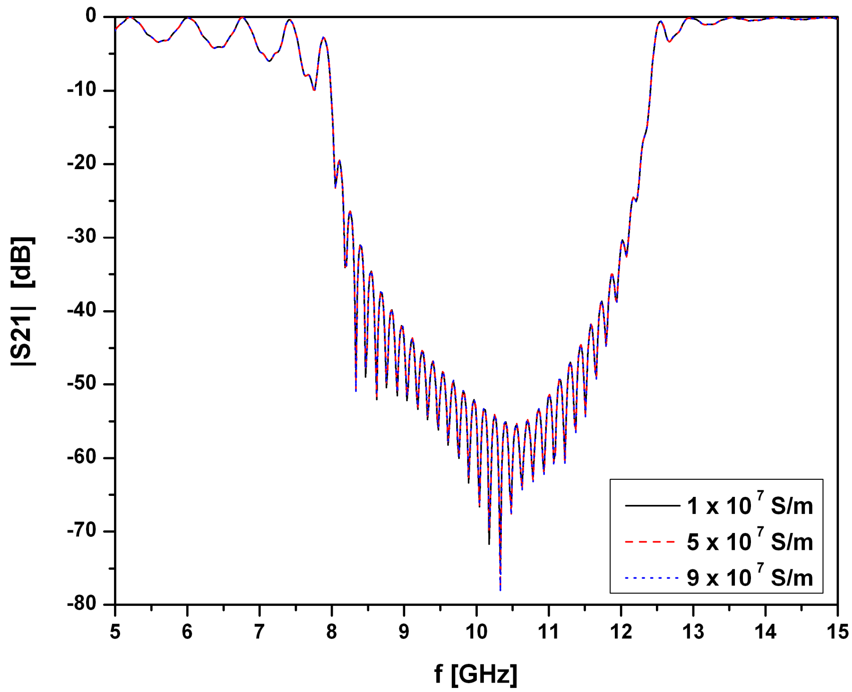


Fig. 2.30: Influência da condutividade elétrica sobre a banda proibida

A variação das perdas no dielétrico (tangente de perdas) provoca, como esperado, uma variação na atenuação geral do sinal. O gráfico da Fig. 2.31 mostra um exemplo para uma faixa bastante severa de variação da tangente de perdas e os efeitos sobre a banda proibida.

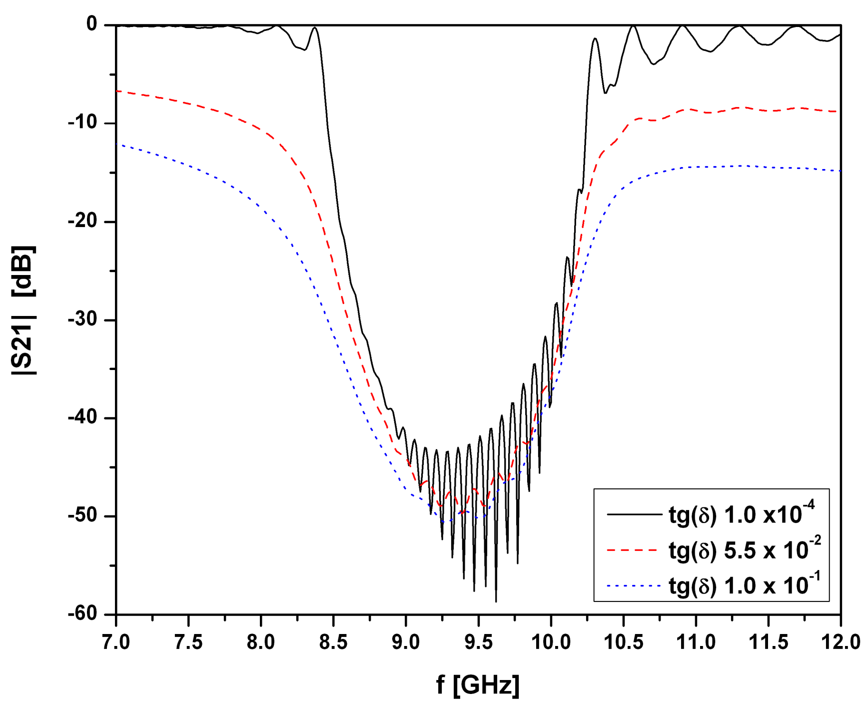


Fig. 2.31: Perdas no dielétrico

Porém, deve-se considerar que as perdas apresentadas na Fig. 2.31 são em função de uma variação bastante ampla da tangente de perdas do material (da ordem de 10^{-4} a 10^{-1}). A maioria dos materiais dielétricos de baixo custo enquadram-se perfeitamente em tangentes de perdas da ordem de 10^{-3} [69]. Dentro da faixa estudada, os principais pontos a serem observados são a atenuação do sinal de referência, fator este que reduz a relação a profundidade da banda proibida. Em relação à frequência, percebe-se que com o aumento nas perdas, há uma sensível alteração na largura da banda proibida, porém, há a desvantagem da redução da atenuação da banda.

Quanto ao comportamento físico do campo elétrico, observa-se que, para a região da banda proibida, a estrutura periódica se comporta como uma superfície totalmente refletora, também denominada "espelho de microondas" [70]. O gráfico da Fig. 2.32 apresenta este efeito, mostrando que, na banda proibida, o sinal refletido (S11) é máximo em toda sua extensão.

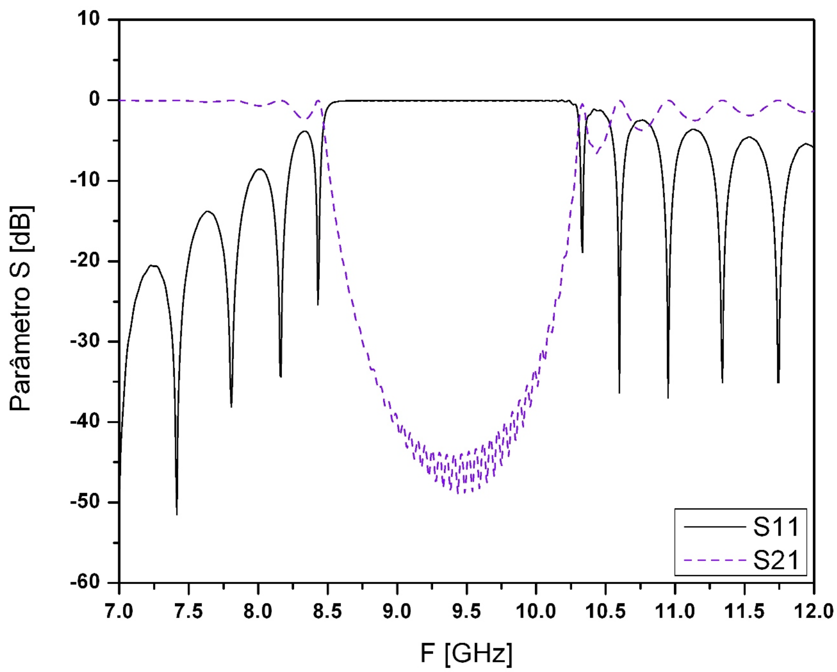


Fig. 2.32: Reflexão total na região da banda proibida

O CST permite visualização do campo elétrico simulado em várias dimensões e perspectivas. Nas Fig. 2.33 e 2.34 a seguir, observa-se que, fora da faixa de frequência onde ocorre a banda proibida, o campo elétrico é propagado praticamente sem alterações. Na banda proibida, pode-se verificar que não há campo elétrico atravessando a estrutura.

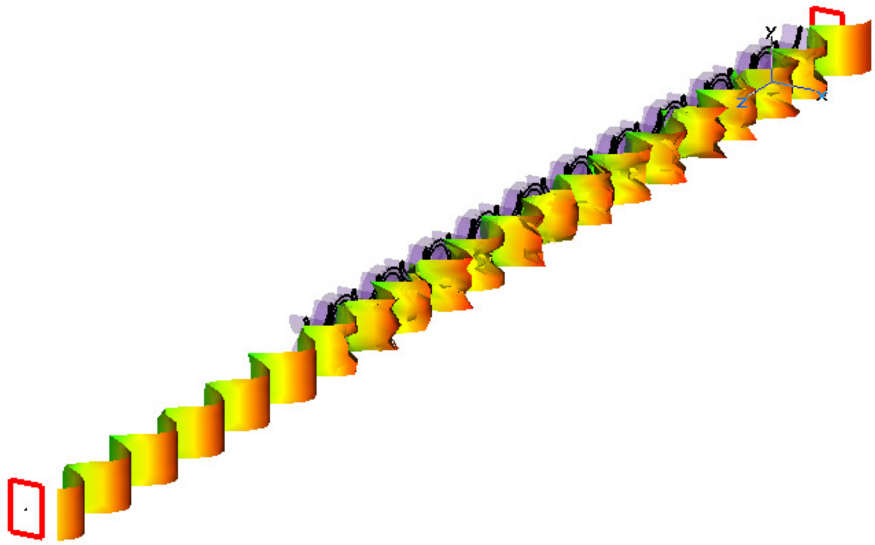


Fig. 2.33: Campo na região fora da banda proibida

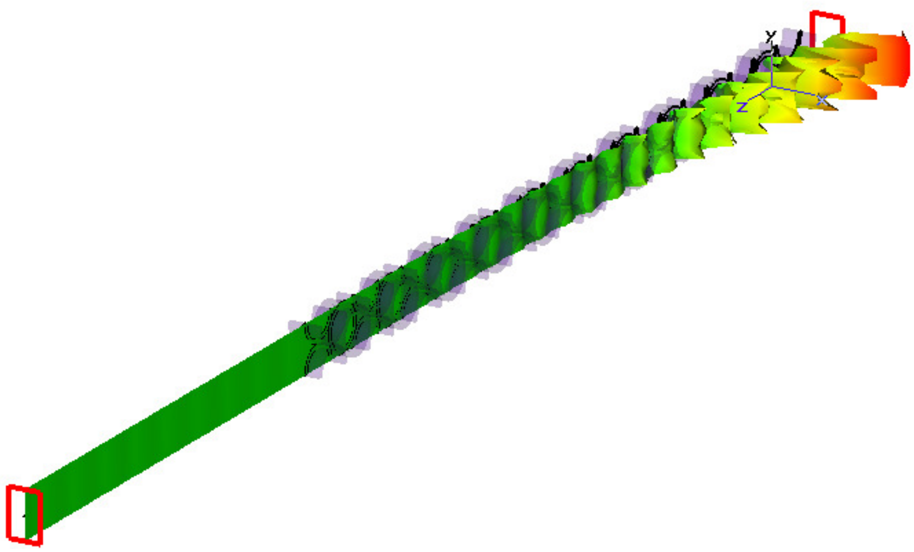


Fig. 2.34: Campo na região da banda proibida

Uma outra visualização da estrutura na região de banda proibida ilustra bem esse fenômeno pois, na Fig. 2.35, pode-se observar que o campo elétrico fica concentrado na região de incidência da estrutura periódica (tons avermelhados), enquanto que o restante da estrutura praticamente não indica a propagação de sinal (verde).

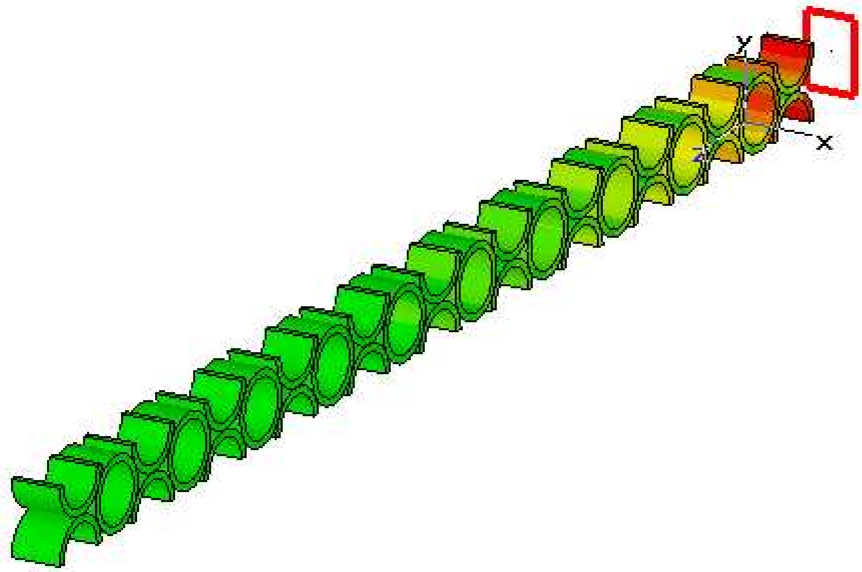


Fig. 2.35: Outra visualização do campo elétrico na região de banda proibida

O campo elétrico, ao incidir sobre a estrutura periódica, atravessando camadas de material dielétrico, sofre refração e reflexão parcial nas interfaces entre os dois materiais diferentes (no caso estudado, os materiais são o ar e o dielétrico da estrutura. Isto resulta numa onda composta pela superposição dos padrões de onda refletidos nas múltiplas interfaces com a onda incidente. O comprimento de onda do campo incidente, ao atingir o dobro da dimensão da constante de periodicidade da estrutura ($\lambda = 2a$) [65], faz com que onda resultante seja uma onda estacionária que não se propaga através do material.

2.5 Atenuação da Banda Proibida

O estudo realizado para o comportamento da atenuação (*At*) é o mesmo efetuado para a determinação dos parâmetros de frequência da banda proibida. Também para esse caso, observou-se que o valor de atenuação é influenciado pelos fatores geométrico (*r/a*) e material (ε_r, para os dielétricos).

Para a determinação da atenuação da banda proibida de uma estrutura, são considerados dois fatores:

- ***kAt(r/a)*** - fator em função da variação da geometria;
- ***kAt(ε_r)*** - fator em função da permissividade do material

Dessa forma, o valor de atenuação para uma determinada estrutura pode ser obtido pela expressão:

$$At = kAt(r/a) \cdot kAt(\varepsilon r) \ \ [\text{dB}] \tag{2.27}$$

As curvas, tabelas e polinômios relativos à atenuação de banda proibida para todas as estruturas estudadas estão mostrados no Anexo II. Também para o caso da atenuação, a validade das expressões é mostrada diretamente através das tabelas de dados.

O capítulo 3 a seguir apresenta comparações entre valores calculados, utilizando-se o método proposto, para alguns casos de estruturas metamateriais, fazendo também uma discussão sobre os desvios entre valores medidos e calculados.

Capítulo 3

Resultados Experimentais e Comparações

3.1 Ensaios com as Estruturas Periódicas - Banda Proibida

Foi realizada uma série de ensaios experimentais com estruturas dielétricas e metálicas, cujo objetivo principal era verificar a validade da metodologia de projeto proposta no Capítulo 2 para a determinação da banda proibida. Todos os ensaios foram realizados no LEMAC - Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado e Computacional Prof. Dr. Ruy Fragassi de Souza, que é uma unidade do Departamento de Microonda e Óptica (DMO) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP.

Para as medições, foram utilizados os seguintes equipamentos e acessórios:

- Analisador de Rede Vetorial HP8510C: este equipamento possibilita a medição de parâmetros de linhas e dispositivos de RF e microondas, em uma faixa de frequências entre 40MHz a 50GHz;
- Antenas: foram utilizados dois pares de antenas tipo corneta piramidal, cobrindo uma faixa de frequência de 4.80 - 15.00GHz;
- Cabos coaxiais de baixa perda;
- Mantas de material absorvedor de RF, para minimizar os efeitos de reflexão na montagem de ensaio.

A montagem de teste constituiu de uma mesa não condutora (toda em madeira), onde foram instaladas as duas antenas, uma transmissora (TX) e outra receptora (RX), ambas devidamente alinhadas, distantes entre si de 0.80m e conectadas às portas no analisador de redes. Na região central entre as duas antenas, foram posicionadas as grades sob ensaio. Para se minimizar os efeitos da mesa, foram utilizadas mantas de material absorvedor de RF sobre a mesma, no entorno da montagem de ensaio. Uma vista geral desta montagem é mostrada na Fig. 3.1.

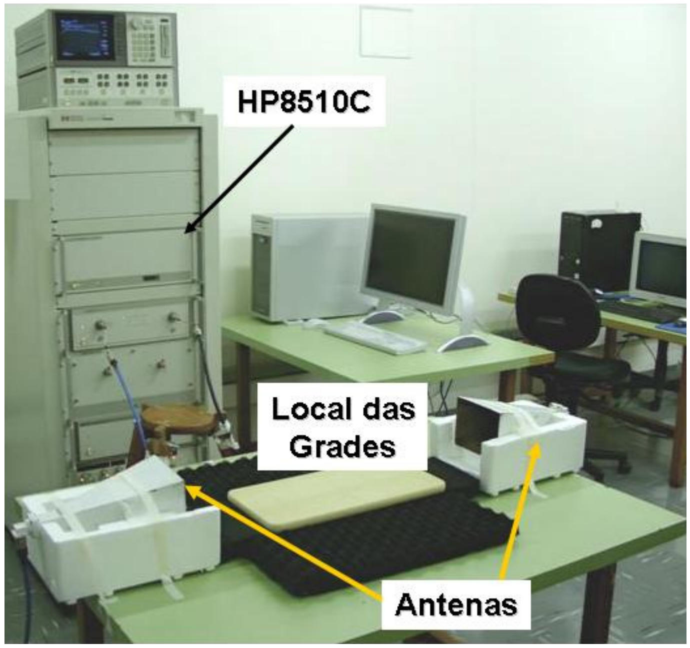


Fig. 3.1: Montagem de ensaios

Um dos objetivos principais deste trabalho é o emprego de materiais comuns e de baixo custo, para a construção das grades dielétricas. Para as estruturas ensaiadas, buscou-se trabalhar com materiais dessa natureza, facilmente encontrados no mercado de varejo. Dessa forma, as estruturas utilizadas para teste, tanto como as condições de medição foram:

Tab. 3.1: Descrição das estruturas e condições de ensaio

Estrutura	Material	Distribuição	Polarizações
Tubo	PVC	triangular	TM / TE
Tubo	CPVC	triangular	TM / TE
Cilindro	Polietileno (PP)	quadrada	TM / TE
Cilindro	PVC	quadrada	TM / TE
Cilindro	Madeira	quadrada	TM / TE
Cilindro	Alumínio	quadrada	TM / TE

Um dos problemas identificados para os materiais empregados na construção das grades foi sua variação dimensional, a qual indicou desvios em relação aos valores nominais existentes em catálogo, como se pode observar na Tab. 3.2, a qual apresenta medições dimensionais realizadas no laboratório.

Tab. 3.2: Dimensões dos materiais utilizados nas grades sob ensaio.

	Tubo PVC	**Tubo CPVC**	**Cil. PVC**	**Cil. PP**	**Cil. Madeira**	**Cil. Alumínio**
Nominal (*r*)*	16.00	12.00	5.00	6.35	6.00	6.35
Medido (*r*)	15.80 - 16.30	11.30 - 11.37	4.91 - 5.10	6.18 - 6.27	5.68 - 5.91	6.29 - 6.37
Nominal (*a*)*	21.00	15.00	13.00	13.00	13.00	13.00
Medido (*a*)	20.63 - 21.00	15.10	12.60 - 13.10	12.60 - 13.10	12.60 - 13.10	12.60 - 13.10

Nota: *r* - diâmetro interno (tubo) e externo (cilindro); *a* - distância entre centros. Dimensões em milímetros (mm).

No caso dos tubos, as diferenças de *a* são em função da variação dimensional do diâmetro externo dos mesmos. Já para os cilindros, essa variação estava associada à placa perfurada utilizada para a montagem das grades.

Outro fator de incerteza na medição é o relacionado à permissividade relativa dos materiais empregados. Salvo para alguns materiais mais comuns em aplicações de microondas, não há na literatura indicações claras do comportamento desses dielétricos em altas frequências, como é o caso do CPVC, por exemplo. Para o PVC, puderam-se obter valores aproximados de ε_r em artigos científicos experimentais [71, 72] porém, para os demais, foram adotados valores existentes em tabelas sem indicação da frequência de aplicação. Os valores de permissividade relativa para os materiais dielétricos utilizados estão mostrados na Tab. 3.3:

Tab. 3.3: Permissividade relativa dos materiais utilizados nas grades dielétricas

Material	**Permissividade Relativa (ε_r)**
PVC	2.60 a 3.10 [71]
CPVC	~3.70 [73]
PP	2.25 [74]
Madeira	~2.10 a 4.00 [69]
Alumínio	1.00*[69]

***Nota:** o valor da condutividade do alumínio, utilizada para as simulações, é: σ = 3.72x10^7 S/m.

Tanto a variação dimensional como a variação da permissividade constituem incertezas associadas às medição, as quais certamente podem ter contribuído para alguns desvios observados nos resultados das medições efetuadas. A Fig. 3.2 apresenta o formato final das grades construídas a partir de cilindros dielétricos. A grade metálica (alumínio) é mostrada na Fig. 3.3 e as grades construídas com tubos de PVC estão apresentadas na Fig. 3.4.

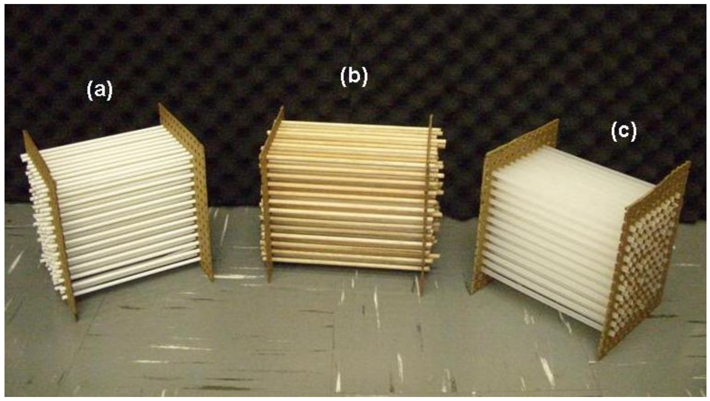
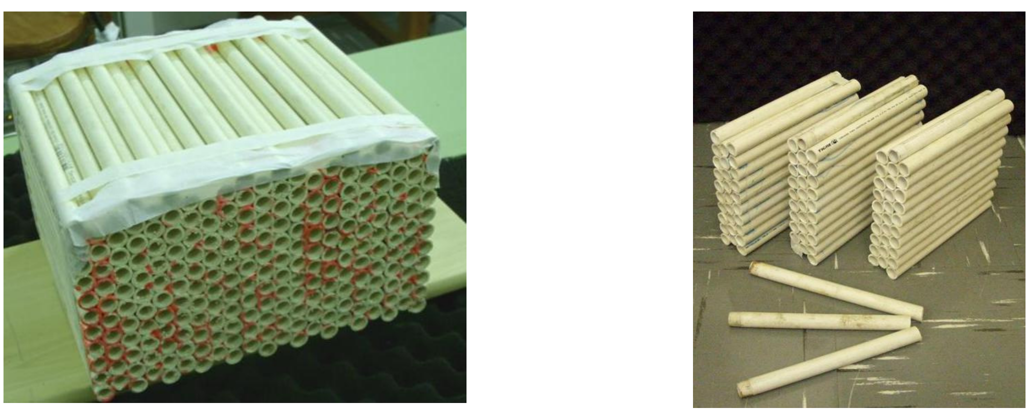


Fig. 3.2: Grades de cilindros dielétricos - (a) PVC, (b) madeira, (c) PP.

Fig. 3.3: Grade de cilindros metálicos (alumínio)



(a) **(b)**

Fig. 3.4: Grades de tubos dielétricos - (a) CPVC montada, (b) PVC em módulos.

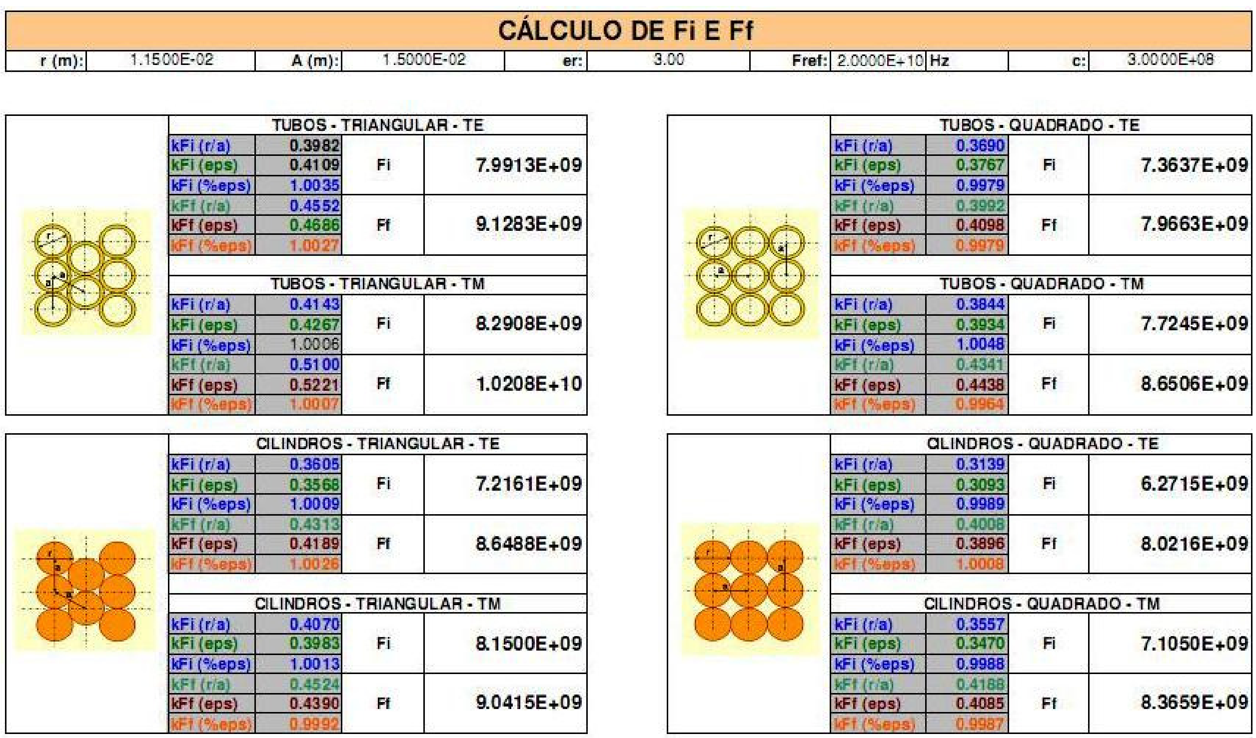
O número de camadas de estruturas para cada tipo de grade é mostrado na Tab. 3.4:

Tab. 3.4: Número de camadas de estruturas para cada tipo de grade

Tubo PVC	Tubo CPVC	Cil. PVC	Cil. PP	Cil. Madeira	Alumínio
19	21	13	13	13	13

3.2 Comparação entre Resultados Experimentais e Teóricos

Os resultados experimentais obtidos com cada uma das grades foram comparados aos obtidos com a metodologia de projeto proposta neste trabalho (Capítulo 2). Conforme já mencionado, todas as tabelas, curvas, bem como os polinômios que as geraram estão apresentados nos Anexos I (para frequência inicial - *kFi* e final - *kFf*) e II (para atenuação - At). Uma ferramenta utilizada, a qual possibilitou um rápido acesso aos resultados teóricos, foi a implementação da formulação em uma planilha do programa *Microsoft Office Excel®*, como mostrado no exemplo da Fig. 3.5.



CÁLCULO DE Fi E Ff

r (m):	1.1500E-02	A (m):	1.5000E-02	er:	3.00	Fref:	2.0000E+10 Hz	c:	3.0000E+08

TUBOS - TRIANGULAR - TE			
kFi (r/a)	0.3982	Fi	7.9913E+09
kFi (eps)	0.4109		
kFi (%eps)	1.0035		
kFf (r/a)	0.4552	Ff	9.1283E+09
kFf (eps)	0.4686		
kFf (%eps)	1.0027		

TUBOS - TRIANGULAR - TM			
kFi (r/a)	0.4143	Fi	8.2908E+09
kFi (eps)	0.4267		
kFi (%eps)	1.0006		
kFf (r/a)	0.5100	Ff	1.0208E+10
kFf (eps)	0.5221		
kFf (%eps)	1.0007		

TUBOS - QUADRADO - TE			
kFi (r/a)	0.3690	Fi	7.3637E+09
kFi (eps)	0.3767		
kFi (%eps)	0.9979		
kFf (r/a)	0.3992	Ff	7.9663E+09
kFf (eps)	0.4098		
kFf (%eps)	0.9979		

TUBOS - QUADRADO - TM			
kFi (r/a)	0.3844	Fi	7.7245E+09
kFi (eps)	0.3934		
kFi (%eps)	1.0048		
kFf (r/a)	0.4341	Ff	8.6506E+09
kFf (eps)	0.4438		
kFf (%eps)	0.9964		

CILINDROS - TRIANGULAR - TE			
kFi (r/a)	0.3605	Fi	7.2161E+09
kFi (eps)	0.3568		
kFi (%eps)	1.0009		
kFf (r/a)	0.4313	Ff	8.6488E+09
kFf (eps)	0.4189		
kFf (%eps)	1.0026		

CILINDROS - TRIANGULAR - TM			
kFi (r/a)	0.4070	Fi	8.1500E+09
kFi (eps)	0.3983		
kFi (%eps)	1.0013		
kFf (r/a)	0.4524	Ff	9.0415E+09
kFf (eps)	0.4390		
kFf (%eps)	0.9992		

CILINDROS - QUADRADO - TE			
kFi (r/a)	0.3139	Fi	6.2715E+09
kFi (eps)	0.3093		
kFi (%eps)	0.9989		
kFf (r/a)	0.4006	Ff	8.0216E+09
kFf (eps)	0.3896		
kFf (%eps)	1.0008		

CILINDROS - QUADRADO - TM			
kFi (r/a)	0.3557	Fi	7.1050E+09
kFi (eps)	0.3470		
kFi (%eps)	0.9988		
kFf (r/a)	0.4188	Ff	8.3659E+09
kFf (eps)	0.4085		
kFf (%eps)	0.9987		

Fig. 3.5: *Planilha de cálculo elaborada no MS Excel.*

A planilha possui entradas para os valores de *r, a* e ε_r, oferecendo como resultado os valores de *kFi*, *kFf*, *Fi* e *Ff*, além dos fatores auxiliares de cálculo.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nas medições com as grades dielétricas e metálicas. Para cada situação é mostrado o gráfico para a polarização TE, TM, comparação TE/TM, valores medidos de *Fi, Ff* e tabelas comparativas de medido/teórico. Nos gráficos, os valores para **S21** são dados em módulo (**|S21|**).

- **Tubos de PVC: Distribuição Triangular**

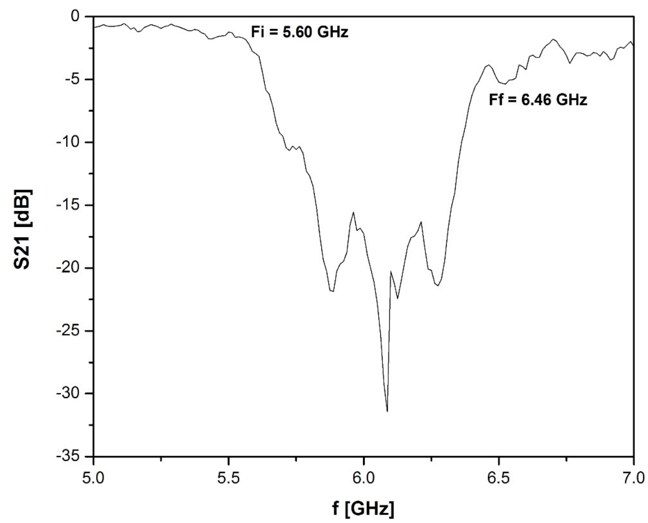


Fig. 3.6: Tubos de PVC - polarização TE

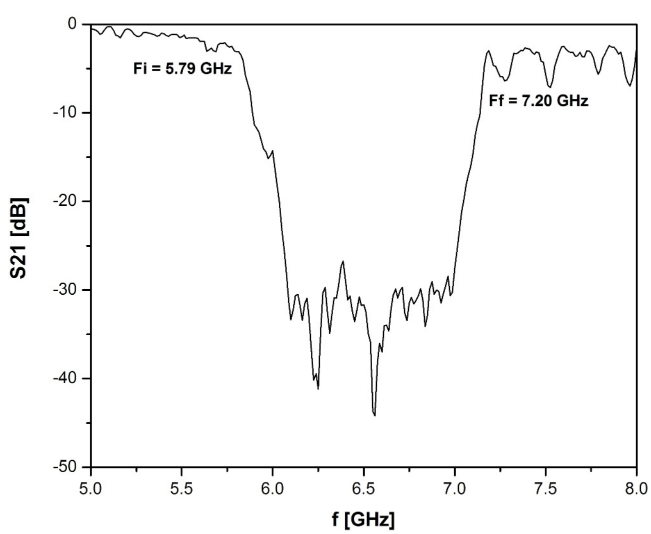


Fig. 3.7: Tubos de PVC - polarização TM

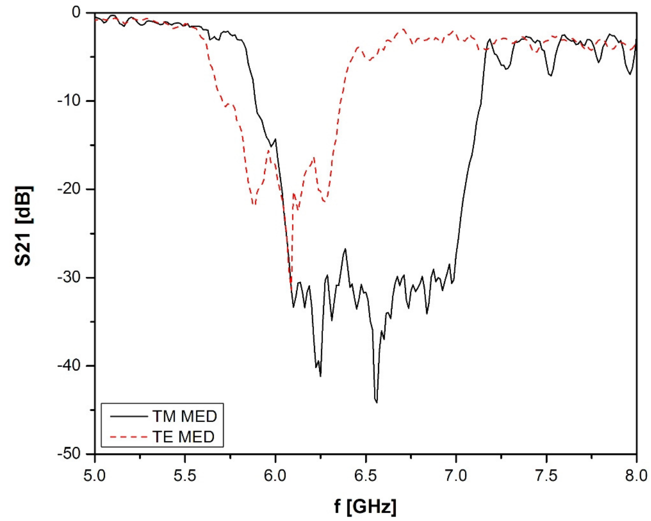


Fig. 3.8: Tubos de PVC - comparação TE/TM.

Tab. 3.5: Comparação de resultados para tubos de PVC.

	TE Medido	TE Teórico*	TM Medido	TM Teórico*
Fi **(GHz)**	5.60	5.62 a 5.98	5.79	5.78 a 6.10
Ff **(GHz)**	6.46	6.43 a 6.76	7.20	7.24 a 7.37

*Nota: a variação apresentada para os valores teóricos são em função das variações dimensionais e de permissividade mostradas nas Tab. 3.2 e 3.3.

- **Tubos de CPVC: Distribuição Triangular**

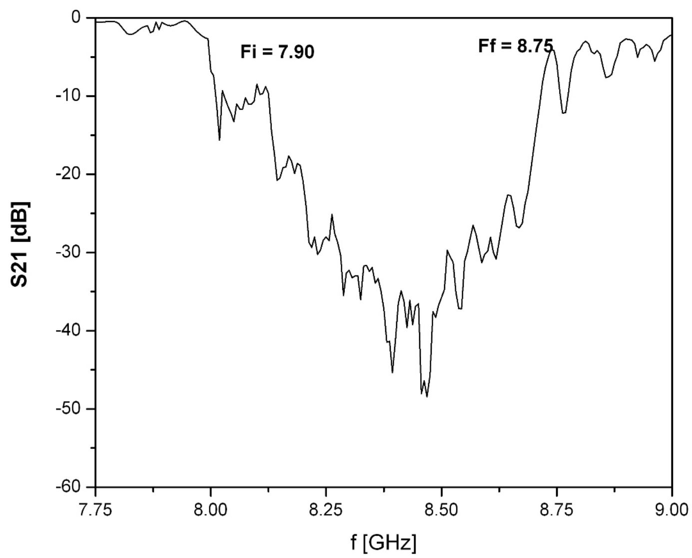


Fig. 3.9: Tubos de PVC - polarização TE

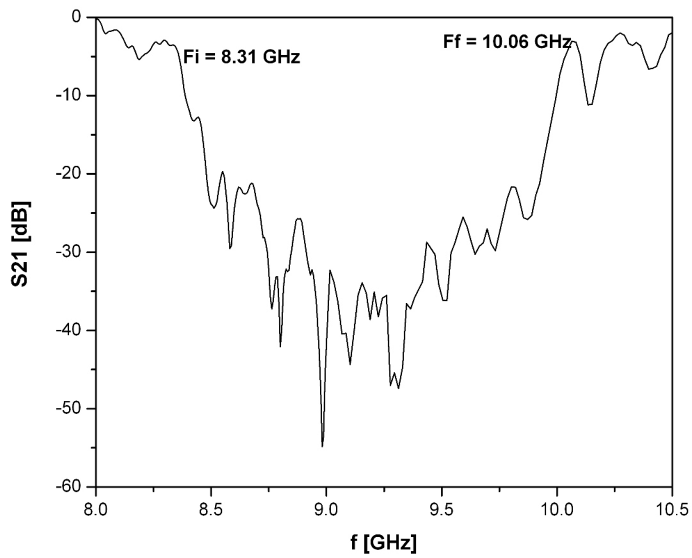


Fig. 3.10: Tubos de PVC - polarização TM

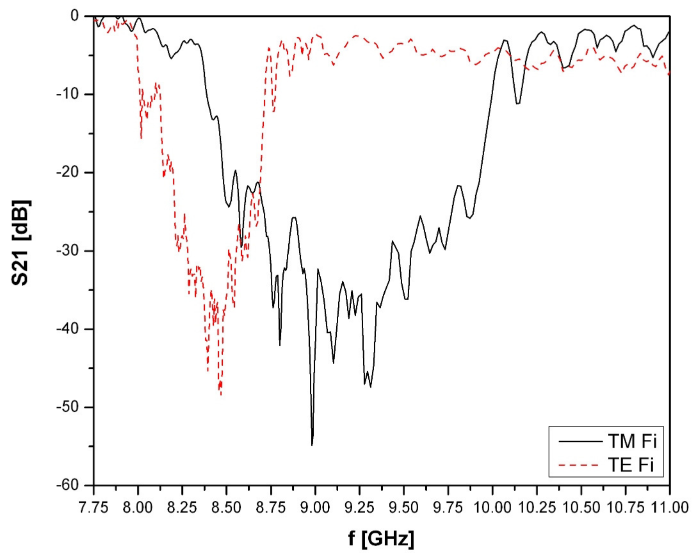


Fig. 3.11: Tubos de PVC - comparação TE/TM

Tab. 3.6: Comparação de resultados para tubos de CPVC.

	TE Medido	TE Teórico	TM Medido	TM Teórico
Fi **(GHz)**	7.90	7.39 a 7.60	8.31	7.75 a 7.98
Ff **(GHz)**	8.75	8.57 a 8.80	10.06	9.98 a 10.20

- **Cilindros de PVC: Distribuição Quadrada**

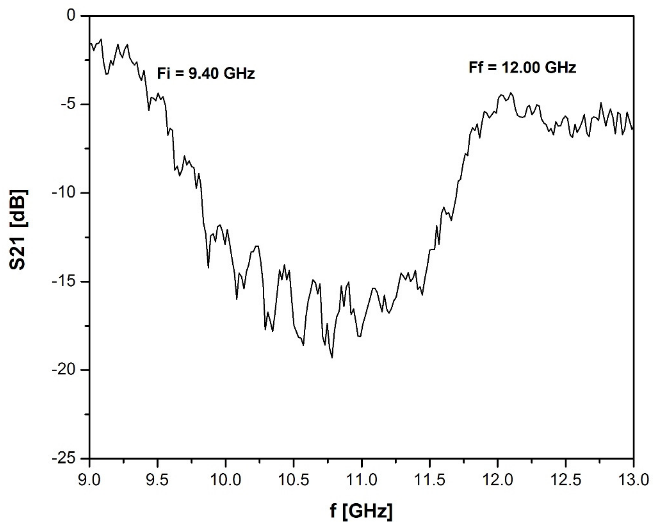


Fig. 3.12: Cilindros de PVC - polarização TE

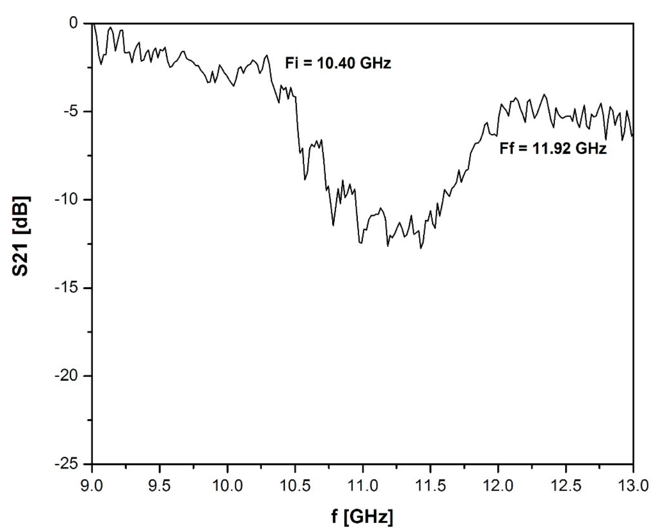


Fig. 3.13: Cilindros de PVC - polarização TM

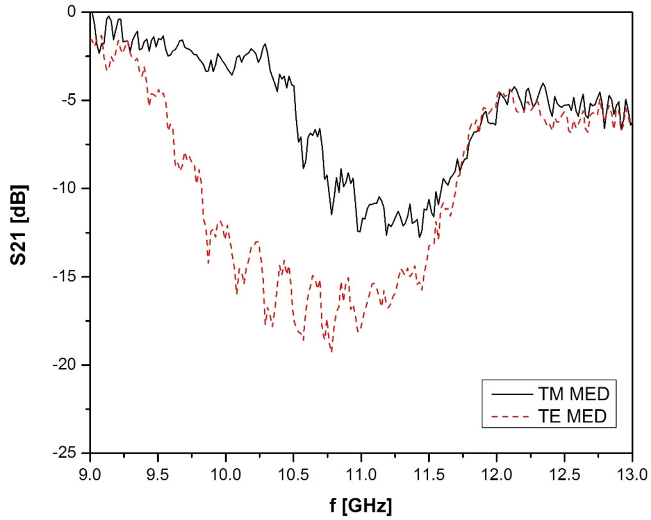


Fig. 3.14: Cilindros de PVC - comparação TE/TM

Tab. 3.7: Comparação de resultados para cilindros de PVC.

	TE Medido	TE Teórico	TM Medido	TM Teórico
Fi **(GHz)**	9.40	9.17 a 10.20	10.40	10.14 a 10.99
Ff **(GHz)**	12.00	11.35 a 12.30	11.92	11.36 a 12.20

- **Cilindros de PP: Distribuição Quadrada**

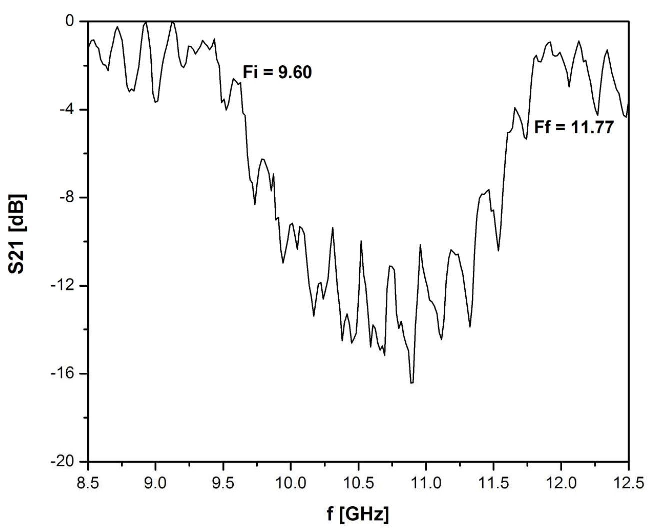


Fig. 3.15: Cilindros de PP - polarização TE

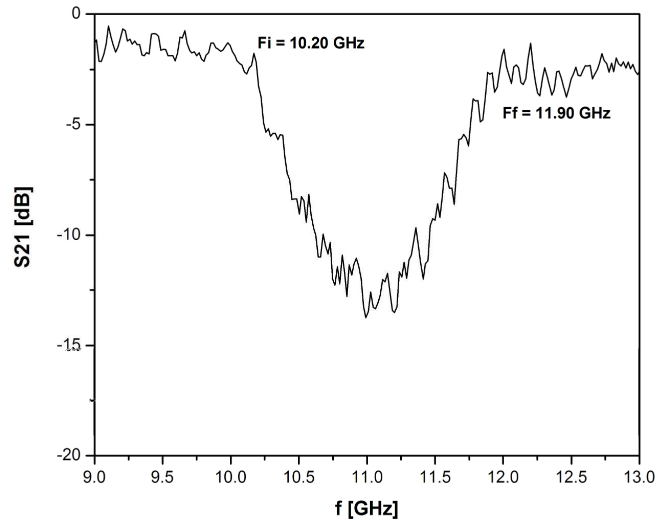


Fig. 3.16: Cilindros de PP - polarização TM

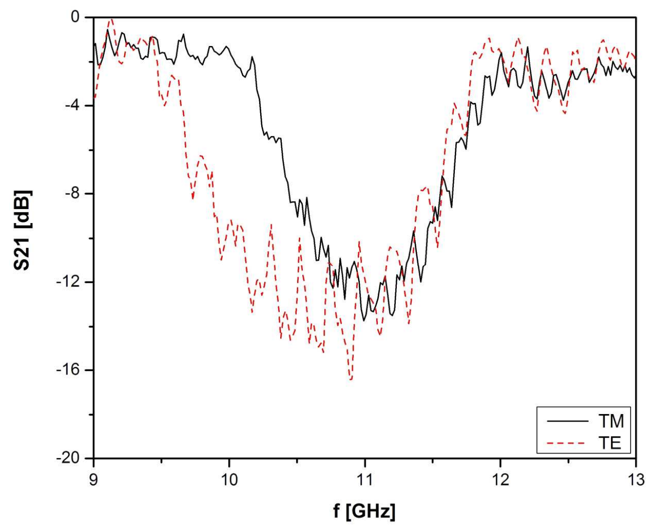


Fig. 3.17: Cilindros de PP - comparação TE/TM

Tab. 3.8: Comparação de resultados para cilindros de PP.

	TE Medido	**TE Teórico**	**TM Medido**	**TM Teórico**
***Fi* (GHz)**	9.60	9.79 a 10.10	10.20	10.53 a 10.88
***Ff* (GHz)**	11.77	11.96 a 12.44	11.90	11.83 a 12.25

- **Cilindros de madeira: Distribuição Quadrada**

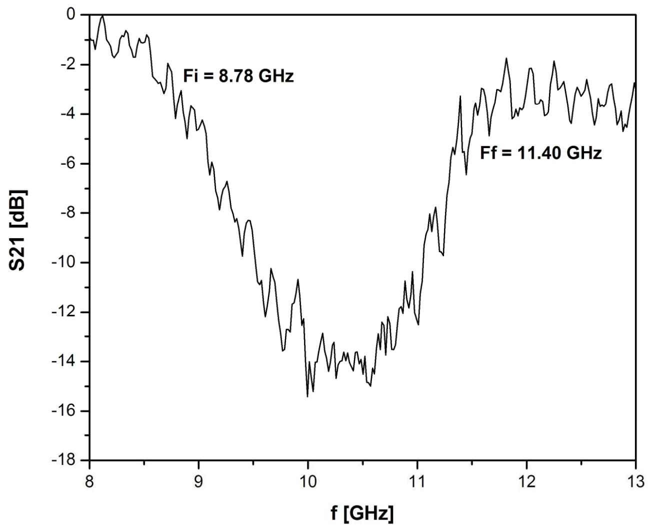


Fig. 3.18: Cilindros de madeira - polarização TE

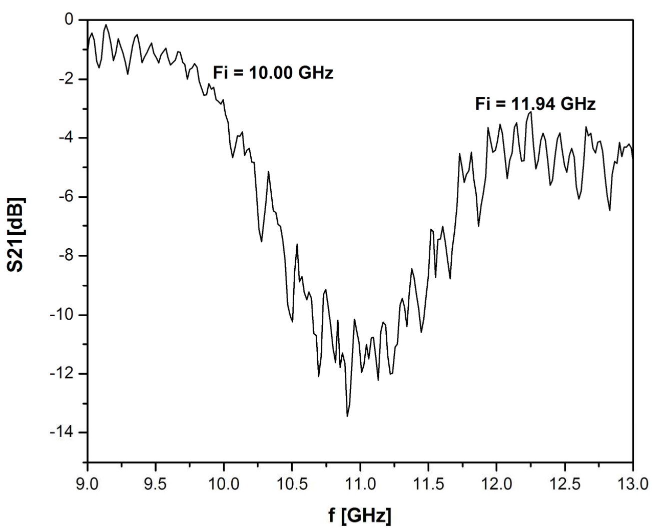


Fig. 3.19: Cilindros de madeira - polarização TM

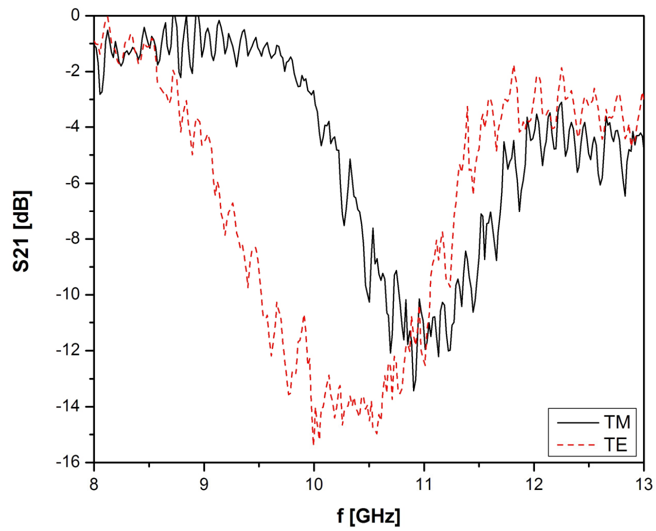


Fig. 3.20: Cilindros de madeira - comparação TE/TM

Tab. 3.9: Comparação de resultados para cilindros de madeira.

	TE Medido	TE Teórico	TM Medido	TM Teórico
Fi **(GHz)**	8.78	8.73 a 10.35	10.00	9.83 a 10.92
Ff **(GHz)**	11.40	11.16 a 12.38	11.94	11.19 a 12.11

- **Cilindros de alumínio: Distribuição Quadrada**

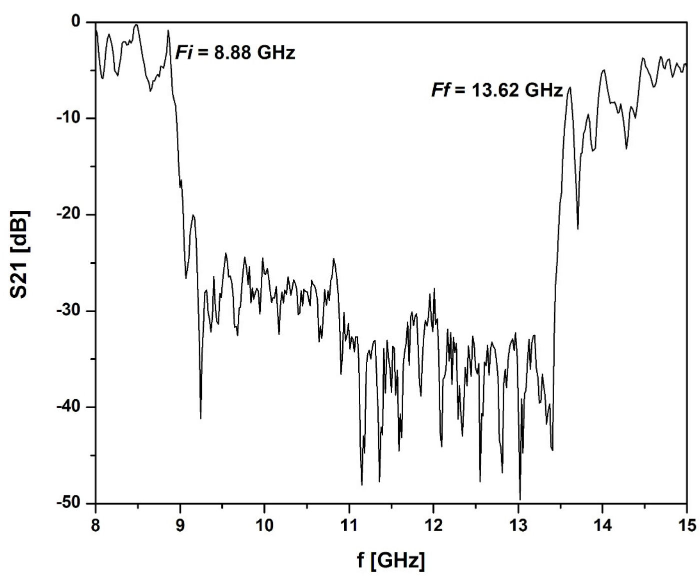


Fig. 3.21: Cilindros de alumínio - polarização TE

Tab. 3.10: Comparação de resultados para cilindros de alumínio.

	TM Medido	**TE Teórico**
***Fi* (GHz)**	8.88	8.56 a 8.81
***Ff* (GHz)**	13.62	13.20 a 13.84

3.3 Estudo da Descontinuidade nas Grades Periódicas - "Defeitos"

As descontinuidades ou defeitos, nas grades periódicas, constituem-se elementos que alteram as características da banda proibida. Uma descontinuidade faz com que os padrões de reflexões e sucessivas composições da onda, como exposto, sejam modificados, permitindo que haja transmissão de sinal no interior da região da banda proibida.

Os defeitos podem ser produzidos nas estruturas de diversas formas. Uma delas constitui-se a retirarada uma ou mais células periódicas que constituem a estrutura (Fig. 3.22).

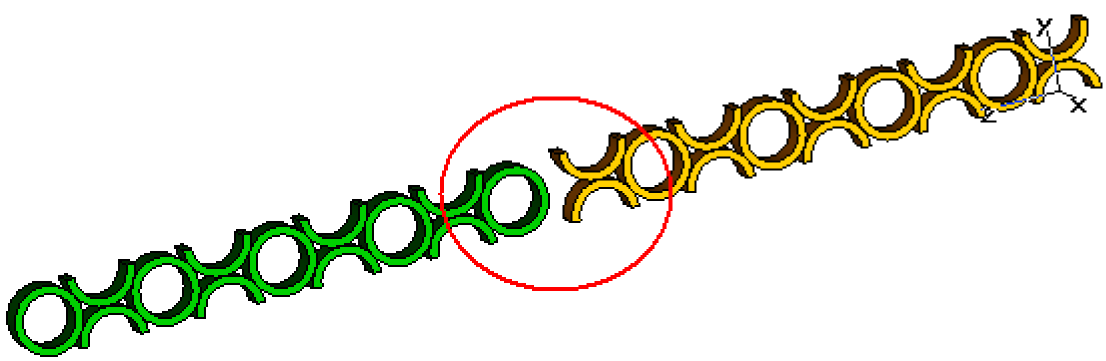


Fig. 3.22: Defeito em uma estrutura periódica

A estrutura mostrada acima é construída a partir de tubos dielétricos, com relação $r/a \cong 0.76$ onde $a = 21.00$mm. Em simulações utilizando-se 0 CST®, para um afastamento de aproximadamente $0.31a$ (~8.00mm), obtém-se uma transmissão na região central da banda proibida, como mostra a Fig. 3.23.

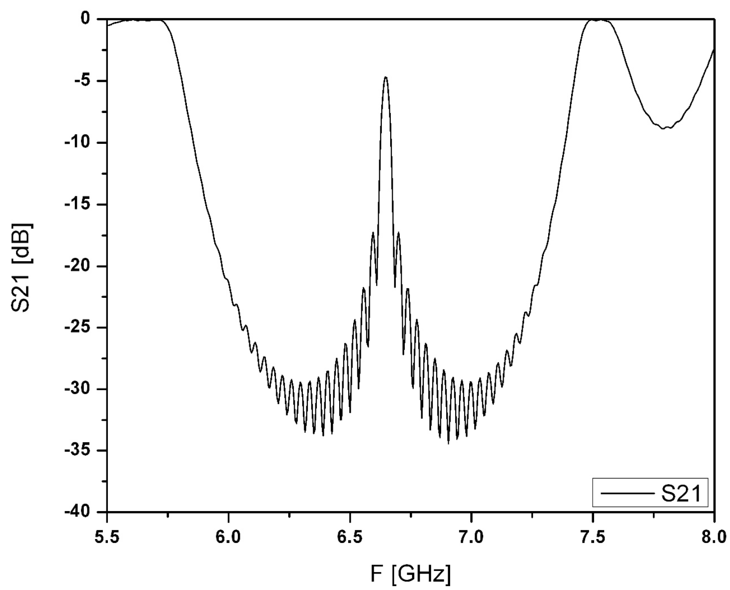


Fig. 3.23: Transmissão obtida a partir de um defeito na estrutura periódica.

É também interessante observar que o sinal transmitido, neste caso, apresenta uma certa atenuação em relação ao nível de referência (N_{Ref} = 0 dB), mas com uma relação sinal/ruído de aproximadamente 25.00dB. O gráfico da Fig. 3.24 mostra o comportamento da transmissão e da reflexão do sinal na estrutura com o defeito.

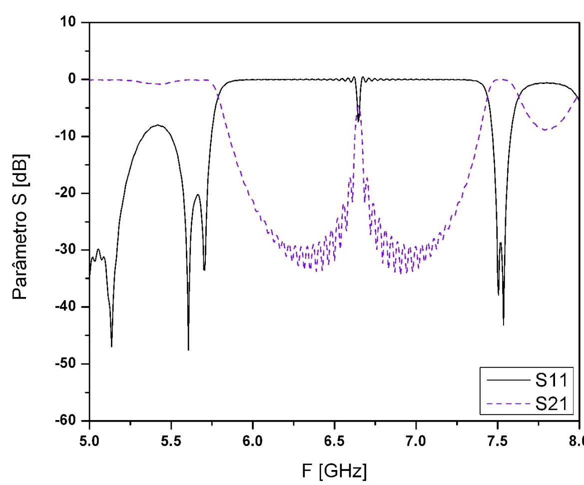


Fig. 3.24: Transmissão (S21) e reflexão (S11) na região do defeito.

Os estudos realizados com o CST, empregando-se os diversos tipos de estruturas abordados neste trabalho, possibilitaram a composição de um perfil geral de desempenho para os defeitos, considerando-se dois pontos principais: a atenuação do sinal transmitido e sua relação sinal/ruído. Os dois perfis podem ser observados nas Fig. 3.25 e 3.26 a seguir.

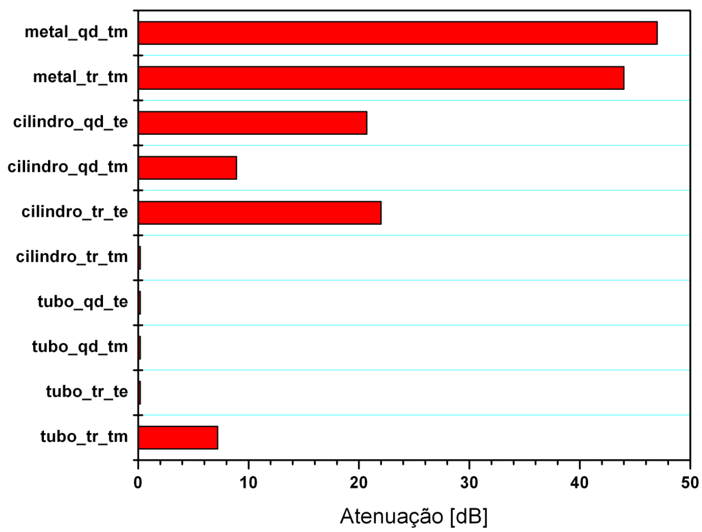


Fig. 3.25: Atenuação do sinal transmitido, ocasionado por defeitos.

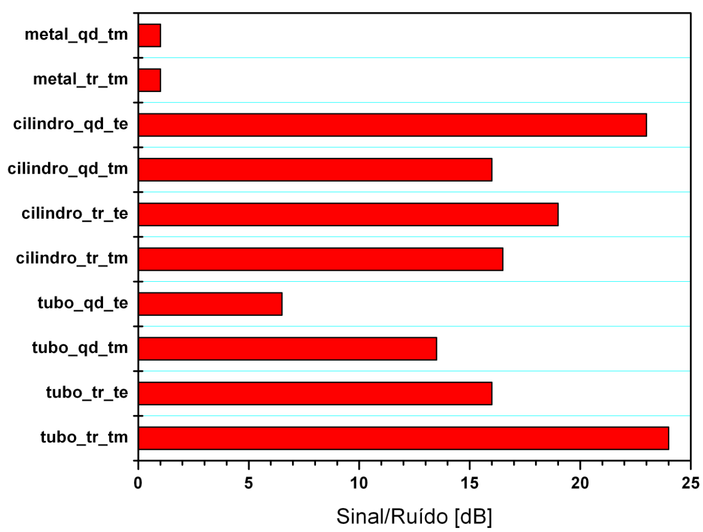
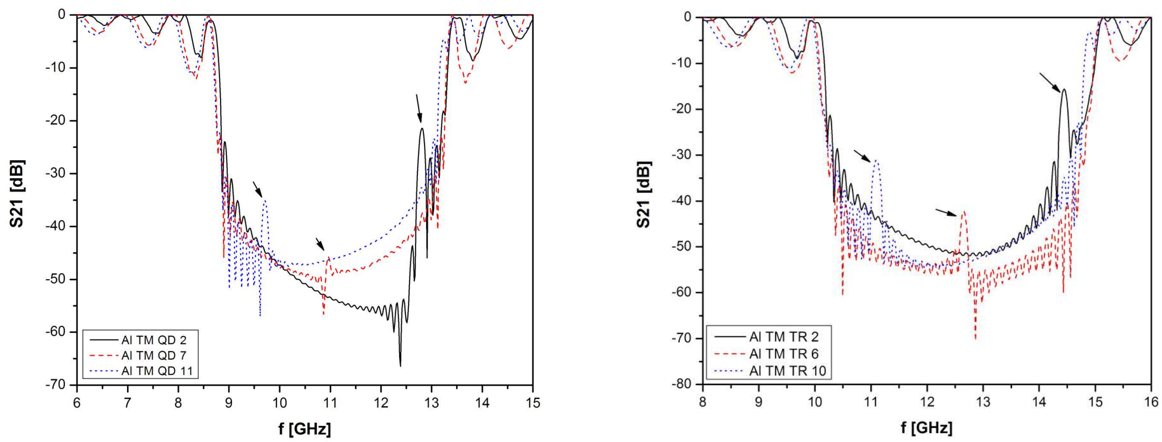


Fig. 3.26: Relação sinal/ruído em um sinal ocasionado por defeitos.

Os dois gráficos acima permitem uma visualização ampla do comportamento das diversas estruturas estudas, possibilitando a escolha da mais adequada para cada aplicação específica. Uma das aplicações para os defeitos em estruturas periódicas é a de filtro seletivo em frequência, aplicação onde é desejável que o sinal transmitido tenha uma ótima relação sinal/ruído e baixa atenuação. Um exemplo de baixo desempenho em relação ao sinal transmitido é observado nas estruturas metálicas (Fig. 3.27a e 3.27b).



(a) (b)

Fig. 3.27: Defeitos em estruturas metálicas - QD (a) e TR (b).

Observa-se que, tanto para a estrutura triangular (TR) como para a quadrada (QD), a relação sinal/ruído é muito baixa, sendo também o sinal transmitido bastante atenuado. Esse tipo de estrutura certamente não seria o mais indicado para uma aplicação como filtro seletivo. Para essa finalidade, pode-se verificar que as melhores configurações são a tubular (TR_TM) e a cilíndrica (QD_TE), ambas em material dielétrico.

A Fig. 3.28 ilustra com maior clareza o comportamento do campo elétrico na região do defeito, onde há a transmissão do sinal.

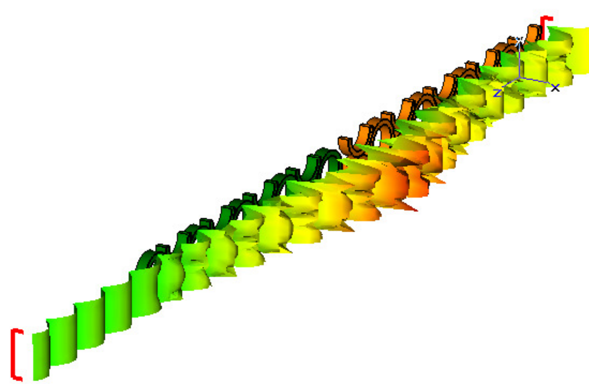


Fig. 3.28: Campo elétrico na região do defeito.

O efeito de transmissão na banda proibida é sensivelmente afetado pelo deslocamento físico da estrutura na região do defeito. Nas medições realizadas em laboratório, mesmo com um controle rígido do afastamento entre as estruturas, percebeu-se que há uma grande sensibilidade, principalmente no que diz respeito ao deslocamento em frequência do sinal transmitido. O equacionamento que descreve o efeito da transmissão na banda proibida, devido a descontinuidade da estrutura periódica, ainda está em desenvolvimento. Porém, medições comparadas a simulações demonstram que o modelo utilizado para os estudos é bastante representativo da realidade. Pode-se observar um exemplo real de defeito na Fig. 3.29.

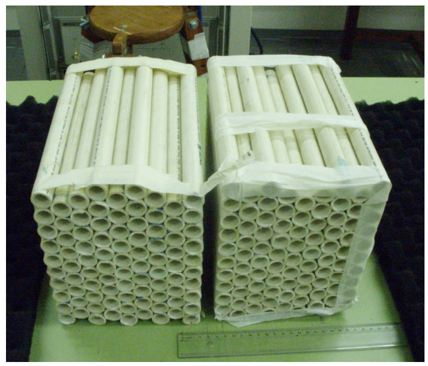


Fig. 3.29: Campo elétrico na região do defeito.

A Fig. 3.29 ilustra a estrutura em PVC anteriormente citada, através da qual foram realizados alguns estudos experimentais preliminares. A Fig. 3.30 mostra o resultado medido para um afastamento de 10.00mm, e a comparação com a mesma condição simulada no CST.

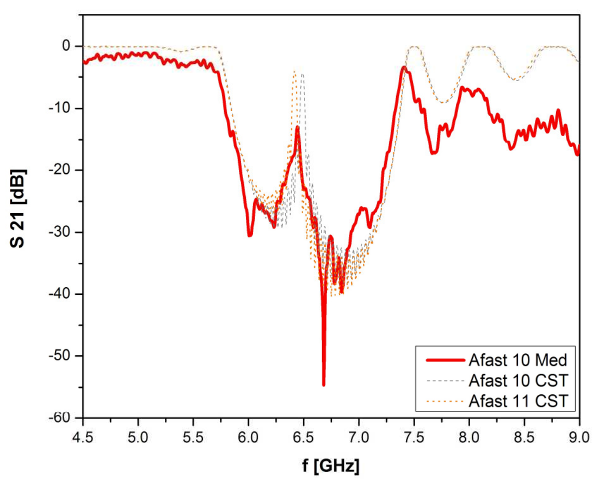


Fig. 3.30: Comparação entre medição e simulação - defeito.

No gráfico, pode-se observar a sensibilidade desse fenômeno conforme comentado. O pico do sinal medido para 10.00mm de afastamento situa-se, segundo os resultados do CST, entre 10.00mm e 11.00mm. Essa variação pode ser relacionada desde a erros no posicionamento das estruturas durante a medição, influência da montagem, até desvios no modelo numérico. No caso apresentado esse desvio, para fins práticos, torna-se quase imperceptível. O modelo numérico, conforme já comentado, também demonstrou-se bastante preciso para o estudo das bandas proibidas, como pode ser observado nos exemplos mostrados nas Figuras 3.31 e 3.32:

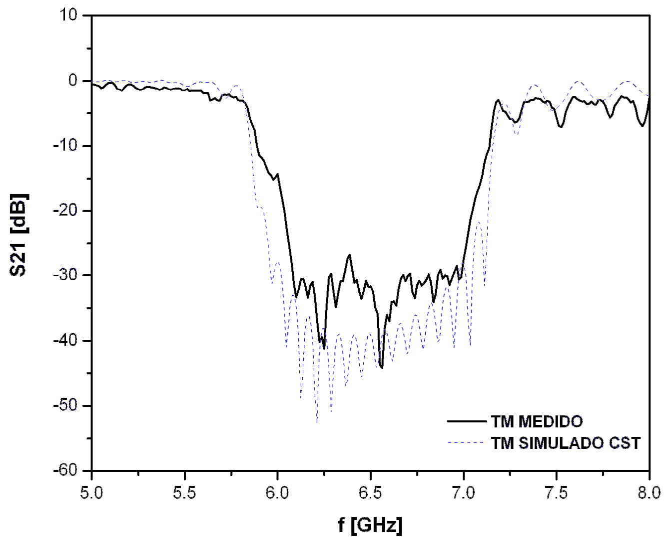


Fig. 3.31: Comparação entre medição e simulação - Tubos de PVC - TR - TM

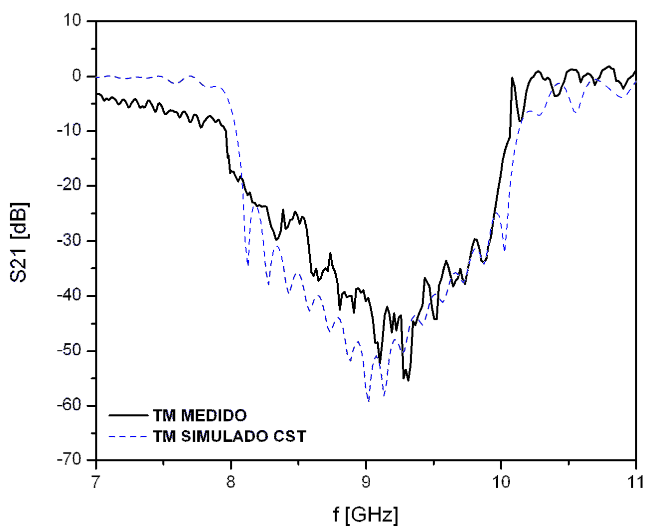


Fig. 3.32: Comparação entre medição e simulação - Tubos de CPVC - TR - TM

3.4 Comentários Sobre os Resultados

As Tabs. 3.11 a 3.16 apresentam um resumo de todas as medições efetuadas e as respectivas comparações com os resultados teóricos:

Tab. 3.11: Comparações entre medido e teórico para tubos de PVC.

	Modo TE - *Fi*		**Modo TE - *Ff***	
Tubos de PVC	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	5.60	+0.36 a +6.35	6.46	+0.46 a 4.44
	Modo TM - *Fi*		**Modo TM - *Ff***	
	Medido [GHz]	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	5.79	-0.17 a +5.08	7.20	-0.56 a +2.31

Tab. 3.12: Comparações entre medido e teórico para tubos de CPVC.

	Modo TE - *Fi*		**Modo TE - *Ff***	
Tubos de CPVC	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	7.90	-6.90 a -3.95	8.75	+0.57 a +2.06
	Modo TM - *Fi*		**Modo TM - *Ff***	
	Medido [GHz]	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	8.31	-7.23 a -4.14	10.06	+0.80 a +1.37

Tab. 3.13: Comparações entre medido e teórico para cilindros de PVC.

	Modo TE - *Fi*		**Modo TE - *Ff***	
Cilindros de PVC	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	9.40	-2.84 a +7.84	12.00	-0.67 a +5.42
	Modo TM - *Fi*		**Modo TM - *Ff***	
	Medido [GHz]	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	10.40	-2.56 a +5.37	11.92	2.30 a 4.70

Tab. 3.14: Comparações entre medido e teórico para cilindros de PP.

	Modo TE - *Fi*		**Modo TE - *Ff***	
Cilindros de PP	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	9.60	+1.94 a +4.95	11.77	-1.61 a +5.39
	Modo TM - *Fi*		**Modo TM - *Ff***	
	Medido [GHz]	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	10.20	+3.13 a +6.25	11.90	+.59 a +2.86

Tab. 3.15: Comparações entre medido e teórico para cilindros de madeira.

	Modo TE - *Fi*		**Modo TE - *Ff***	
Cilindros de Madeira	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	8.78	-0.57 a +15.17	11.40	+2.11 a +7.92
	Modo TM - *Fi*		**Modo TM - *Ff***	
	Medido [GHz]	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	10.00	-1.73 a +8.42	11.94	+1.40 a +6.28

Tab. 3.16: Comparações entre medido e teórico para cilindros de alumínio

Cilindros de Alumínio	**Modo TM - *Fi***		**Modo TM - *Ff***	
	Medido [GHz]	**Teórico - Variação [%]**	**Medido [GHz]**	**Teórico - Variação [%]**
	8.88	-3.74 a -0.79	13.62	+1.59 a +3.08

Os desvios observados nas medições podem ser atribuídos aos seguintes fatores:

- geometria: variações mostradas na Tab. 3.2;
- material: permissividade elétrica para cada material ensaiado segundo a Tab. 3.3;
- tomada de medidas teóricas: todas as tomadas de medidas no CST são feitas uma a uma, manualmente. Esse processo de leitura pode introduzir fator de incerteza na medição;
- medição experimental: há ainda que se considerar a incerteza introduzida pela montagem de medição.

Os fatores de incerteza são mais pronunciados sobre a estrutura de cilindros metálicos, principalmente em função da grande variação da permissividade desse material (Tab. 3.3), cujo desvio para *kFi* no modo TE chegou a 15%. Para os demais, os desvios variaram de -0.57% a +8.48%, isto numa faixa de frequências da ordem de GHz, o que corresponde a uma variação de 5.70MHz a 84.80MHz.

Outro fato importante a ser ressaltado é que os materiais foram adquiridos no comércio de varejo local, e isto implica num certo desconhecimento em relação à qualidade e homogeneidade de suas características, uma vez que seu uso final não é o aplicado neste trabalho (como é o caso de tubos de PVC para instalação de água).

Para os cilindros metálicos (alumínio), tanto as medições como as simulações para o modo TE não apresentaram resultados conclusivos. Nas simulações, os resultados se demonstraram pouco ilustrativos e, para as medições, houve apenas uma atenuação da ordem de 20 dB, em toda a faixa, em relação ao sinal de referência do analisador de redes. Portanto, esta situação ainda requer maiores estudos, não sendo ainda totalmente concluída neste trabalho.

De uma forma geral, o equacionamento proposto demonstrou-se satisfatório como ferramenta de projeto para os modelos de grades estudados, como um instrumento ágil e simples na previsão de bandas proibidas em estruturas cilíndricas de baixo custo.

Capítulo 4

Conclusões e Trabalhos Futuros

4.1 Conclusão

Uma das motivações que levaram adiante a execução deste trabalho foi a dificuldade em se obter, para uma estrutura metamaterial simples, os parâmetros de banda proibida em função de sua geometria e material. Isso normalmente é obtido através de códigos computacionais complexos e, por sua vez, de alto custo. Também, a literatura científica atual não apresenta uma metodologia prática e ágil, impossibilitando ao pesquisador experimentador a obetnção de uma resposta rápida sobre quais tipos de estruturas utilizar para a finalidade pretendida, ou ainda, qual o desempenho de estruturas construídas com materiais que se têm à mão em um determinado momento.

As estruturas metamateriais aqui estudadas são uma adaptação das estruturas fotônicas ou cristais fotônicos (*PBG - Photonic Bandgaps*), aplicadas às faixa de microondas. Como as estruturas fotônicas normalmente requerem o uso de materiais mais refinados [75, 76], o seu custo também acaba sendo elevado. Talvez pela influência dos estudos sobre PBG's, essa também é uma tendência observada nos trabalhos com estruturas metamateriais em microondas (*EBG - Electromagnetic Bandgaps*), as quais acabam tendo custos elevados em função dos materiais de construção utilizados [20]. No Capítulo 1, onde são apresentadas algumas das metodologias usuais de análise e projeto, fica evidente a dificuldade de utilização desses métodos sem a utilização de apoio computacional.

A metodologia proposta no Capítulo 2 é uma ferramenta de auxílio a projeto, pela qual pode-se prever vários parâmetros com considerável precisão, porém, com muito mais agilidade que um código numérico. Evidentemente, esse método, por ser experimental, não pode ser de aplicação generalizada, limitando-se aos modelos e estruturas propostos para estudos.

Os resultados mais importantes observados no Capítulo 2 foram:

- Validade dos modelos utilizados no programa CST, para as várias geometrias testadas;

- Determinação de um comportamento típico em frequência, para as estruturas;
- Estabelecimento de uma relação entre parâmetros físicos (ε_r ; *r/a*) e comportamento em frequência ;
- Elaboração de um equacionamento simplificado de projeto.

Os modelos adotados para os estudos no CST demonstraram-se muito representativos da realidade, o que pode ser observado através dos estudos experimentais apresentados no Capítulo 3, onde os valores medidos tiveram desvios relativamente pequenos em comparação à metodologia elaborada a partir das simulações no CST.

Outro fator interessante observado é quanto ao comportamento em frequência das estruturas. Inicialmente foram realizadas apenas variações de ε_r e *r/a*, para valores fixos de *a* (periodicidade). Porém, utilizando tamanhos de malha adequados, pode-se constatar que, mesmo efetuando-se a variação também de *a*, os comportamentos em frequência para as estruturas permaneciam os mesmos para cada caso de variação ε_r e *r/a*. As curvas não foram apresentadas em sua totalidade neste trabalho justamente por serem efetivamente representadas pelos exemplos mostrados nas Fig. 2.10 e 2.11, onde se observa que praticamente não há desvios, numa mesma condição de variação de ε_r e *r/a,* para três valores diferentes de *a*. Esse fato é de extrema importância, pois indica que essa mesma metodologia pode ser aplicada para diversas faixas, partindo-se das frequências de micro-ondas, alcançando até à faixa de ondas milimétricas e os THz. Entretanto, há ainda a necessidade de se avaliar experimentalmente a validade da metodologia nessas faixas, pois, principalmente na região dos THz, podem ocorrer fenômenos cuja influência não foi devidamente prevista e estudada neste trabalho, como é o caso das ondas plasmônicas [77]. Porém, para a faixa de frequências de interesse do trabalho em questão, obteve-se um perfil geral, através do qual pode-se analisar o comportamento comparativo das grades estudadas. As Fig. 2.28 e 2.29 são um resumo geral das propriedades em frequência e atenuação para todas as grades. A partir desses dois gráficos, já é possível uma análise de qual estrutura é a mais adequada para uma determinada aplicação ou ainda, qual deve ser o comportamento de uma estrutura que se deseja desenvolver.

É importante ressaltar que um dos objetivos principais desse trabalho é a simplificação, tanto da teoria como da utilização de materiais alternativos. Apenas por esse fato é que os materiais estudados foram limitados à uma faixa de permissividade elétrica ente 1.50 e 4.50.

Porém, em estudos realizados durante o desenvolvimento deste trabalho, observou-se que a metodologia é válida para materiais com permissividades superiores a esses valores.

As grades metálicas não-magnéticas, no caso, construídas de alumínio, demonstraram o melhor desempenho em relação a todas as outras puramente dielétricas, com o fato de não ter o desempenho influenciado pela condutividade do material (Fig. 2.31). Para as estruturas metálicas, pode-se aplicar o modelo aproximado ao um meio caracterizado por plasma, conforme mencionado no Capítulo 1, cuja permissividade relativa pode ser estimada por [78]:

$$\varepsilon_{eff} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \qquad \text{Eq. 4.1}$$

onde ω_p é frequência de plasma da estrutura, que é dada por

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/R)} \qquad \text{Eq. 4.2}$$

onde a é a periodicidade da estrutura e R é o raio do condutor ($r/2$). Aplicando-se os parâmetros nominais da estrutura estudada, fornecidos pela Tab. 3.2, observa-se o seguinte comportamento para ε_{eff}::

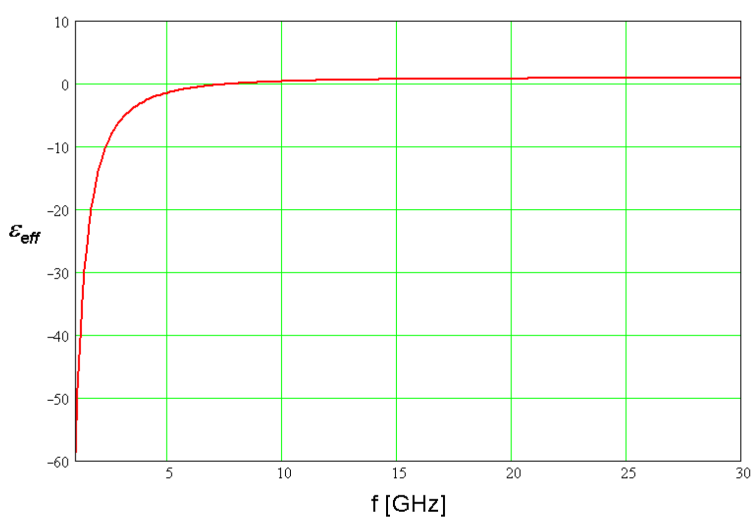


Fig. 4.1: Permissividade efetiva de estruturas metálicas.

A frequência de plasma ω_p, indicada na Fig. 4.1, pode ser obtida através da Eq. 4.2, cujo valor aproximado é de ω_p = 7.73 GHz (para ε_{eff} = 0). No caso de estruturas metálicas, a permissividade efetiva em função da frequência $\varepsilon_{eff}(\omega)$ é negativa até à frequência de plasma, e tende a permanecer abaixo de 1.00 acima dessa frequência (Fig. 4.2).

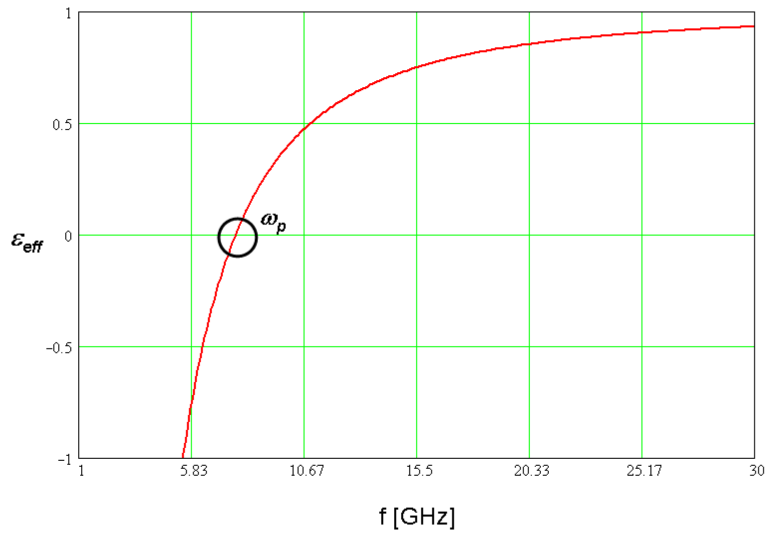


Fig. 4.2: Detalhe de $\varepsilon_{eff}(\omega)$ para estruturas metálicas.

Para as estruturas dielétricas, o cálculo de $\varepsilon_{eff}(\omega)$ é mais complexo, pois essas estruturas têm o comportamento *épsilon-quese-zero* (*ENZ - epsilon-near-zero*), cujos modelos estão sendo ainda amplamente discutidos, conforme citado no Capítulo 1.

Alguns estudos preliminares efetuados a partir da Eq. 1.14, já demonstraram que a permissividade elétrica, na região de banda proibida, para as estruturas dielétricas aqui estudadas, chegam a ter valores da ordem de 10^{-4}. Porém, tais estudos ainda precisam de um maior refinamento e uma melhor adequação do código numérico utilizado.

Outras observações em relação ao comportamento da metodologia de projeto proposta é em relação aos desvios observados em relação aos dados experimentais.

Conforme comentado, devem ser levados em consideração três tipos de desvios: do programa CST, de leitura dos dados e da interpolação polinomial realizada no programa ORIGIN LAB 8®. Os desvios observados no CST têm a magnitude de aproximadamente ±3.0%, enquanto que para a interpolação, ocorreram desvios de até ±2.00%. Devem ser adicionados ainda os desvios estruturais, apresentados nas Tab. 3.2 e 3.3, os quais influenciam sensivelmente os resultados finais. Além disso, há também uma influência da montagem de testes que, apesar de muito pequena, conforme constatado durante as medições, constitui um fator adicional de incerteza.

Em relação à atenuação dos sinais, o que se observou para todas as situações estudadas foi um desvio de ±10.00dB do valor medido em relação à metodologia proposta. Para fins de projetos exploratórios, esse valor pode ser utilizado como uma boa aproximação, porém, o modelo para a atenuação ainda está em desenvolvimento, afim de serem incluídas mais detalhadamente as diversas propriedades dos materiais dielétricos, tais como os efeitos de perdas e não-homogeneidade. Este último fator é de extrema importância principalmente quando da utilização de materiais reciclados, onde podem haver composições de várias características diferentes.

Face ao exposto, podem-se apresentar as seguintes conclusões:

- A proposta inicial de uma metodologia prática e de simples aplicação foi alcançada, uma vez que para as grades estudadas, pode-se efetuar o projeto de forma direta, acessando as tabelas, curvas e expressões contidas nos Anexos I e II;
- Os materiais de baixo custo e fácil obtenção demonstraram proporcionar efeitos similares, quando da sua aplicação em estruturas metamateriais, aos materiais nobres e de custo elevado, tais como Teflon, acrílico etc., na obtenção de bandas proibidas;
- Com a possibilidade de utilização de materiais de baixo custo, aliado à uma metodologia de fácil aplicação, obtém-se maior agilidade na pesquisa e desenvolvimento de estruturas e dispositivos baseados em metamateriais;
- A metodologia proposta demonstrou-se bastante confiável, tanto na descrição do comportamento eletromagnético das estruturas, quanto em relação aos desvios entre valores medidos e teóricos;
- E, por fim, a facilidade na utilização da metodologia, somada à possibilidade de aplicação de materiais simples, constitui um incentivo ao estudo e desenvolvimento de técnicas em eletromagnetismo e microondas, abordando de forma simples, fenômenos e teorias complexos.

Certamente, este trabalho ainda terá continuidade, não somente em função da necessidade de exploração dos pontos já citados, como também, em função de vários outros levantados e já em andamento.

4.2 Trabalhos Futuros

Em estudos teóricos realizados com o CST, pontos interessantes já foram levantados e têm sido estudados até o presente momento. Dentre eles, podem-se destacar os seguites:

- **Estruturas metamateriais esféricas**: as estruturas metamateriais construídas a partir de elementos dielétricos esféricos (Fig. 4.3) apresentaram, nas simulações, bandas proibidas de até 8.00GHz de largura. Tais estruturas ainda têm de ser implementadas na prática, para as devidas medições e comparações com valores teóricos.

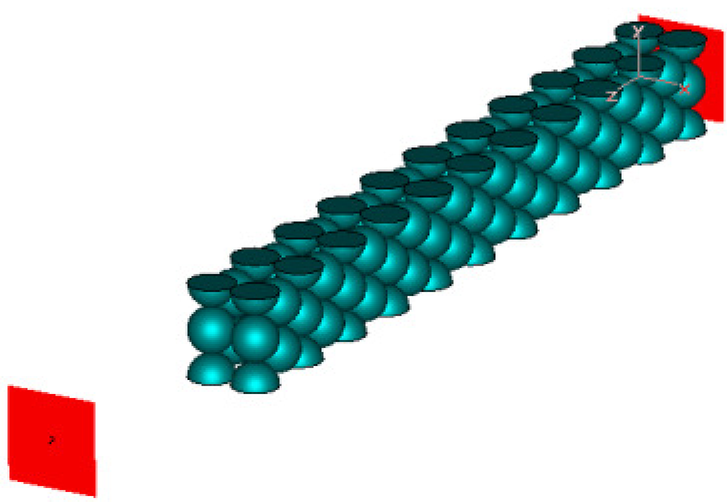


Fig. 4.3: Estruturas esféricas dielétricas.

- **Estruturas de placas paralelas**: uma metodologia similar à apresentada para os cilindros e tubos, foi desenvolvida para placas paralelas, restando apenas a sua validação experimental .

- **Estruturas Compostas**: alguns testes já demonstraram a possibilidade de composição de estruturas para otimização dos efeitos como metamateriais. Essa composição envolve não somente estruturas de tipos diferentes, mas também, variações de dimensões no corpo de um mesmo tipo de estrutura (ex.: grade composta por estrutura cilíndrica com várias distribuições de *r/a*, e materiais diferentes).

- **Defeitos:** tanto o modelo teórico no CST, quanto a montagem de ensaios demonstraram-se confiáveis para o desenvolvimento de uma metodologia de projeto para estruturas com defeitos. Esta metodologia também está em fase adiantada de desenvolvimento.

- **Estudos de permeabilidade negativa**: no presente trabalho, apenas foram apresentadas discussões sobre a permissividade. Porém, em laboratório, testes e medições já foram realizados com estruturas do tipo SSR, as quais, sobe condições particulares, têm comportamento de permeabilidade efetiva negativa, restando ainda um maior aprimoramento do modelo teórico.

- **Dispositivos metamateriais em micro-ondas e ópticas**: um dos trabalhos que serão desenvolvidos já num futuro próximo é o estudo de aplicação das estruturas estudadas em dispositivos de micro-ondas e óptica, tais como guias de ondas, divisores de potência e circuladores, visando posterior integração para aplicação na faixa do THz.

Como se pode constatar, os metamateriais oferecem um vasto campo de estudos e possibilidades de desenvolvimento, tanto no âmbito científico, como no tecnológico. Ainda, podem ser um eficiente meio de estímulo ao aprendizado do eletromagnetismo, se tratado de forma simples e acessível, através da visualização de seus vário tipos de efeitos.

Capítulo 5

Referências Bibliográficas

[1] Bose, J. C., (1898). On the rotation of plane of polarisation of electric waves by a twisted structure, Proc. Roy. Soc., Vol. 63, pp. 146–152.

[2] Lakhovsky, G. and Clement, M., (1939). Secret of Life, London, William Heinemann Medical Books Ltd.

[3] Lakhovsky, G., (1934). Apparatus With Circuits Oscillating Under Multiple Wave Lengths, UNITED STATES PATENT OFFICE Patented 1,962,565, June 12

[4] Pendry, J. B. *et al*, (1999). Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, IEEE Trans. Microwave Theory Technol. Vol. 47, pp. 2075-2084

[5] Kock, W. E., (1948). Metallic delay lenses, Bell Sys. Tech. J., vol. 27, pp. 58–82.

[6] Veselago, V.G., (1968). Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Sigma and Mu", Sov. Phys. USPEKHI, no. 10, p. 509

[7] Rotman, W., (1962). Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-Plate Media, IRE Trans. Antennas Propag., vol. AP10, no. 82, pp. 82-95, jan. 1962.

[8] Smith, D. R. *et al*, (2000). Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, Physical Rev. Lett., vol 84, no. 18, pp. 4184-4187, may 2000.

[9] Smith, D. R. *et al*, (2000). Direct Calculation of Permeability and Permittivity for a Left-Handed Metamaterial, Applied Physics Letters, vol. 77, no. 14, pp. 2246-2248, 2 oct. 2000.

[10] Ziolkowski, R.W.; Heyman, E., (2001). Wave Propagation in Media Having Negative Permittivity and Permeability, Physical Review E, vol. 64, pp. 1-15.

[11] Shelby, R.A. *et al*, (2001). Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial, Applied Physics Letters, vol. 78, no. 4, pp. 489- 491, 22 jan. 2001.

[12] Gay-Balmaz, P.; Olivier, J. F.; Martina, J., (2002). Electromagnetic Resonances in Individual and Coupled Split-Ring Resonators, Applied Physics Letters, vol. 92, no. 5, 1 Sept. 2002.

[13] Caloz, C.; Chang, C.-C. e Itoh, T., (2001). 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 dec. 2001.

[14] Pendry *et al.*, (2002). Metamaterial bends microwaves into beam, Published 23 Nov. 2002, Nature, doi:10.1038/news021118-13. *In:* www.nature.com/nsu/021118/021118-13.html

[15] Tayeb, G. et al., (2002). Compact Directive Antennas Using Metamaterials, Proceedings of the 12th International Symposium on Antennas (JINA 2002), Nice, France, Nov. 12-14, 2002.

[16] Mosalled, H. e Sarabandl, K., (2002). 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.

[17] Sartori, E. J., (2004). Estudo Experimental de Metamateriais Baseados em Grades Dielétricas, Orientador: Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa – Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2004.

[18] Sartori, E.J.; Hernández-Figueroa, H.E.; Bertuzzo, J.E., (2007). Metamaterial behaviour of low cost PVC dielectric grids, METAMORPHOSE - METAMATERIALS 2007 Congress, 22-26 October 2007, Posters Section I, pp. 380-383, Rome, Italy.

[19] Sartori, E.J.; Hernández-Figueroa, H.E.; Bertuzzo, J.E., (2007). Tunable Bandgap Metamaterials Using Low Cost Dielectric Grids, EUCAP 2007 - The Second European Conference on Antennas and Propagation, 11 - 16 November 2007, EICC, Edinburgh, UK.

[20] J. M. Hickmann , (2003). Microwave measurements of the photonic band gap in a two-dimensional photonic crystal slab, Journal Of Applied Physics, Vol. 92, Number 11, 1 Dec. 2002

[21] Fang, N. and Zhang, X., (2003). Imaging properties of a metamaterial superlens, Applied Physics Letters, Vol. 82, Issue 2, Jan, pp. 161 - 163.

[22] Kern, D. J. and Werner, D. H., (2003). A Genetic Algorithm Approach to The Design of Ultra-Thin Electromagnetic Bandgap Absorbers, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS / Vol. 38, No. 1, July 5 2003, pp 61-64.

[23] Kotsuka,Y., (2006). A Theoretical Approach to Matching Characteristics of a Novel Absorber Based on the Concept of Equivalent Transformation Method of Material Constant IEICE TRANS. ELECTRON., VOL.E89–C, Nº 1, jan. 2006.

[24] Ziolkowski, R.W., (2006). Metamaterial-Based Antennas: Research and Developments, IEICE TRANS. ELECTRON., VOL.E89–C, NO.9, sept. 2006.

[25] Schurig, D. *et al* (2006). Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, Science Express Manuscript, *In*: http://www.wfsj.org/course/docs/Cloack_Schurig-10-20-06.pdf

[26] Awai, I., (2008). Artificial Dielectric Resonators for Miniaturized Filters, Microwave Magazine, IEEE, Oct., Volume: 9, Issue: 5, pp: 55-64.

[27] Johnson, S. G., (2003). PhotonicCrystals: Periodic Surprises in Electromagnetism, MIT - USA, *In*: http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/

[28] Bloemer, M. *et al*, (2006). Metamaterials for Omnidirectional Reflectors and Hollow-Core Waveguides, Photonic Metamaterials: From Random to Periodic (META), Grand Bahama Island, The Bahamas, June 5.

[29] Johnson, N. P., (2005). Nanophotonic Structures: from Photonic Crystals to Metamaterials, IEEE ICTON 2005, pp. 171-171b

[30] Chen, H-T.(2008). Electromagnetic Metamaterials for Terahertz Applications, Terahertz Science and Technology, Vol.1, No.1, March, pp. 42-50.

[31] Engheta, N., Ziolkowski, R.W., (2006). Metamaterials: Physics and Engineering Explorations, John Wiley & Sons, Inc., USA.

[32] Smith, D. R. et al, (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, Phys. Rev. Lett., vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, May 2000.

[33] Shelby, R. A., Smith, D. R., and Schultz, S., (2001). Experimental verification of a negative index of refraction, Science, vol. 292, no. 5514, pp. 77–79, 6 Apr. 2001.

[34] Pendry J. B., (2000) “Negative refraction makes a perfect lens,” Phys. Rev. Lett., vol. 85, no.18, pp. 3966–3969, Oct. 2000.

[35] Caloz, C., Chang, C.C. and Itoh, T., (2001). Full-wave verification of the fundamental proper- ties of left-handed materials in waveguide configurations, J. Appl. Phys., vol. 90, no. 11, pp. 5483–5486, Dec. 2001.

[36] Iyer, A. K. and Eleftheriades, G. V., (2002). Negative refractive index metamaterials supporting 2-D waves, in 2002 IEEE MTT International Microwave Symposium (IMS) Digest, Seattle, WA, June 2–7, 2002, pp. 1067–1070.

[37] Caloz, C., Okabe, H., Iwai, T., Itoh, T., (2002). Transmission line approach of left-handed materials, paper presented at the 2002 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Antonio, TX, June 16–21, 2002, abstract, URSI Digest, p.39.

[38] Alú, A. and Engheta, N., (2004). Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or double-positive (DPS) layers, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-52, no. 1, pp. 199–210, Jan. 2004.

[39] Yan, C., (2008). Negative refraction with high transmission at visible and near-infrared wavelengths, Applied Physics Letters 92, 24/11/08.

[40] Yan, C., (2008). High-transmission negative refraction of discrete rod resonators confined in a metal waveguide at visible wavelengths, OPTICS EXPRESS 13818, September, Vol. 16, No. 18.

[41] Bilotti F., Alú A., Vegni, L., (2008). Design of Miniaturized Metamaterial Patch Antennas With μ-Negative Loading, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 56, NO. 6, June 2008.

[42] Greegor, R. B. *et al*, (2009). Demonstration of Impedance Matching Using a mu-Negative (MNG) Metamaterial, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8, 2009.

[43] Wongkasem, N. Akyurtlu, A., (2006). Broadband THz DNG Metamaterials for Simplified Fabrication, Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, IEEE Publication Date: 9-14 July 2006

[44] Ziolkowski, R. W. and Auzanneau, F., (1997). Passive artificial molecule realizations of dielec-tric materials, J. Appl. Phys., vol. 82, no. 7, pp. 3195–3198, Oct. 1997.

[45] Auzanneau, F. and Ziolkowski, R. W., (1998). Microwave signal rectification using artificial composite materials composed of diode loaded, electrically small dipole antennas, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 46, no. 11, pp. 1628–1637, Nov. 1998.

[46] Wittwer, D. C. and Ziolkowski, R. W., (2000). Two time-derivative Lorentz material (2TDLM) formulation of a Maxwellian absorbing layer matched to a lossy media, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 48, no. 2, pp. 192–199, Feb. 2000.

[47] Xin, H. and Zhou, R., (2007). Low-Effective Index of Refraction Medium Using Metallic Wire Array, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 9-15 June 2007, pp. 2530-2533.

[49] Grigoropoulos, N.,Young, P.R., (2003). Low cost non radiative perforated dielectric waveguides, IEEE Microwave Conference, 2003. 33rd European, 7-9 Oct. 2003, Volume: 1, pp. 439- 442.

[50] Grbic, A. and Eleftheriades, G. V., (2004). Overcoming the diffraction limit with a planar lefthanded transmission line lens, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 92, no. 11, 117403, Mar. 2004.

[51] Grbic A. and Eleftheriades, G. V., (2002). Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index metamaterial, *J. Appl. Phys.*, vol. 92, pp. 5930–5935, Nov. 2002.

[52] Caloz, C. and Itoh, T., (2003). Microwave applications of novel metamaterials, Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA'03, Torino, Italy, Sept. 2003, pp. 427–430.

[53] Caloz, C., Sanada, A., and Itoh, T., (2004). A novel composite right/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 52, pp. 980–992, Mar. 2004.

[54] Caloz, C. and Itoh, T., (2004). A novel mixed conventional microstrip and composite right/lefthanded backward wave directional coupler with broadband and tight coupling characteristics, IEEE Microwave Wireless Components Lett., vol. 14, no. 1, p. 31–33, Jan. 2004.

[55] Eleftheriades, G. G. V., Iyer, A. K., and Kremer, P. C., (2002). Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, pp. 2702–2712, Dec. 2002.

[56] Islam, R., Eleck, F., and Eleftheriades, G. V., (2004). Coupled-line metamaterial coupler having co-directional phase but contra-directional power flow, Electron. Lett., vol. 40, no. 5, pp. 315–317, Mar. 2004.

[57] Oliner, A. A., (2002). A periodic-structure negative-refractive-index medium without resonant elements, paper presented at 2002 IEEE AP-S Int. Symp./USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Antonio, TX, June 16–21, 2002, URSI Digest, p. 41.

[58] Oliner, A. A., (2003). A planar negative-refractive-index medium without resonant elements," in MTT Int. Microwave Symp. (IMS'03) Digest, Philadelphia, PA, June 8–13, 2003, pp. 191–194.

[59] Kwon, D.-H. *et al*, (2007). Zero index metamaterials with checkerboard structure, ELECTRONICS LETTERS 15th March 2007 Vol. 43 No. 6.

[60] Smith, D. R., Schultz, S., Markos, Soukoulis, P. C. M., (2002). Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients, PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 65, 195104.

[61] Ghodgaonkar, D. K. et al, (1989). Free-Space Method for Measurement of Dielectric Constants and Loss Tangents at Microwave Frequencies, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 37, NO. 3. JUNE 1989.

[62] Ghodgaonkar, D. K. et al, (1990). Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATlON AND MEASUREMENT. VOL 39. NO 2. APRIL 1990.

[63] Liu, L. *et al*, (2009). Multi-passband Tunneling Effect in Multilayered Epsilon-Near-Zero Metamaterials, Optics Express 12183, Vol. 17, Nº 14, 6 July 2009.

[64] Rodríguez-Esquerre, V. F., Koshiba, M., Hernandez-Figueroa, H. E., (2005). Frequency-Dependent Envelope Finite-Element Time-Domain Analysis of Dispersion Materials, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS / Vol. 44, No. 1, January 5 2005.

[65] Joannopoulos, J. D. *et al*, (2008). Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Princeton University Press, 2nd. Ed., New Jersey, USA, 2008.

[66] Sakoda, K., (2001). Optical Properties of Photonic Crystals, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2001.

[67] Yasumoto, H., (2006). Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystals, Taylor & Francis Group, USA, 2006.

[68] CST MWS, (2007). Photonic Crystal Simulation, CST Microwave Technology *in*: *http://www.cst.com/Content/Applications/Article/Photonic+Crystal+Simulation*, Article ID: 296, Last modified: 15. Jan 2007 5:42.

[69] Balanis, C. A., (1989). Advanced Engineering Electromagnetics, Wiley, USA, 1989.

[70] Orfanidis, S. J., (2008). Electromagnetics, Waves and Antennas, Rutgers University, New Jersey, USA, 2008.

[71] Riddle, B., Baker-Jarvis, J., Krupka, J., (2003). Complex Permittivity Measurements of Common Plastics Over Variable Temperatures, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 51, NO. 3, MARCH 2003.

[72] Nagesh, E. D. V. *et al*, (2005). Two-dimensional microwave band-gap structures of diferent dielectric materials, PRAMANA Indian Academy of Sciences, Vol. 65, No. 6, journal of December 2005, physics pp. 1115-1120.

[73] Boedeker, (2009). PVC (PolyVinyl Chloride) & CPVC (Chlorinated PolyVinyl Chloride) Specifications, Technical Data Sheet, *in:* http://www.boedeker.com/pvc_p.htm.

[74] Pozar, D. M. (1998). Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1998.

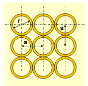
[75] Cassagne, D., Jouanin, C., and Bertho, D., (1997). Optical properties of two-dimensional photonic crystals with graphite structure, 289 Appl. Phys. Lett. 70 (3), 20 January, 1997 American Institute of Physics.

[76] Barra, A., Cassagne, D., and Jouanina, C., (1998). Existence of two-dimensional absolute photonic band gaps in the visible, APPLIED PHYSICS LETTERS VOLUME 72, NUMBER 6 9 FEBRUARY 1998.

[77] Maier, S. A., (2007). Plasmonics: Fundamentals and Applications, Springer, 2007.

[78] Meng, F.-Y., Wu, Q., (2005). Analysis and calculation of effective permittivity for a left-handed metamaterial, Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings, 4-7 Dec. 2005, Volume: 2, pp. 4.

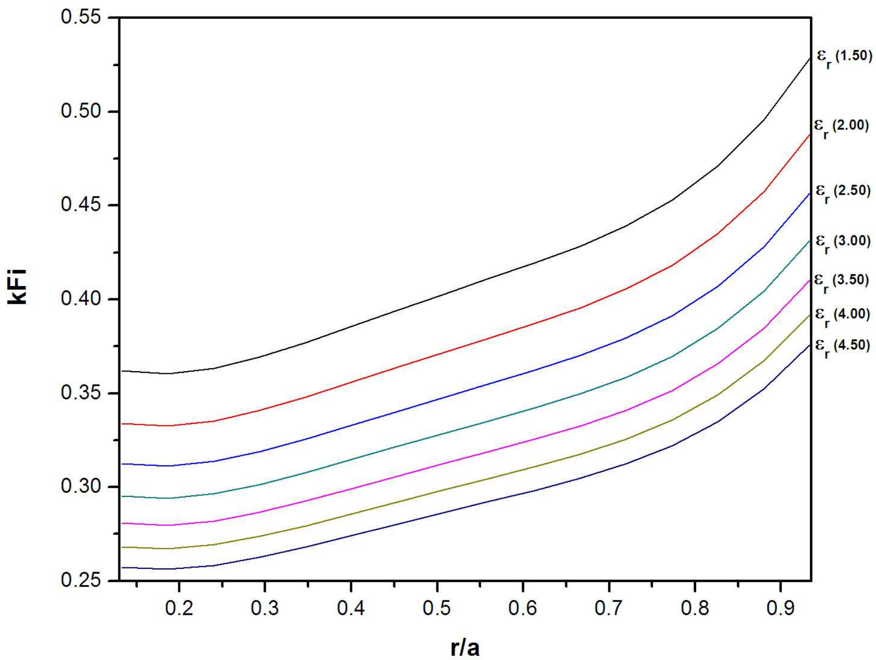
ANEXO I - Parâmetros de Projeto para *Fi* e *Ff*

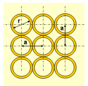


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.1: TUBOS – QD – TE – kFi

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.1333	0.3619	0.3340	0.3125	0.2953	0.2808	0.2682	0.2572
0.1867	0.3604	0.3326	0.3113	0.2941	0.2796	0.2671	0.2562
0.2400	0.3634	0.3354	0.3139	0.2966	0.2820	0.2693	0.2583
0.2933	0.3694	0.3409	0.3190	0.3015	0.2866	0.2737	0.2626
0.3467	0.3771	0.3480	0.3257	0.3077	0.2926	0.2794	0.2681
0.4000	0.3856	0.3559	0.3330	0.3147	0.2992	0.2857	0.2741
0.4533	0.3942	0.3638	0.3405	0.3217	0.3059	0.2921	0.2802
0.5067	0.4027	0.3717	0.3478	0.3286	0.3125	0.2984	0.2863
0.5600	0.4110	0.3793	0.3550	0.3354	0.3189	0.3046	0.2922
0.6133	0.4194	0.3871	0.3622	0.3423	0.3255	0.3108	0.2982
0.6667	0.4286	0.3956	0.3702	0.3498	0.3326	0.3176	0.3047
0.7200	0.4394	0.4056	0.3796	0.3586	0.3410	0.3257	0.3124
0.7733	0.4532	0.4183	0.3914	0.3698	0.3516	0.3358	0.3221
0.8267	0.4714	0.4351	0.4071	0.3847	0.3658	0.3493	0.3351
0.8800	0.4958	0.4576	0.4282	0.4046	0.3847	0.3674	0.3524
0.9333	0.5286	0.4879	0.4566	0.4314	0.4102	0.3917	0.3758
Fórmulas:	$kFi = 0.32566-0.41864(r/a)+1.77532(r/a)^2-2.50464(r/a)^3+1.30092(r/a)^4$ $kFi(\%\varepsilon r) = 1.74602-0.52461(\varepsilon_r)+0.14982(\varepsilon_r)^2-0.02404(\varepsilon_r)^3+0.00156(\varepsilon_r)^4$						

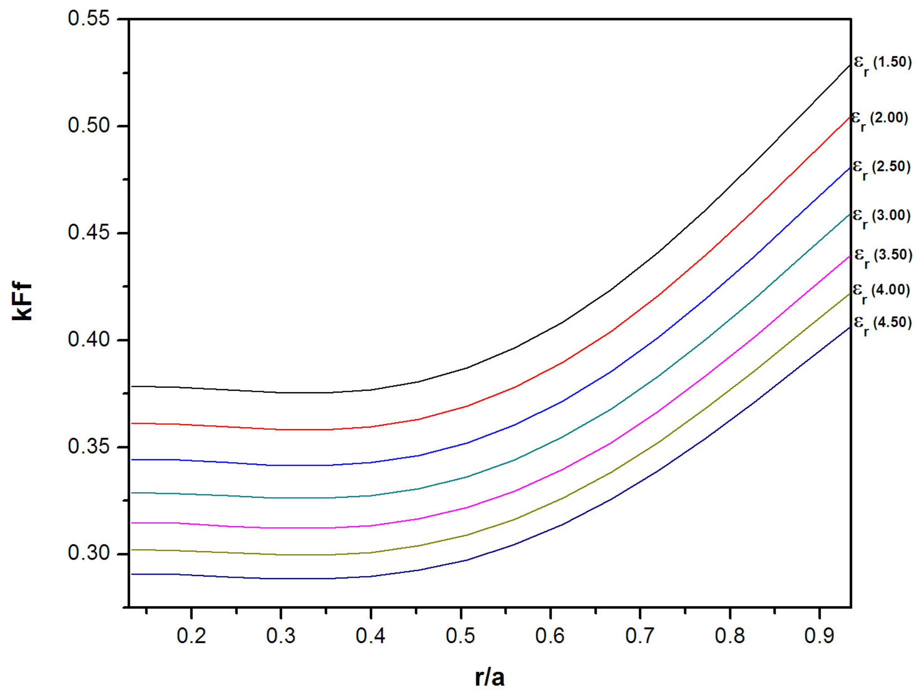


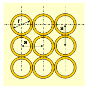


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.2:TUBOS – QD – TE – kFf

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1333	0.3786	0.3612	0.3443	0.3287	0.3147	0.3022	0.2908
0.1867	0.3781	0.3607	0.3439	0.3283	0.3143	0.3018	0.2905
0.2400	0.3768	0.3595	0.3427	0.3272	0.3132	0.3008	0.2894
0.2933	0.3756	0.3583	0.3416	0.3262	0.3122	0.2998	0.2885
0.3467	0.3754	0.3581	0.3414	0.3260	0.3121	0.2997	0.2884
0.4000	0.3769	0.3596	0.3428	0.3273	0.3133	0.3009	0.2895
0.4533	0.3807	0.3631	0.3462	0.3305	0.3164	0.3038	0.2924
0.5067	0.3870	0.3692	0.3520	0.3361	0.3217	0.3089	0.2973
0.5600	0.3963	0.3780	0.3604	0.3441	0.3294	0.3163	0.3044
0.6133	0.4085	0.3897	0.3715	0.3547	0.3396	0.3260	0.3138
0.6667	0.4236	0.4041	0.3852	0.3678	0.3521	0.3381	0.3254
0.7200	0.4413	0.4210	0.4014	0.3832	0.3668	0.3522	0.3390
0.7733	0.4613	0.4400	0.4195	0.4005	0.3834	0.3682	0.3543
0.8267	0.4830	0.4608	0.4393	0.4194	0.4015	0.3855	0.3710
0.8800	0.5057	0.4825	0.4600	0.4392	0.4204	0.4037	0.3885
0.9333	0.5287	0.5043	0.4808	0.4590	0.4395	0.4220	0.4061
Fórmulas:	kFf = $0.32015+0.15831(r/a)-0.85914(r/a)^2+1.559(r/a)^3-0.69442(r/a)^4$ kFf(%εr) = $1.28488-0.06036(\varepsilon_r)-0.03142(\varepsilon_r)^2+0.00855(\varepsilon_r)^3-6.66434E-4(\varepsilon_r)^4$						

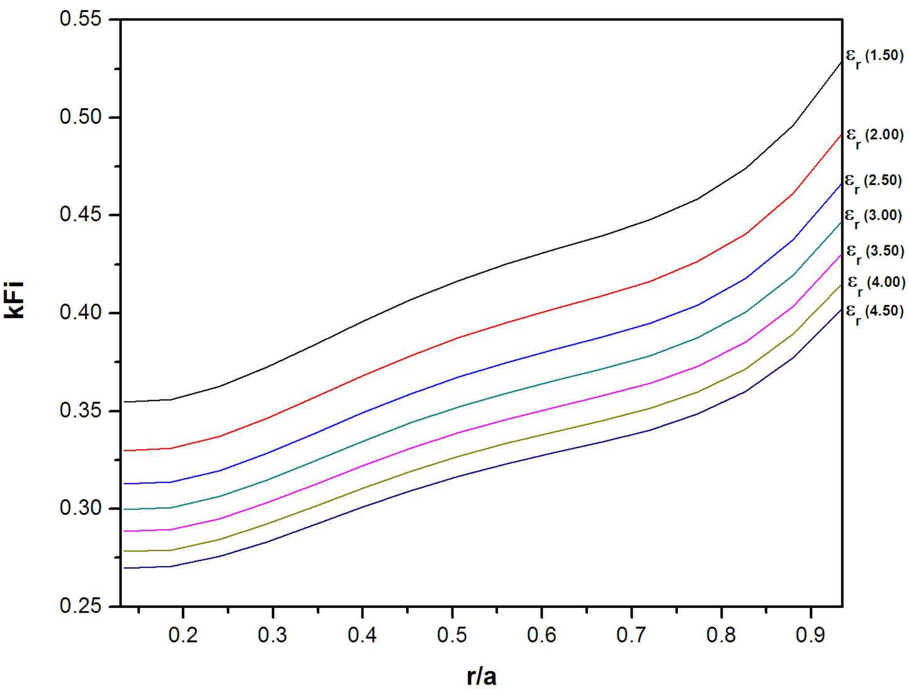


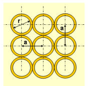


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.3:TUBOS – QD – TM – kFi

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.1333	0.3547	0.3298	0.3127	0.2998	0.2886	0.2783	0.2697
0.1867	0.3559	0.3309	0.3138	0.3008	0.2895	0.2792	0.2706
0.2400	0.3626	0.3371	0.3197	0.3065	0.2950	0.2845	0.2757
0.2933	0.3726	0.3465	0.3286	0.3149	0.3032	0.2924	0.2833
0.3467	0.3842	0.3573	0.3388	0.3247	0.3126	0.3015	0.2921
0.4000	0.3960	0.3682	0.3492	0.3347	0.3222	0.3107	0.3011
0.4533	0.4070	0.3784	0.3589	0.3440	0.3311	0.3193	0.3094
0.5067	0.4168	0.3875	0.3675	0.3522	0.3391	0.3270	0.3169
0.5600	0.4252	0.3953	0.3749	0.3593	0.3459	0.3336	0.3233
0.6133	0.4326	0.4022	0.3814	0.3656	0.3519	0.3394	0.3289
0.6667	0.4398	0.4089	0.3878	0.3717	0.3578	0.3450	0.3344
0.7200	0.4479	0.4164	0.3949	0.3785	0.3644	0.3514	0.3405
0.7733	0.4586	0.4264	0.4043	0.3876	0.3731	0.3598	0.3486
0.8267	0.4739	0.4406	0.4179	0.4005	0.3855	0.3718	0.3603
0.8800	0.4963	0.4614	0.4376	0.4194	0.4037	0.3894	0.3773
0.9333	0.5286	0.4915	0.4661	0.4467	0.4300	0.4147	0.4019
Fórmulas:	$kFi = 0.33158-0.51645(r/a)+2.45042(r/a)^2-3.61156(r/a)^3+1.84067(r/a)^4$ $kFi(\%\varepsilon r) = 1.80106-0.69517(\varepsilon_r)+0.25467(\varepsilon_r)^2-0.04719(\varepsilon_r)^3+0.00335(\varepsilon_r)^4$						

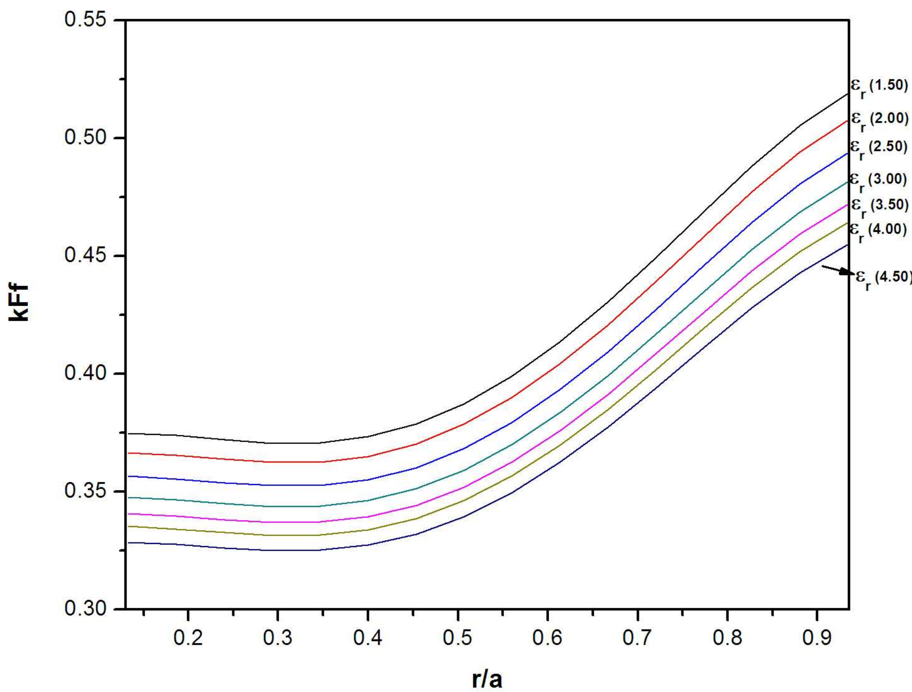


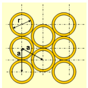


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.4:TUBOS – QD – TM – kFf

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1333	0.3748	0.3665	0.3565	0.3476	0.3407	0.3352	0.3286
0.1867	0.3738	0.3655	0.3555	0.3466	0.3398	0.3342	0.3277
0.2400	0.3720	0.3637	0.3538	0.3449	0.3381	0.3326	0.3261
0.2933	0.3706	0.3624	0.3525	0.3437	0.3369	0.3314	0.3249
0.3467	0.3708	0.3626	0.3527	0.3439	0.3371	0.3316	0.3251
0.4000	0.3733	0.3650	0.3551	0.3462	0.3394	0.3338	0.3273
0.4533	0.3787	0.3703	0.3602	0.3512	0.3442	0.3386	0.3320
0.5067	0.3872	0.3786	0.3683	0.3591	0.3519	0.3462	0.3394
0.5600	0.3988	0.3899	0.3793	0.3699	0.3625	0.3566	0.3496
0.6133	0.4134	0.4042	0.3932	0.3834	0.3758	0.3696	0.3624
0.6667	0.4305	0.4209	0.4094	0.3992	0.3913	0.3849	0.3774
0.7200	0.4493	0.4393	0.4273	0.4167	0.4084	0.4017	0.3939
0.7733	0.4689	0.4584	0.4460	0.4348	0.4262	0.4193	0.4111
0.8267	0.4881	0.4772	0.4642	0.4526	0.4436	0.4364	0.4279
0.8800	0.5053	0.4941	0.4806	0.4687	0.4593	0.4519	0.4430
0.9333	0.5190	0.5075	0.4936	0.4813	0.4718	0.4641	0.4550
Fórmulas:	$kFf = 0.33817+0.19878(r/a)-1.1803(r/a)^2+2.33238(r/a)^3-1.19765(r/a)^4$ $kFf(\%\varepsilon r) = 0.97161+0.23873(\varepsilon_r)-0.16433(\varepsilon_r)^2+0.03871(\varepsilon_r)^3-0.00318(\varepsilon_r)^4$						

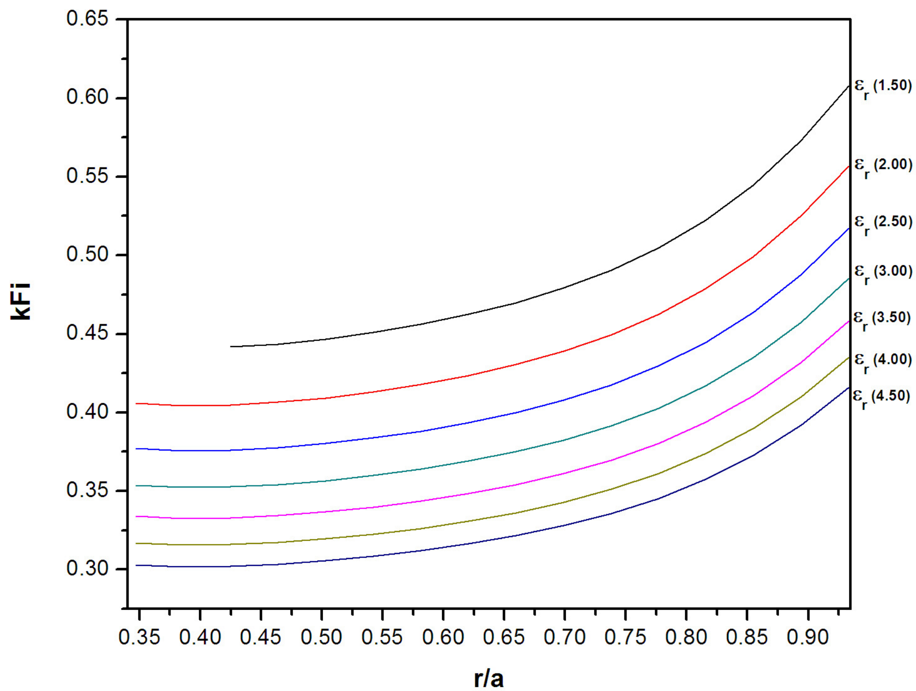


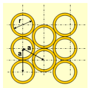


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.5:TUBOS – TR – TE – kFi

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.3467	-	0.4059	0.3771	0.3537	0.3339	0.3170	0.3031
0.3858	-	0.4044	0.3756	0.3523	0.3326	0.3157	0.3019
0.4249	0.4417	0.4047	0.3759	0.3526	0.3329	0.3160	0.3022
0.4640	0.4436	0.4064	0.3775	0.3541	0.3343	0.3173	0.3035
0.5031	0.4467	0.4092	0.3802	0.3566	0.3366	0.3196	0.3056
0.5422	0.4509	0.4131	0.3837	0.3599	0.3398	0.3225	0.3084
0.5813	0.4560	0.4178	0.3881	0.3640	0.3437	0.3262	0.3120
0.6204	0.4623	0.4235	0.3934	0.3690	0.3484	0.3307	0.3163
0.6596	0.4698	0.4305	0.3999	0.3750	0.3541	0.3361	0.3214
0.6987	0.4791	0.4389	0.4077	0.3824	0.3611	0.3427	0.3278
0.7378	0.4905	0.4494	0.4174	0.3915	0.3697	0.3509	0.3356
0.7769	0.5048	0.4625	0.4296	0.4029	0.3804	0.3611	0.3453
0.8160	0.5226	0.4788	0.4448	0.4172	0.3939	0.3739	0.3576
0.8551	0.5450	0.4994	0.4639	0.4351	0.4108	0.3899	0.3729
0.8942	0.5730	0.5250	0.4877	0.4574	0.4319	0.4100	0.3920
0.9333	0.6079	0.5569	0.5173	0.4852	0.4581	0.4349	0.4159
Fórmulas:	kFi = 0.54579-1.40095(r/a)+3.66084$(r/a)^2$-4.22901$(r/a)^3$+1.96946$(r/a)^4$ kFi(%εr) = 1.8368-0.58114(ε_r)+0.16733$(\varepsilon_r)^2$-0.02777$(\varepsilon_r)^3$+0.0019$(\varepsilon_r)^4$						

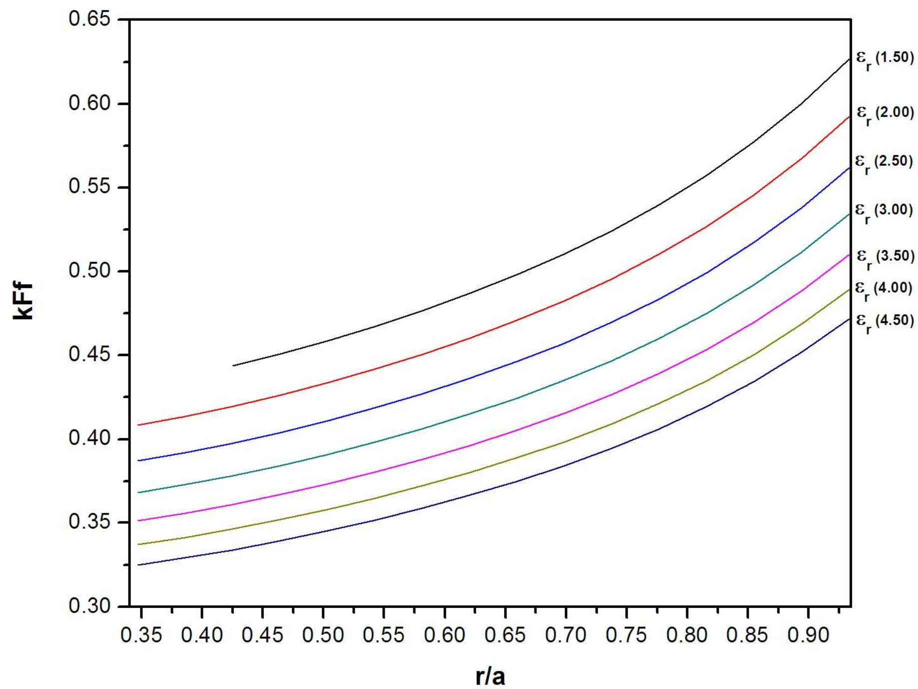


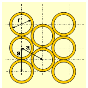


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.6:TUBOS – TR – TE – kFf

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.3467	-	0.4084	0.3871	0.3682	0.3515	0.3372	0.3251
0.3858	-	0.4135	0.3919	0.3728	0.3559	0.3414	0.3292
0.4249	0.4437	0.4195	0.3976	0.3782	0.3611	0.3464	0.3340
0.4640	0.4508	0.4262	0.4040	0.3843	0.3669	0.3519	0.3394
0.5031	0.4587	0.4336	0.4111	0.3910	0.3733	0.3581	0.3453
0.5422	0.4673	0.4418	0.4188	0.3983	0.3803	0.3648	0.3518
0.5813	0.4767	0.4506	0.4271	0.4063	0.3879	0.3721	0.3588
0.6204	0.4869	0.4602	0.4363	0.4150	0.3962	0.3800	0.3665
0.6596	0.4981	0.4708	0.4463	0.4245	0.4053	0.3888	0.3749
0.6987	0.5104	0.4825	0.4574	0.4351	0.4154	0.3984	0.3842
0.7378	0.5242	0.4956	0.4698	0.4468	0.4266	0.4092	0.3946
0.7769	0.5397	0.5102	0.4837	0.4600	0.4392	0.4213	0.4063
0.8160	0.5573	0.5269	0.4994	0.4750	0.4535	0.4350	0.4195
0.8551	0.5774	0.5458	0.5174	0.4921	0.4698	0.4507	0.4346
0.8942	0.6003	0.5675	0.5380	0.5117	0.4885	0.4686	0.4519
0.9333	0.6267	0.5925	0.5616	0.5342	0.5100	0.4892	0.4717
Fórmulas:	$kFf = 0.39696-0.39878(r/a)+1.34411(r/a)^2-1.54427(r/a)^3+0.781(r/a)^4$ $kFf(\%\varepsilon r) = 1.41009-0.17727(\varepsilon_r)+0.01499(\varepsilon_r)^2-5.02E-4(\varepsilon_r)^3+3.75989E-5(\varepsilon_r)^4$						

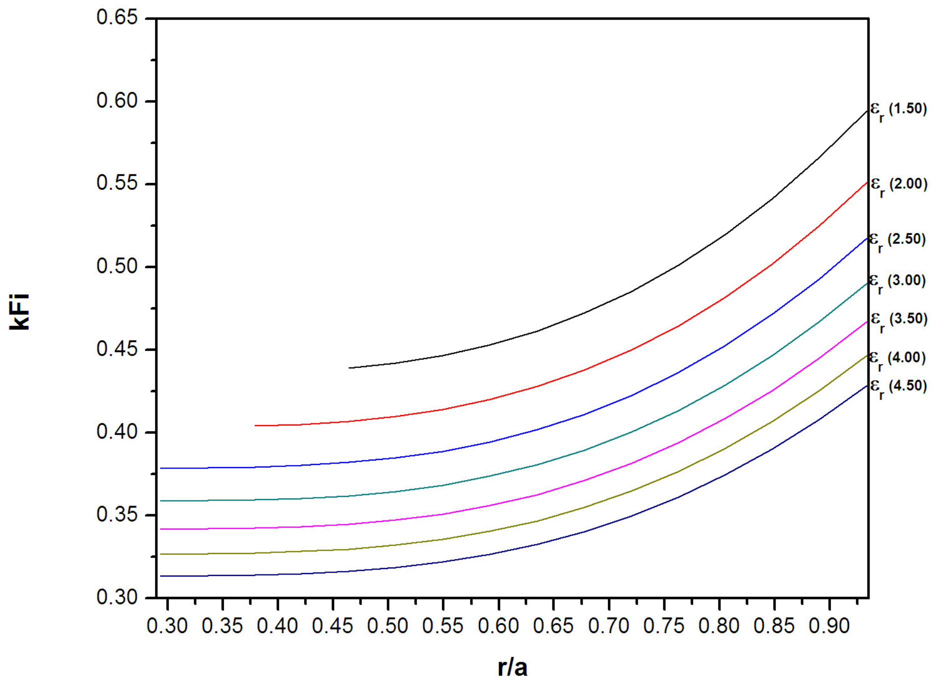


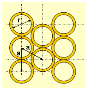


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.7:TUBOS – TR – TM – kFi

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.2933	-	-	0.3785	0.3586	0.3417	0.3268	0.3134
0.3360	-	-	0.3789	0.3590	0.3420	0.3271	0.3137
0.3787	-	0.4041	0.3794	0.3595	0.3425	0.3276	0.3141
0.4213	-	0.4051	0.3804	0.3604	0.3434	0.3284	0.3150
0.4640	0.4389	0.4069	0.3821	0.3620	0.3450	0.3299	0.3164
0.5067	0.4420	0.4099	0.3849	0.3646	0.3474	0.3323	0.3187
0.5493	0.4467	0.4142	0.3889	0.3685	0.3511	0.3358	0.3220
0.5920	0.4531	0.4201	0.3945	0.3737	0.3561	0.3406	0.3266
0.6347	0.4615	0.4279	0.4018	0.3807	0.3627	0.3469	0.3327
0.6773	0.4722	0.4378	0.4111	0.3895	0.3711	0.3549	0.3404
0.7200	0.4853	0.4500	0.4225	0.4003	0.3814	0.3648	0.3499
0.7627	0.5011	0.4646	0.4363	0.4134	0.3939	0.3767	0.3612
0.8053	0.5198	0.4819	0.4525	0.4287	0.4085	0.3907	0.3747
0.8480	0.5414	0.5020	0.4714	0.4466	0.4255	0.4070	0.3903
0.8907	0.5662	0.5250	0.4929	0.4670	0.4450	0.4256	0.4082
0.9333	0.5942	0.5510	0.5173	0.4902	0.4670	0.4467	0.4284
Fórmulas:	$kFi = 0.33214+0.2385(r/a)-0.76721(r/a)^2+0.93939(r/a)^3-0.21152(r/a)^4$ $kFi(\%\varepsilon r) = 1.68538-0.46261(\varepsilon_r)+0.12438(\varepsilon_r)^2-0.01884(\varepsilon_r)^3+0.00114(\varepsilon_r)^4$						

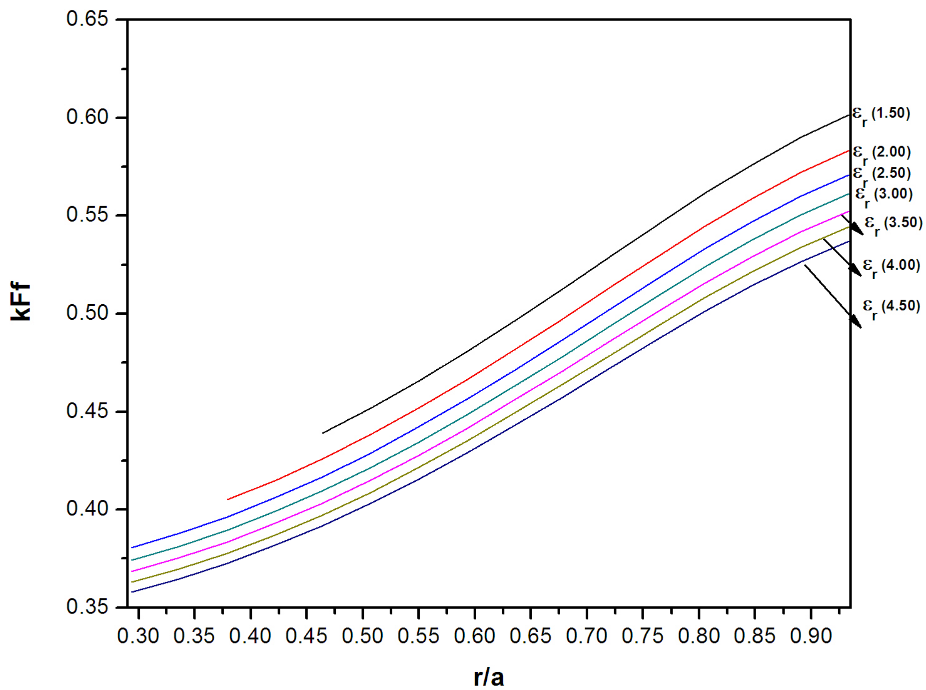


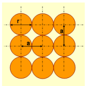


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.8:TUBOS – TR – TM – kFf

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.2933	-	-	0.3807	0.3741	0.3683	0.3629	0.3579
0.3360	-	-	0.3880	0.3813	0.3754	0.3699	0.3648
0.3787	-	0.4051	0.3964	0.3896	0.3836	0.3779	0.3727
0.4213	-	0.4149	0.4060	0.3991	0.3929	0.3871	0.3818
0.4640	0.4391	0.4260	0.4169	0.4097	0.4034	0.3974	0.3920
0.5067	0.4518	0.4383	0.4289	0.4215	0.4150	0.4089	0.4033
0.5493	0.4656	0.4517	0.4420	0.4344	0.4277	0.4214	0.4156
0.5920	0.4805	0.4662	0.4562	0.4483	0.4414	0.4348	0.4289
0.6347	0.4962	0.4814	0.4711	0.4630	0.4558	0.4491	0.4429
0.6773	0.5125	0.4972	0.4865	0.4782	0.4708	0.4638	0.4574
0.7200	0.5291	0.5133	0.5023	0.4936	0.4860	0.4788	0.4722
0.7627	0.5455	0.5293	0.5179	0.5090	0.5011	0.4937	0.4869
0.8053	0.5615	0.5448	0.5331	0.5239	0.5158	0.5082	0.5012
0.8480	0.5765	0.5593	0.5474	0.5379	0.5296	0.5218	0.5146
0.8907	0.5900	0.5724	0.5602	0.5505	0.5420	0.5340	0.5267
0.9333	0.6015	0.5835	0.5710	0.5612	0.5525	0.5443	0.5369
Fórmulas:	$kFf = 0.33729+0.15449(r/a)-0.36957(r/a)^2+1.10438(r/a)^3-0.65455(r/a)^4$ $kFf(\%\varepsilon r) = 1.30172-0.25837(\varepsilon_r)+0.0936(\varepsilon_r)^2-0.01727(\varepsilon_r)^3+0.00121(\varepsilon_r)^4$						

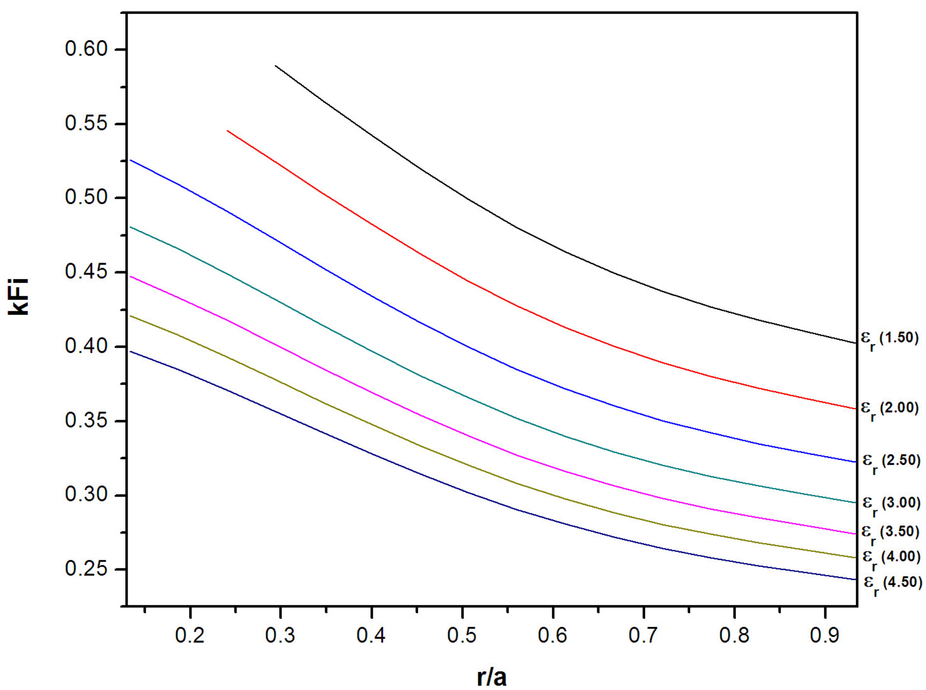


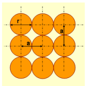


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.9:CILINDROS – QD – TE – kFi

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1333	-	-	0.5260	0.4810	0.4473	0.4212	0.3971
0.1867	-	-	0.5095	0.4659	0.4332	0.4079	0.3846
0.2400	-	0.5459	0.4913	0.4493	0.4178	0.3934	0.3709
0.2933	0.5896	0.5247	0.4723	0.4319	0.4016	0.3781	0.3565
0.3467	0.5656	0.5034	0.4530	0.4143	0.3852	0.3627	0.3420
0.4000	0.5421	0.4825	0.4343	0.3971	0.3693	0.3477	0.3278
0.4533	0.5199	0.4627	0.4165	0.3808	0.3541	0.3334	0.3144
0.5067	0.4992	0.4443	0.3999	0.3657	0.3401	0.3202	0.3019
0.5600	0.4806	0.4277	0.3849	0.3520	0.3273	0.3082	0.2906
0.6133	0.4640	0.4130	0.3717	0.3399	0.3161	0.2976	0.2806
0.6667	0.4496	0.4002	0.3602	0.3294	0.3063	0.2884	0.2719
0.7200	0.4374	0.3893	0.3504	0.3204	0.2979	0.2805	0.2645
0.7733	0.4270	0.3800	0.3420	0.3128	0.2909	0.2739	0.2582
0.8267	0.4181	0.3721	0.3349	0.3062	0.2848	0.2681	0.2528
0.8800	0.4101	0.3650	0.3285	0.3004	0.2794	0.2631	0.2480
0.9333	0.4025	0.3583	0.3225	0.2949	0.2742	0.2582	0.2434
Fórmulas:	kFi = $0.5065-0.09332(r/a)-0.87477(r/a)^2+1.27731(r/a)^3-0.52816(r/a)^4$ kFi(%εr) = $1.93914-0.40937(\varepsilon_r)-0.00806(\varepsilon_r)^2+0.02052(\varepsilon_r)^3-0.00239(\varepsilon_r)^4$						

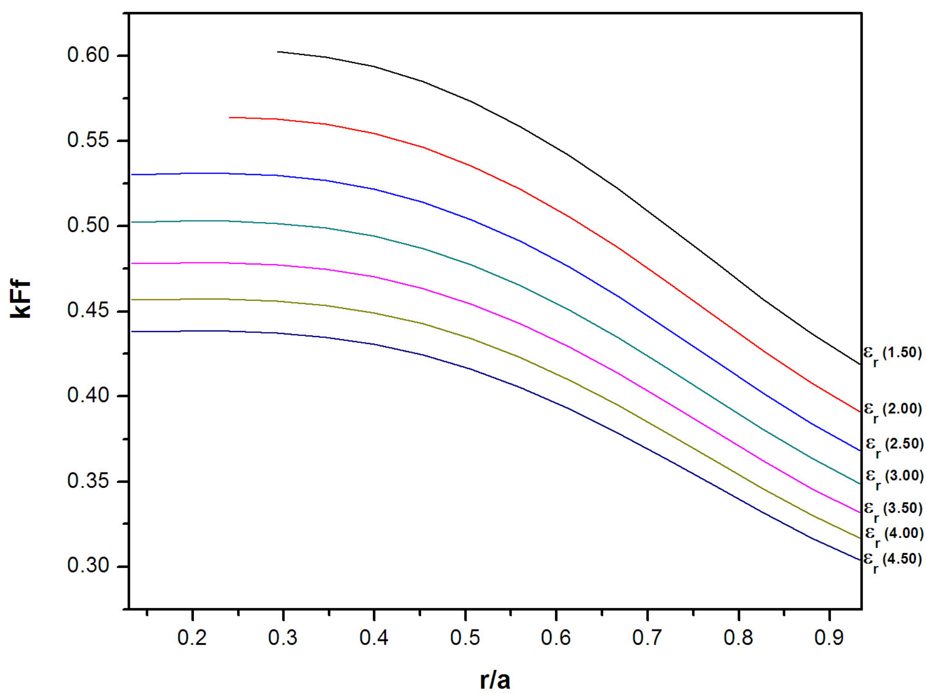


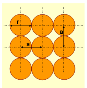


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.10:CILINDROS – QD – TE – kFf

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1333	-	-	0.5304	0.5024	0.4780	0.4566	0.4378
0.1867	-	-	0.5309	0.5028	0.4784	0.4570	0.4382
0.2400	-	0.5641	0.5309	0.5029	0.4785	0.4570	0.4382
0.2933	0.6027	0.5629	0.5298	0.5018	0.4775	0.4561	0.4373
0.3467	0.5994	0.5598	0.5269	0.4990	0.4748	0.4535	0.4348
0.4000	0.5936	0.5543	0.5218	0.4942	0.4702	0.4491	0.4306
0.4533	0.5849	0.5462	0.5142	0.4870	0.4634	0.4426	0.4243
0.5067	0.5732	0.5353	0.5039	0.4773	0.4541	0.4338	0.4159
0.5600	0.5587	0.5218	0.4911	0.4651	0.4426	0.4228	0.4053
0.6133	0.5415	0.5057	0.4760	0.4508	0.4290	0.4097	0.3928
0.6667	0.5220	0.4875	0.4589	0.4346	0.4135	0.3950	0.3787
0.7200	0.5009	0.4678	0.4403	0.4170	0.3968	0.3790	0.3634
0.7733	0.4790	0.4473	0.4211	0.3988	0.3795	0.3624	0.3475
0.8267	0.4572	0.4269	0.4019	0.3806	0.3622	0.3459	0.3317
0.8800	0.4367	0.4078	0.3839	0.3636	0.3459	0.3304	0.3168
0.9333	0.4188	0.3911	0.3682	0.3487	0.3318	0.3169	0.3039
Fórmulas:	kFf = 0.50529-0.0787(r/a)+0.58547$(r/a)^2$-1.46822$(r/a)^3$+0.79106$(r/a)^4$ kFf(%εr) = 1.57195-0.33711(ε_r)+0.07471$(\varepsilon_r)^2$-0.01053$(\varepsilon_r)^3$+6.43367E-4$(\varepsilon_r)^4$						

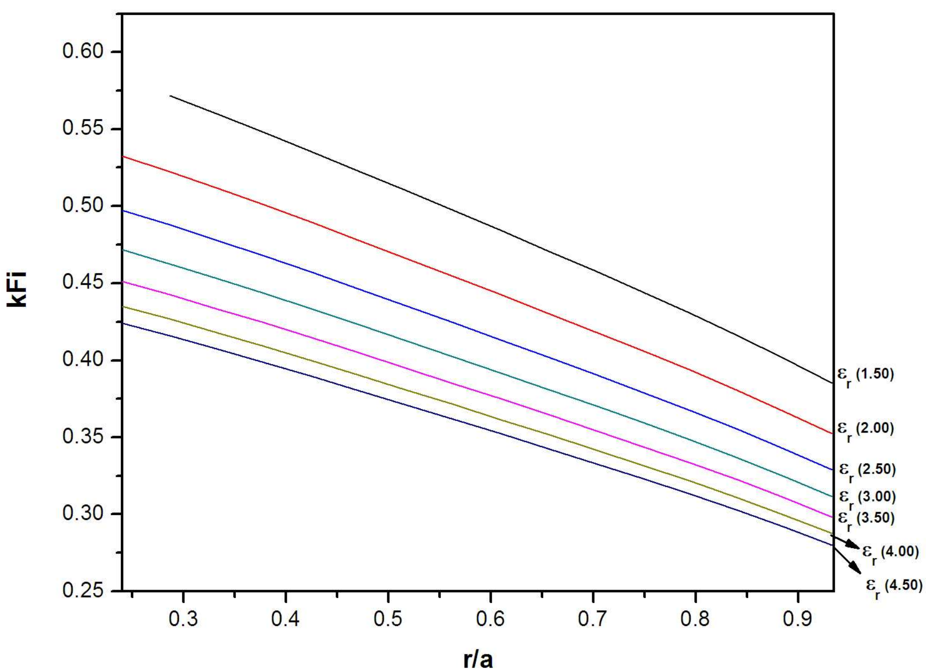


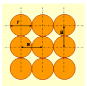


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.11:CILINDROS – QD – TM – kFi

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.2000	-	0.5433	0.5078	0.4817	0.4604	0.4429	0.4315
0.2467	-	0.5332	0.4984	0.4728	0.4518	0.4347	0.4235
0.2933	0.5733	0.5227	0.4886	0.4634	0.4429	0.4261	0.4152
0.3400	0.5613	0.5118	0.4783	0.4537	0.4337	0.4172	0.4065
0.3867	0.5489	0.5005	0.4678	0.4438	0.4241	0.4080	0.3975
0.4333	0.5362	0.4889	0.4570	0.4335	0.4143	0.3986	0.3884
0.4800	0.5233	0.4771	0.4460	0.4230	0.4043	0.3890	0.3790
0.5267	0.5101	0.4651	0.4347	0.4124	0.3941	0.3792	0.3694
0.5733	0.4967	0.4529	0.4233	0.4016	0.3838	0.3692	0.3597
0.6200	0.4832	0.4405	0.4118	0.3906	0.3733	0.3591	0.3499
0.6667	0.4694	0.4280	0.4001	0.3795	0.3627	0.3489	0.3400
0.7133	0.4556	0.4154	0.3882	0.3683	0.3520	0.3386	0.3299
0.7600	0.4415	0.4026	0.3763	0.3569	0.3411	0.3282	0.3198
0.8067	0.4273	0.3896	0.3642	0.3455	0.3302	0.3176	0.3095
0.8533	0.4130	0.3765	0.3519	0.3338	0.3191	0.3070	0.2991
0.9000	0.3984	0.3633	0.3395	0.3221	0.3078	0.2961	0.2885
Fórmulas:	$kFi = 0.51218-0.12999(r/a)-0.1794(r/a)^2+0.14341(r/a)^3-0.05095(r/a)^4$ $kFi(\%\varepsilon r) = 2.05012-0.92112(\varepsilon_r)+0.33932(\varepsilon_r)^2-0.06349(\varepsilon_r)^3+0.00465(\varepsilon_r)^4$						

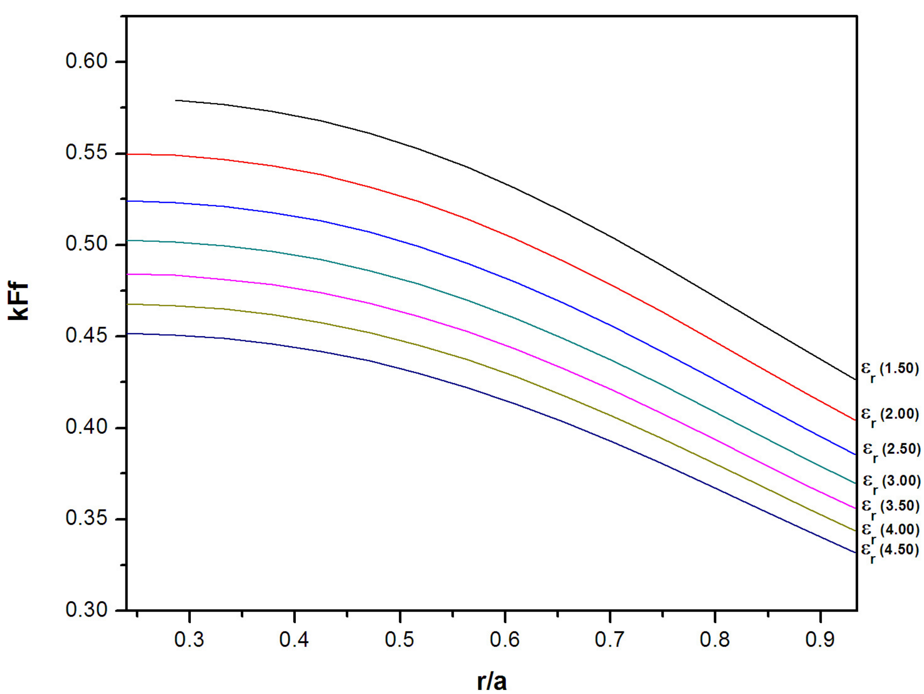




CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.12:CILINDROS – QD – TM – kFf

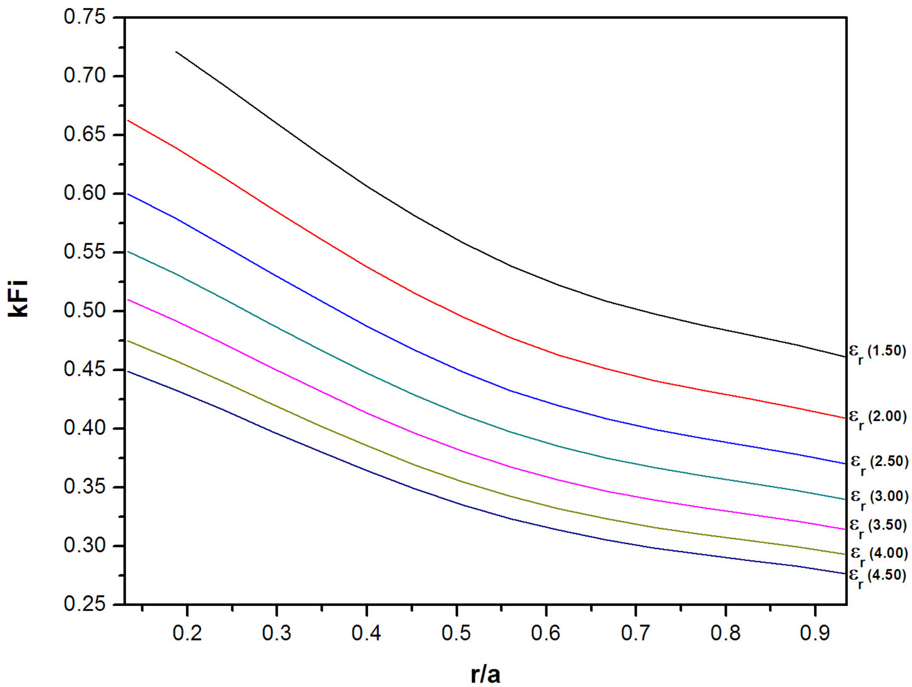
r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.2000	-	0.5476	0.5223	0.5011	0.4828	0.4660	0.4495
0.2467	-	0.5487	0.5234	0.5022	0.4838	0.4669	0.4504
0.2933	0.5788	0.5482	0.5229	0.5017	0.4833	0.4665	0.4500
0.3400	0.5766	0.5461	0.5208	0.4997	0.4814	0.4647	0.4483
0.3867	0.5725	0.5422	0.5172	0.4963	0.4781	0.4615	0.4452
0.4333	0.5668	0.5368	0.5120	0.4913	0.4733	0.4568	0.4407
0.4800	0.5593	0.5297	0.5053	0.4848	0.4670	0.4508	0.4349
0.5267	0.5502	0.5211	0.4970	0.4769	0.4594	0.4434	0.4278
0.5733	0.5395	0.5110	0.4874	0.4677	0.4505	0.4349	0.4195
0.6200	0.5275	0.4996	0.4765	0.4572	0.4405	0.4251	0.4101
0.6667	0.5142	0.4870	0.4645	0.4457	0.4294	0.4144	0.3998
0.7133	0.4999	0.4735	0.4516	0.4333	0.4174	0.4029	0.3887
0.7600	0.4848	0.4591	0.4380	0.4202	0.4048	0.3907	0.3769
0.8067	0.4691	0.4443	0.4238	0.4066	0.3917	0.3781	0.3648
0.8533	0.4532	0.4292	0.4094	0.3928	0.3785	0.3653	0.3524
0.9000	0.4374	0.4142	0.3951	0.3791	0.3652	0.3525	0.3401
Fórmulas:	kFf = 0.48287+0.13982(r/a)-0.17643(r/a)^2-0.33359(r/a)^3+0.23893(r/a)^4 kFf(%εr) = 1.42333-0.23351(ε_r)+0.04017(ε_r)-0.00309(ε_r)^3-1.86056E-5(ε_r)^4						



CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.13:CILINDROS – TR – TE – kFi

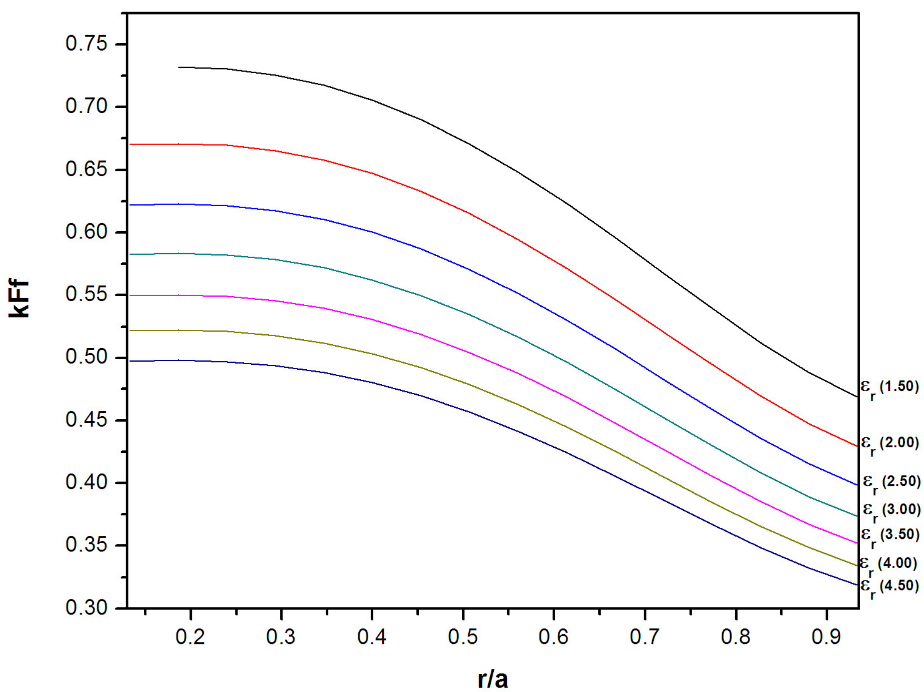
r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.1333	-	0.6628	0.6004	0.5512	0.5099	0.4750	0.4487
0.1867	0.7214	0.6395	0.5792	0.5318	0.4920	0.4582	0.4329
0.2400	0.6927	0.6141	0.5562	0.5107	0.4725	0.4401	0.4158
0.2933	0.6633	0.5880	0.5326	0.4890	0.4524	0.4214	0.3981
0.3467	0.6342	0.5622	0.5093	0.4676	0.4326	0.4029	0.3807
0.4000	0.6066	0.5378	0.4871	0.4472	0.4137	0.3854	0.3641
0.4533	0.5812	0.5153	0.4667	0.4285	0.3964	0.3692	0.3488
0.5067	0.5585	0.4951	0.4485	0.4118	0.3809	0.3548	0.3352
0.5600	0.5389	0.4777	0.4327	0.3973	0.3675	0.3423	0.3234
0.6133	0.5224	0.4631	0.4195	0.3851	0.3563	0.3318	0.3135
0.6667	0.5087	0.4510	0.4085	0.3751	0.3470	0.3232	0.3053
0.7200	0.4976	0.4411	0.3995	0.3669	0.3394	0.3161	0.2986
0.7733	0.4883	0.4329	0.3921	0.3600	0.3330	0.3102	0.2931
0.8267	0.4799	0.4254	0.3853	0.3538	0.3273	0.3048	0.2880
0.8800	0.4713	0.4178	0.3784	0.3475	0.3214	0.2994	0.2829
0.9333	0.4611	0.4088	0.3703	0.3400	0.3145	0.2929	0.2768
Fórmulas:	$kFi = 0.58283-0.1114(r/a)-1.21865(r/a)^2+1.98082(r/a)^3-0.90678(r/a)^4$ $kFi(\%\varepsilon r) = 2.33741-1.05599(\varepsilon_r)+0.35458(\varepsilon_r)^2-0.06437(\varepsilon_r)^3+0.00467(\varepsilon_r)^4$						



CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-I.14:CILINDROS – TR – TE – kFf

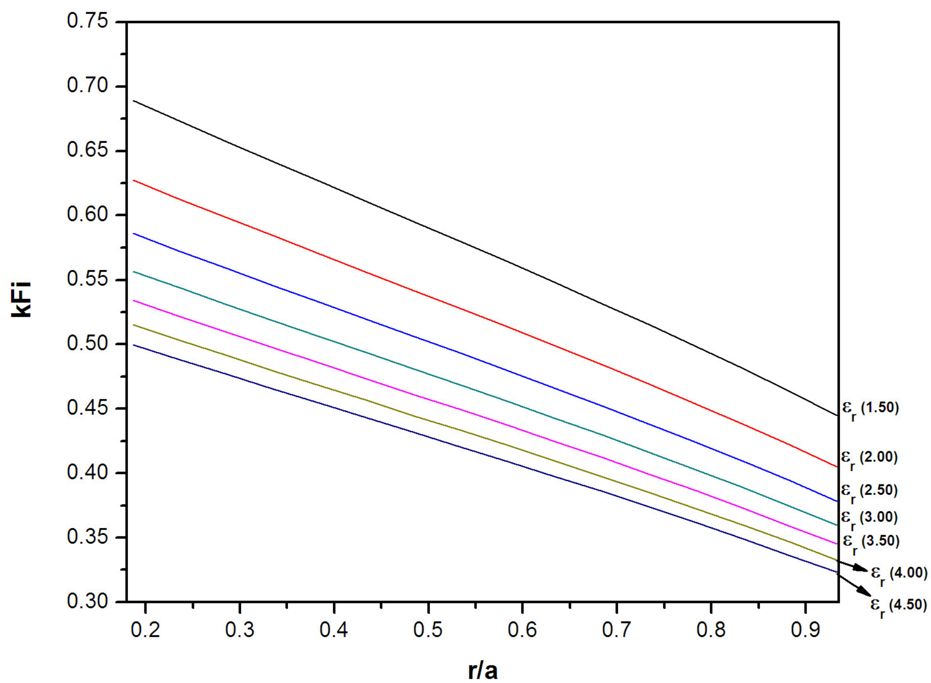
r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.1333	-	0.6702	0.6218	0.5824	0.5496	0.5215	0.4974
0.1867	0.7319	0.6710	0.6226	0.5832	0.5503	0.5221	0.4981
0.2400	0.7304	0.6696	0.6213	0.5820	0.5491	0.5210	0.4970
0.2933	0.7257	0.6654	0.6174	0.5783	0.5456	0.5177	0.4939
0.3467	0.7176	0.6579	0.6104	0.5718	0.5395	0.5119	0.4883
0.4000	0.7058	0.6471	0.6004	0.5624	0.5306	0.5035	0.4803
0.4533	0.6902	0.6328	0.5871	0.5499	0.5189	0.4924	0.4697
0.5067	0.6709	0.6151	0.5707	0.5346	0.5044	0.4787	0.4566
0.5600	0.6485	0.5945	0.5516	0.5167	0.4876	0.4626	0.4413
0.6133	0.6233	0.5715	0.5302	0.4966	0.4686	0.4447	0.4242
0.6667	0.5961	0.5465	0.5070	0.4749	0.4481	0.4252	0.4056
0.7200	0.5678	0.5206	0.4830	0.4524	0.4269	0.4051	0.3864
0.7733	0.5395	0.4946	0.4589	0.4299	0.4056	0.3849	0.3671
0.8267	0.5125	0.4699	0.4360	0.4084	0.3853	0.3656	0.3488
0.8800	0.4883	0.4477	0.4154	0.3891	0.3671	0.3484	0.3323
0.9333	0.4686	0.4296	0.3986	0.3734	0.3523	0.3343	0.3189
Fórmulas:	$kFf = 0.57465+0.04343(r/a)+0.15548(r/a)^2-1.18964(r/a)^3+0.77593(r/a)^4$ $kFf(\%\varepsilon r) = 1.7847-0.49719(\varepsilon_r)+0.12131(\varepsilon_r)^2-0.01725(\varepsilon_r)^3+0.00103(\varepsilon_r)^4$						



CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.15:CILINDROS – TR – TM – kFi

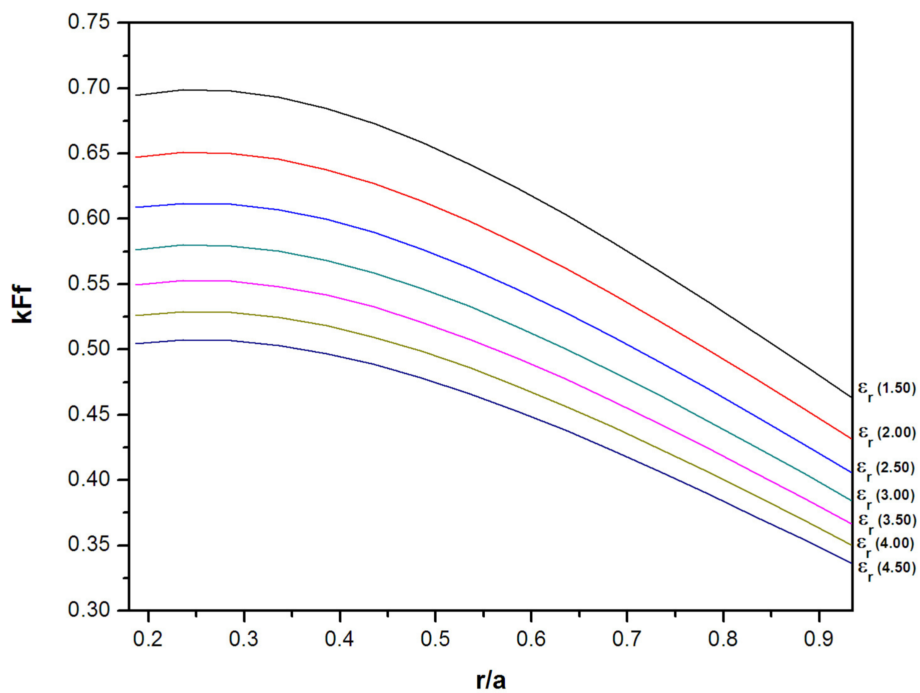
r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.1867	0.6891	0.6273	0.5860	0.5567	0.5340	0.5150	0.4999
0.2364	0.6730	0.6127	0.5723	0.5438	0.5215	0.5030	0.4883
0.2862	0.6572	0.5983	0.5589	0.5310	0.5093	0.4912	0.4768
0.3360	0.6415	0.5840	0.5455	0.5183	0.4971	0.4795	0.4654
0.3858	0.6259	0.5698	0.5323	0.5057	0.4851	0.4678	0.4541
0.4356	0.6104	0.5557	0.5191	0.4932	0.4730	0.4562	0.4429
0.4853	0.5949	0.5416	0.5059	0.4806	0.4610	0.4446	0.4316
0.5351	0.5793	0.5274	0.4926	0.4681	0.4489	0.4330	0.4203
0.5849	0.5636	0.5131	0.4793	0.4554	0.4368	0.4213	0.4089
0.6347	0.5477	0.4986	0.4658	0.4425	0.4245	0.4094	0.3974
0.6844	0.5316	0.4840	0.4521	0.4295	0.4120	0.3973	0.3857
0.7342	0.5152	0.4690	0.4381	0.4163	0.3992	0.3851	0.3738
0.7840	0.4984	0.4537	0.4238	0.4027	0.3862	0.3725	0.3616
0.8338	0.4812	0.4380	0.4092	0.3888	0.3729	0.3596	0.3491
0.8836	0.4634	0.4219	0.3941	0.3744	0.3591	0.3464	0.3362
0.9333	0.4451	0.4052	0.3785	0.3596	0.3449	0.3327	0.3230
Fórmulas:	kFi = $0.60669-0.28225(r/a)+0.06708(r/a)^2-0.04257(r/a)^3-0.01038(r/a)^4$ kFi(%εr) = $2.01869-0.85845(\varepsilon_r)+0.29377(\varepsilon_r)^2-0.05033(\varepsilon_r)^3+0.00337(\varepsilon_r)^4$						

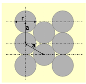


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.16:CILINDROS – TR – TM – kFf

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1867	0.6948	0.6472	0.6086	0.5766	0.5496	0.5259	0.5043
0.2364	0.6988	0.6509	0.6120	0.5799	0.5528	0.5289	0.5072
0.2862	0.6980	0.6502	0.6114	0.5793	0.5522	0.5284	0.5067
0.3360	0.6931	0.6457	0.6071	0.5753	0.5483	0.5247	0.5031
0.3858	0.6846	0.6377	0.5996	0.5682	0.5416	0.5182	0.4969
0.4356	0.6730	0.6269	0.5894	0.5585	0.5324	0.5094	0.4885
0.4853	0.6586	0.6136	0.5769	0.5466	0.5210	0.4986	0.4781
0.5351	0.6420	0.5981	0.5624	0.5329	0.5079	0.4860	0.4661
0.5849	0.6236	0.5809	0.5462	0.5175	0.4933	0.4720	0.4526
0.6347	0.6035	0.5622	0.5286	0.5009	0.4774	0.4568	0.4381
0.6844	0.5821	0.5423	0.5099	0.4832	0.4605	0.4407	0.4226
0.7342	0.5597	0.5214	0.4903	0.4646	0.4428	0.4237	0.4063
0.7840	0.5365	0.4998	0.4699	0.4453	0.4244	0.4061	0.3894
0.8338	0.5126	0.4775	0.4490	0.4254	0.4055	0.3880	0.3721
0.8836	0.4881	0.4547	0.4275	0.4051	0.3861	0.3695	0.3543
0.9333	0.4631	0.4314	0.4056	0.3844	0.3664	0.3505	0.3362
Fórmulas:	kFf = $0.52059+0.5242(r/a)-1.34411(r/a)^2+0.88902(r/a)^3-0.2334(r/a)^4$ kFf(%εr) = $1.59005-0.34809(\varepsilon_r)+0.07215(\varepsilon_r)^2-0.00836(\varepsilon_r)^3+3.68236E-4(\varepsilon_r)^4$						

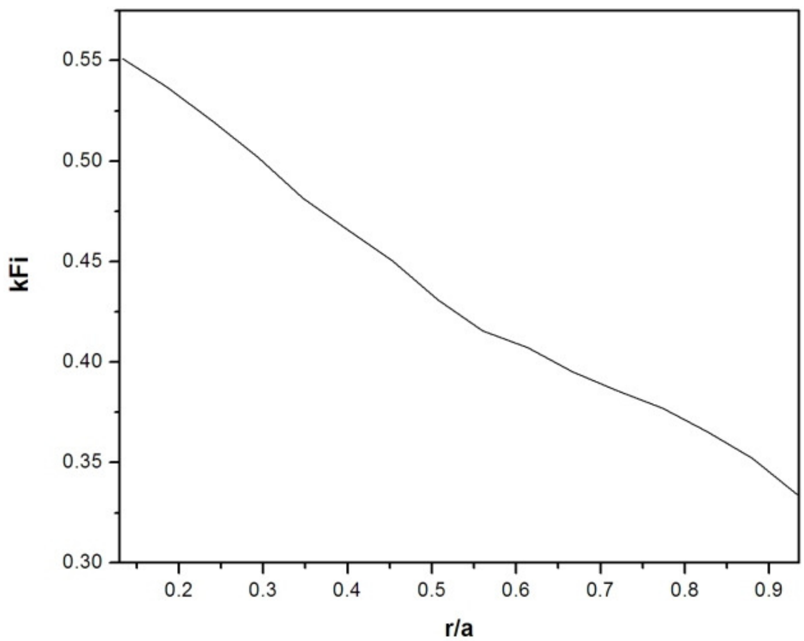




METAIS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.17.a: Metais – Distribuição Triangular - Polarização TM - kFi

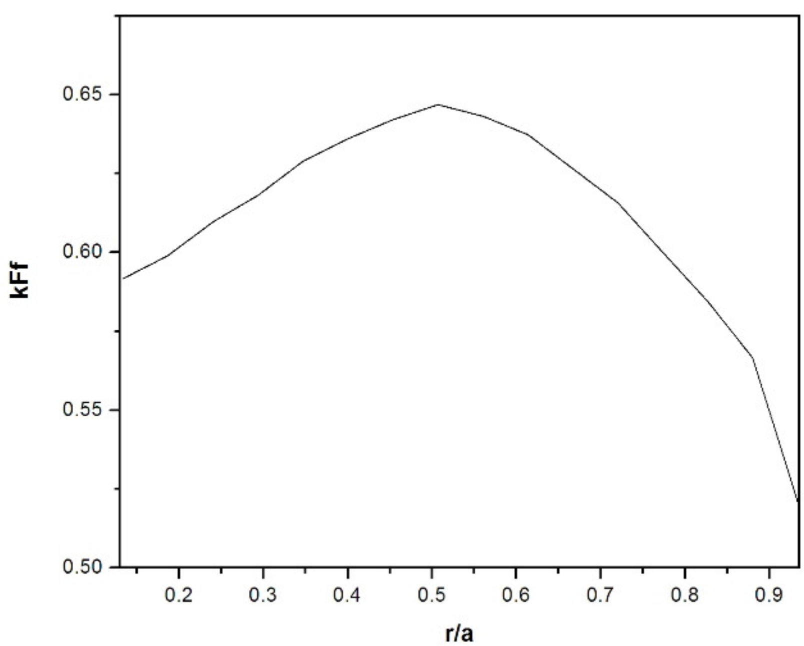
(r/a)	kFi
0.1333	0.5510
0.1867	0.5366
0.2400	0.5198
0.2933	0.5018
0.3467	0.4815
0.4000	0.4659
0.4533	0.4503
0.5067	0.4311
0.5600	0.4156
0.6133	0.4072
0.6667	0.3952
0.7200	0.3856
0.7733	0.3772
0.8267	0.3652
0.8800	0.3521
0.9333	0.3339



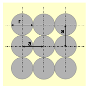
kFi = $0.55859+0.13568(r/a)-1.81779(r/a)^2+2.76091(r/a)^3-1.33392(r/a)^4$

Tab. A-I.17.b: Metais – Distribuição Triangular - Polarização TM - kFf

(r/a)	kFf
0.1333	0.5917
0.1867	0.5989
0.2400	0.6097
0.2933	0.6181
0.3467	0.6288
0.4000	0.6360
0.4533	0.6420
0.5067	0.6468
0.5600	0.6432
0.6133	0.6372
0.6667	0.6264
0.7200	0.6157
0.7733	0.6001
0.8267	0.5845
0.8800	0.5665
0.9333	0.5210



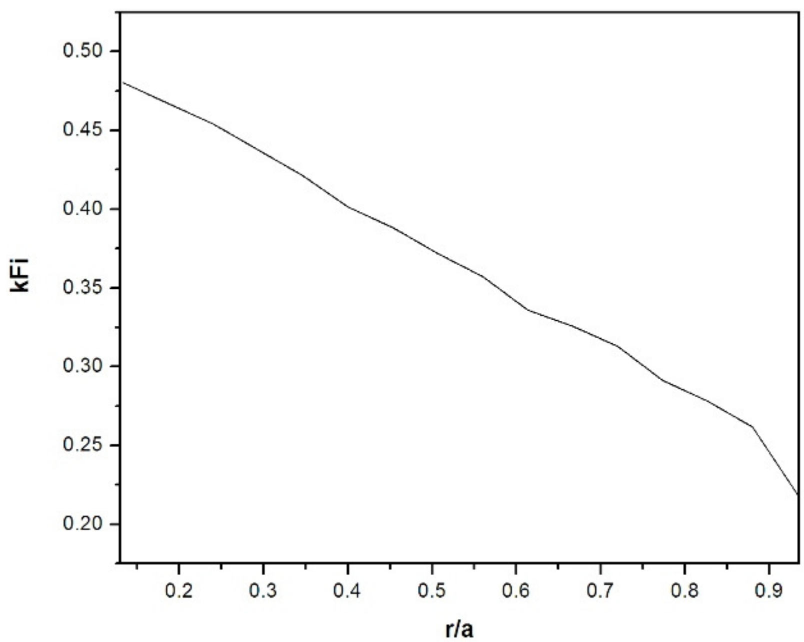
kFf = $0.56882+0.11769(r/a)+0.41196(r/a)^2-0.79223(r/a)^3+0.17593(r/a)^4$



METAIS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-I.18.a: Metais – Distribuição Quadrada - Polarização TM - kFi

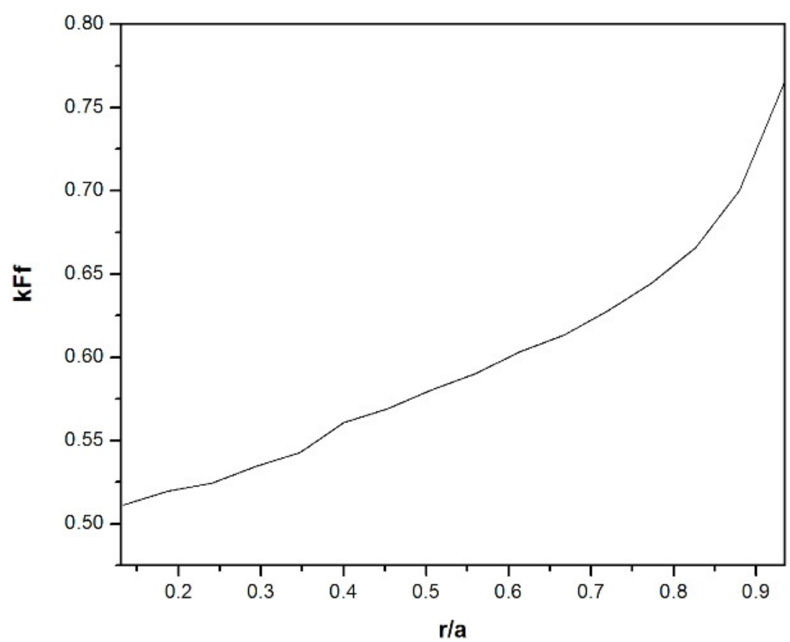
(r/a)	kFi
0.1333	0.4802
0.1867	0.4671
0.2400	0.4540
0.2933	0.4375
0.3467	0.4211
0.4000	0.4014
0.4533	0.3883
0.5067	0.3719
0.5600	0.3571
0.6133	0.3357
0.6667	0.3259
0.7200	0.3127
0.7733	0.2914
0.8267	0.2783
0.8800	0.2618
0.9333	0.2191



kFi = $0.47383+0.26284(r/a)-2.06929(r/a)^2+3.03366(r/a)^3-1.52783(r/a)^4$

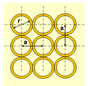
Tab. A-I.18.b: Metais – Distribuição Quadrada - Polarização TM - kFf

(r/a)	kFf
0.1333	0.5115
0.1867	0.5197
0.2400	0.5246
0.2933	0.5344
0.3467	0.5427
0.4000	0.5607
0.4533	0.5689
0.5067	0.5804
0.5600	0.5903
0.6133	0.6034
0.6667	0.6133
0.7200	0.6281
0.7733	0.6445
0.8267	0.6661
0.8800	0.7003
0.9333	0.7643



kFf = $0.56161-0.72557(r/a)+3.44854(r/a)^2-5.25567(r/a)^3+2.82581(r/a)^4$

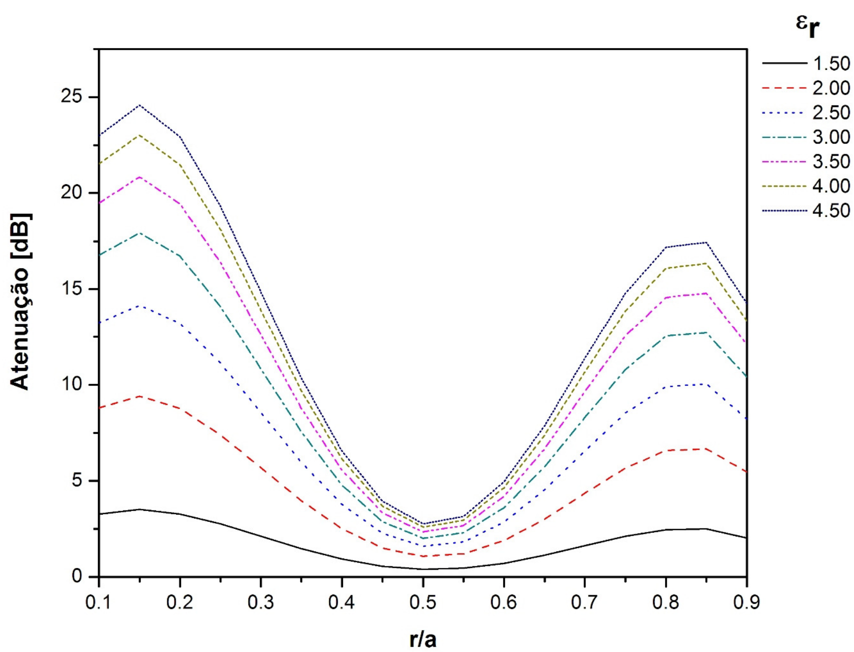
ANEXO II - Parâmetros de Projeto Atenuação *At*

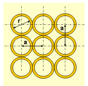


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-II.1: TUBOS – QD – TE

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1000	3.2813	8.7976	13.2491	16.7732	19.4991	21.5372	22.9910
0.1500	3.5082	9.4061	14.1654	17.9333	20.8478	23.0268	24.5811
0.2000	3.2726	8.7744	13.2141	16.7289	19.4477	21.4803	22.9303
0.2500	-	7.3929	11.1335	14.0950	16.3856	18.0982	19.3199
0.3000	-	5.6755	8.5472	10.8207	12.5793	13.8941	14.8320
0.3500	-	3.9601	5.9639	7.5503	8.7773	9.6947	10.3491
0.4000	-	-	3.7773	4.7820	5.5592	6.1402	6.5547
0.4500	-	-	-	-	3.3354	3.6840	3.9327
0.5000	-	-	-	-	-	-	-
0.5500	-	-	-	-	-	-	3.1445
0.6000	-	-	-	3.6109	4.1977	4.6364	4.9494
0.6500	-	3.0110	4.5345	5.7406	6.6735	7.3710	7.8686
0.7000	-	4.3581	6.5633	8.3091	9.6594	10.6690	11.3892
0.7500	-	5.6629	8.5282	10.7967	12.5513	13.8632	14.7990
0.8000	-	6.5764	9.9039	12.5382	14.5759	16.0994	17.1861
0.8500	-	6.6734	10.0500	12.7232	14.7909	16.3369	17.4397
0.9000	-	5.4525	8.2114	10.3956	12.0850	13.3481	14.2492
Fórmulas:	$kAt(r/a) = 2.92909+244.14225(r/a)-1221.07686(r/a)^2+1949.43812(r/a)^3-981.86122(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -1.24991+1.23705(\varepsilon_r)-0.20507(\varepsilon_r)^2+0.01523(\varepsilon_r)^3-4.82517E\text{-}4(\varepsilon_r)^4$						

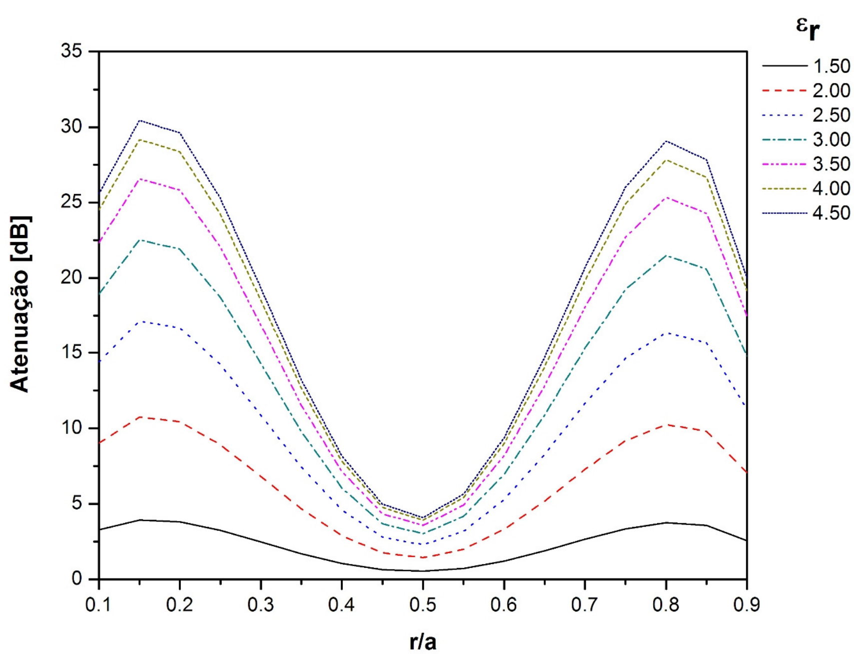


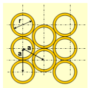


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-II.2: TUBOS – QD – TM

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1000	3.2915	9.0209	14.3941	18.9217	22.3185	24.5014	25.5857
0.1500	3.9181	10.7380	17.1340	22.5235	26.5667	29.1651	30.4559
0.2000	3.8098	10.4412	16.6605	21.9010	25.8325	28.3591	29.6142
0.2500	3.2516	8.9115	14.2196	18.6923	22.0478	24.2043	25.2755
0.3000	-	6.8060	10.8600	14.2760	16.8388	18.4857	19.3038
0.3500	-	4.6584	7.4332	9.7712	11.5253	12.6526	13.2125
0.4000	-	-	4.5930	6.0377	7.1216	7.8181	8.1642
0.4500	-	-	-	3.6758	4.3357	4.7597	4.9704
0.5000	-	-	-	3.0264	3.5697	3.9188	4.0922
0.5500	-	-	3.1729	4.1709	4.9196	5.4008	5.6398
0.6000	-	3.3045	5.2729	6.9314	8.1757	8.9753	9.3726
0.6500	-	5.1825	8.2694	10.8706	12.8220	14.0761	14.6990
0.7000	-	7.2902	11.6326	15.2916	18.0367	19.8008	20.6771
0.7500	3.3466	9.1718	14.6349	19.2383	22.6919	24.9113	26.0138
0.8000	3.7392	10.2477	16.3517	21.4950	25.3537	27.8335	29.0653
0.8500	3.5812	9.8147	15.6607	20.5868	24.2824	26.6574	27.8372
0.9000	2.5709	7.0459	11.2427	14.7791	17.4321	19.1371	19.9841
Fórmulas:	$kAt(r/a) = -9.41226+490.21156(r/a)-2282.27506(r/a)^2+3629.43711(r/a)^3-1849.09858(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -0.40306+0.0293(\varepsilon_r)+0.35475(\varepsilon_r)^2-0.09185(\varepsilon_r)^3+0.00664(\varepsilon_r)^4$						

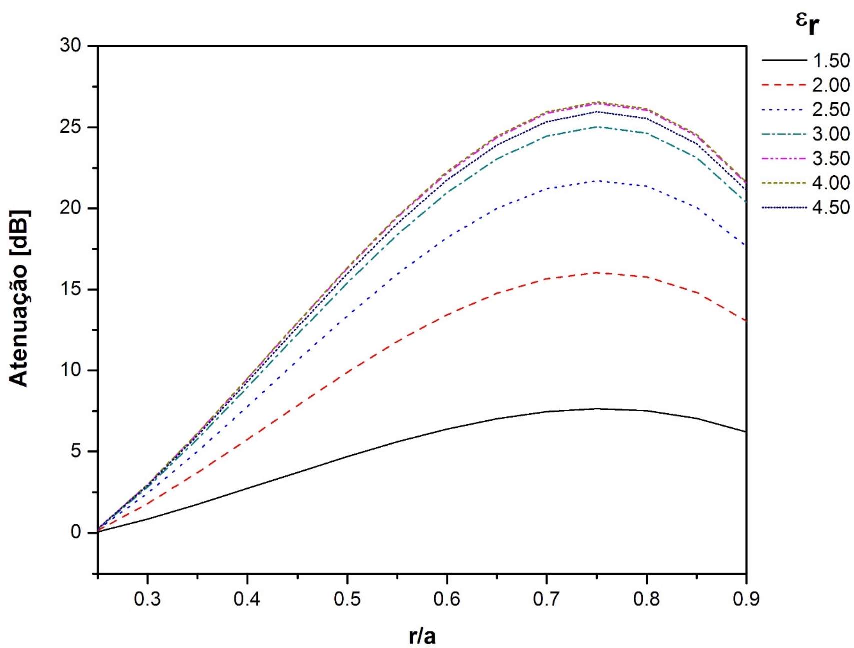


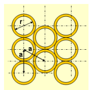


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-II.3: TUBOS – TR – TE

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.1000	-	-	-	-	-	-	-
0.1500	-	-	-	-	-	-	-
0.2000	-	-	-	-	-	-	-
0.2500	-	-	-	-	-	-	-
0.3000	-	-	-	-	-	-	-
0.3500	-	3.7077	5.0186	5.7852	6.1170	6.1393	5.9972
0.4000	-	5.7498	7.7828	8.9717	9.4862	9.5208	9.3005
0.4500	3.7314	7.8421	10.6148	12.2363	12.9380	12.9853	12.6847
0.5000	4.7046	9.8874	13.3834	15.4278	16.3125	16.3720	15.9931
0.5500	5.6095	11.7892	15.9576	18.3952	19.4501	19.5211	19.0693
0.6000	6.4003	13.4512	18.2073	20.9886	22.1921	22.2732	21.7577
0.6500	7.0314	14.7776	20.0026	23.0582	24.3804	24.4695	23.9031
0.7000	7.4574	15.6729	21.2145	24.4551	25.8575	25.9519	25.3513
0.7500	7.6330	16.0420	21.7141	25.0311	26.4664	26.5631	25.9483
0.8000	7.5132	15.7902	21.3733	24.6382	26.0511	26.1462	25.5411
0.8500	7.0531	14.8233	20.0644	23.1294	24.4558	24.5451	23.9770
0.9000	6.2081	13.0472	17.6604	20.3582	21.5256	21.6042	21.1042
Fórmulas:	$kAt(r/a) = -1.47408-45.15152(r/a)+259.65791(r/a)^2-206.67373(r/a)^3+3.9861(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -1.87016+3.15049(\varepsilon_r)-1.50404(\varepsilon_r)^2+0.35928(\varepsilon_r)^3-0.03314(\varepsilon_r)^4$						

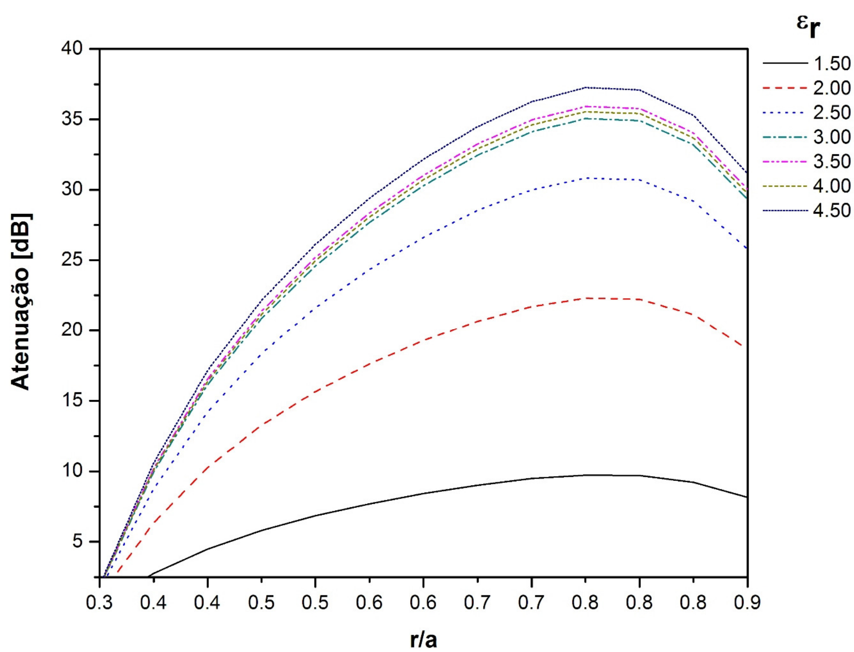


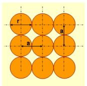


TUBOS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-II.4: TUBOS – TR – TM

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.1000	-	-	-	-	-	-	-
0.1500	-	-	-	-	-	-	-
0.2000	-	-	-	-	-	-	-
0.2500	-	-	-	-	-	-	-
0.3000	-	-	-	-	-	-	-
0.3500	-	6.3473	8.7723	9.9754	10.2233	10.1191	10.5991
0.4000	4.4832	10.2683	14.1914	16.1378	16.5388	16.3701	17.1468
0.4500	5.7960	13.2750	18.3468	20.8631	21.3816	21.1635	22.1675
0.5000	6.8356	15.6560	21.6374	24.6051	25.2166	24.9593	26.1435
0.5500	7.6907	17.6146	24.3443	27.6832	28.3712	28.0818	29.4141
0.6000	8.4130	19.2689	26.6306	30.2830	31.0356	30.7191	32.1765
0.6500	9.0166	20.6514	28.5413	32.4558	33.2624	32.9231	34.4851
0.7000	9.4785	21.7095	30.0036	34.1187	34.9666	34.6100	36.2520
0.7500	9.7386	22.3051	30.8269	35.0549	35.9261	35.5596	37.2467
0.8000	9.6993	22.2151	30.7024	34.9133	35.7810	35.4160	37.0963
0.8500	9.2258	21.1305	29.2035	33.2089	34.0342	33.6870	35.2852
0.9000	8.1460	18.6575	25.7857	29.3223	30.0510	29.7445	31.1557
Fórmulas:	$kAt(r/a) = -137.73981+885.02659(r/a)-1949.33824(r/a)^2+2095.47978(r/a)^3-881.73669(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -0.9292+0.46414(\varepsilon_r)+0.49863(\varepsilon_r)^2-0.21402(\varepsilon_r)^3+0.02274(\varepsilon_r)^4$						

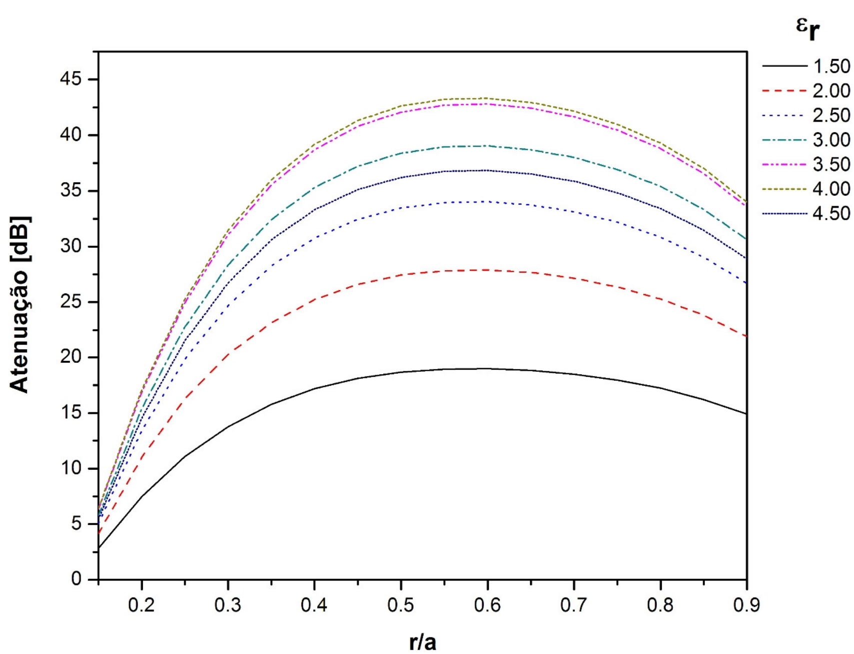


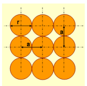


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-II.5: CILINDROS – QD – TE

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1000	-	-	-	-	-	-	-
0.1500	-	4.1494	5.0600	5.8054	6.3643	6.4436	5.4783
0.2000	7.4835	10.9969	13.4103	15.3859	16.8672	17.0774	14.5191
0.2500	11.0781	16.2791	19.8517	22.7762	24.9691	25.2802	21.4931
0.3000	13.7880	20.2614	24.7079	28.3478	31.0771	31.4644	26.7509
0.3500	15.7734	23.1789	28.2656	32.4297	35.5520	35.9950	30.6028
0.4000	17.1736	25.2364	30.7747	35.3084	38.7079	39.1902	33.3193
0.4500	18.1072	26.6084	32.4478	37.2280	40.8122	41.3208	35.1307
0.5000	18.6725	27.4391	33.4607	38.3901	42.0863	42.6107	36.2274
0.5500	18.9467	27.8421	33.9522	38.9540	42.7044	43.2366	36.7595
0.6000	18.9868	27.9010	34.0240	39.0364	42.7948	43.3280	36.8373
0.6500	18.8289	27.6689	33.7410	38.7117	42.4389	42.9676	36.5309
0.7000	18.4885	27.1687	33.1310	38.0118	41.6715	42.1908	35.8704
0.7500	17.9604	26.3927	32.1847	36.9261	40.4813	40.9857	34.8458
0.8000	17.2189	25.3031	30.8559	35.4016	38.8100	39.2936	33.4073
0.8500	16.2176	23.8316	29.0616	33.3429	36.5532	37.0086	31.4646
0.9000	14.8894	21.8799	26.6815	30.6122	33.5595	33.9777	28.8877
Fórmulas:	$kAt(r/a) = -38.08539+391.14785(r/a)-771.86572(r/a)^2+706.42274(r/a)^3-266.54472(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -1.87016+3.15049(\varepsilon_r)-1.50404(\varepsilon_r)^2+0.35928(\varepsilon_r)^3-0.03314(\varepsilon_r)^4$						

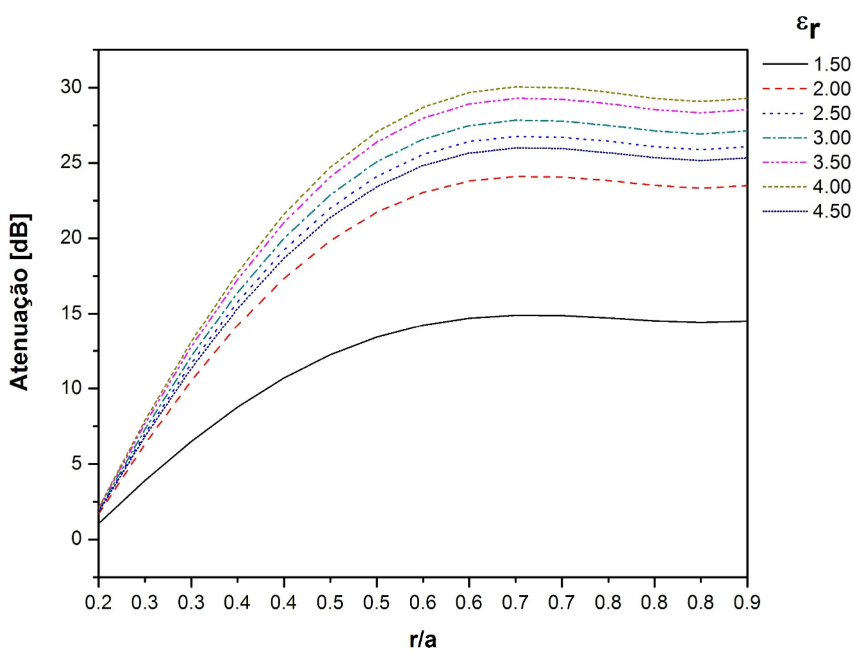


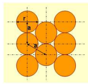


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-II.6: CILINDROS – QD – TM

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1000	-	-	-	-	-	-	-
0.1500	-	-	-	-	-	-	-
0.2000	-	-	-	-	-	-	-
0.2500	3.9122	6.3325	7.0269	7.3075	7.6901	7.8906	6.8272
0.3000	6.5094	10.5366	11.6921	12.1588	12.7956	13.1291	11.3597
0.3500	8.7873	14.2236	15.7835	16.4136	17.2731	17.7235	15.3349
0.4000	10.7093	17.3347	19.2358	20.0037	21.0513	21.6001	18.6890
0.4500	12.2560	19.8384	22.0140	22.8929	24.0917	24.7198	21.3883
0.5000	13.4251	21.7308	24.1140	25.0766	26.3899	27.0779	23.4286
0.5500	14.2313	23.0357	25.5619	26.5824	27.9745	28.7038	24.8354
0.6000	14.7061	23.8043	26.4149	27.4694	28.9079	29.6616	25.6641
0.6500	14.8985	24.1156	26.7603	27.8286	29.2860	30.0495	25.9997
0.7000	14.8740	24.0760	26.7164	27.7829	29.2379	30.0001	25.9570
0.7500	14.7156	23.8196	26.4318	27.4870	28.9264	29.6806	25.6805
0.8000	14.5230	23.5079	26.0859	27.1273	28.5479	29.2922	25.3445
0.8500	14.4132	23.3301	25.8886	26.9222	28.3320	29.0707	25.1528
0.9000	14.5200	23.5031	26.0806	27.1217	28.5421	29.2862	25.3393
Fórmulas:	$kAt(r/a) = -22.20685+114.85306(r/a)+99.63703(r/a)^2-382.41109(r/a)^3+221.31362(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -5.0916+7.90361(\varepsilon_r)-3.90797(\varepsilon_r)^2+0.858(\varepsilon_r)^3-0.06981(\varepsilon_r)^4$						

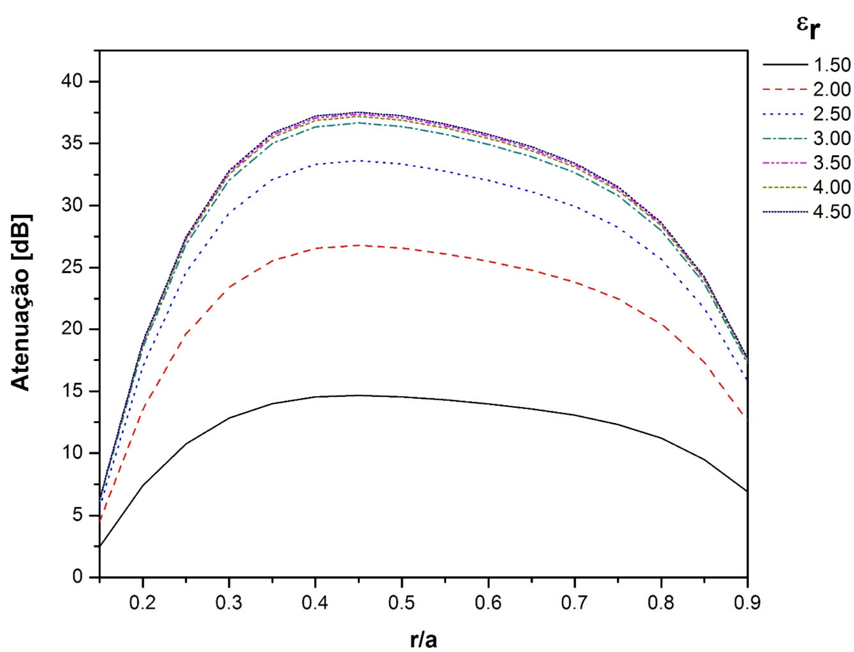


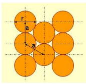


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TE

Tab. A-II.7: CILINDROS – TR – TE

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1000	-	-	-	-	-	-	-
0.1500	-	4.4938	5.6418	6.1527	6.2709	6.2391	6.2976
0.2000	7.4152	13.5337	16.9912	18.5297	18.8857	18.7901	18.9663
0.2500	10.7433	19.6079	24.6171	26.8461	27.3620	27.2235	27.4787
0.3000	12.8307	23.4175	29.4000	32.0621	32.6782	32.5128	32.8176
0.3500	14.0072	25.5648	32.0959	35.0021	35.6747	35.4941	35.8269
0.4000	14.5487	26.5531	33.3366	36.3551	37.0537	36.8662	37.2118
0.4500	14.6765	26.7864	33.6295	36.6746	37.3793	37.1902	37.5388
0.5000	14.5580	26.5701	33.3579	36.3784	37.0774	36.8898	37.2356
0.5500	14.3060	26.1102	32.7805	35.7488	36.4357	36.2513	36.5911
0.6000	13.9793	25.5140	32.0320	34.9325	35.6037	35.4235	35.7556
0.6500	13.5824	24.7896	31.1226	33.9407	34.5929	34.4178	34.7405
0.7000	13.0656	23.8462	29.9382	32.6490	33.2764	33.1080	33.4184
0.7500	12.3247	22.4940	28.2405	30.7976	31.3894	31.2306	31.5233
0.8000	11.2015	20.4440	25.6668	27.9909	28.5288	28.3844	28.6505
0.8500	9.4835	17.3085	21.7303	23.6979	24.1533	24.0311	24.2563
0.9000	6.9039	12.6005	15.8196	17.2520	17.5835	17.4945	17.6585
Fórmulas:	$kAt(r/a) = -67.73466+728.99226(r/a)-1869.9826(r/a)^2+2117.17353(r/a)^3-913.95301(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -1.87016+3.15049(\varepsilon_r)-1.50404(\varepsilon_r)^2+0.35928(\varepsilon_r)^3-0.03314(\varepsilon_r)^4$						

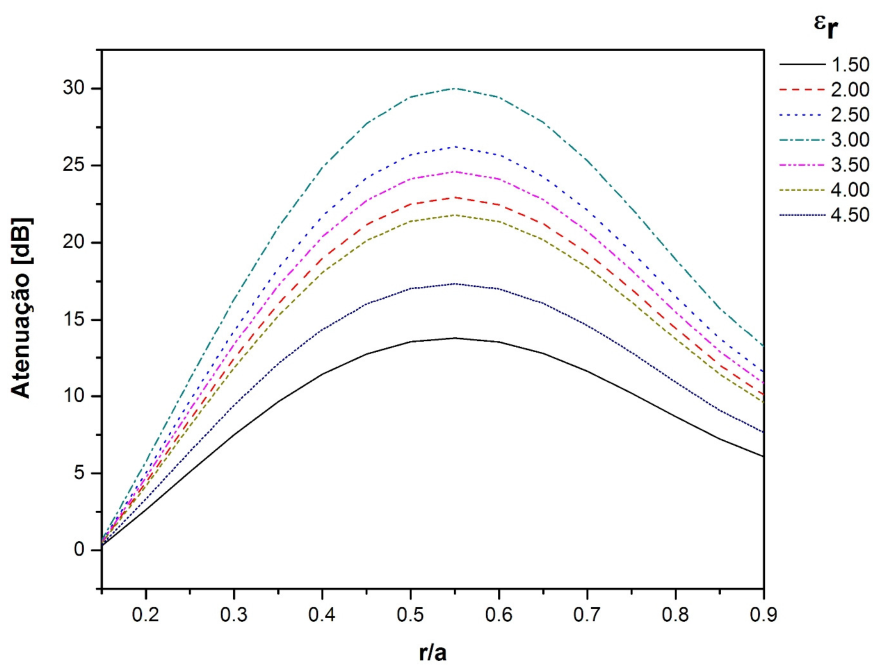


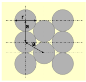


CILINDROS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-II.8: CILINDROS – TR – TM

r/a	Permissividade Relativa (ε_r)						
	1.50	**2.00**	**2.50**	**3.00**	**3.50**	**4.00**	**4.50**
0.1000	-	-	-	-	-	-	-
0.1500	-	-	-	-	-	-	-
0.2000	-	4.3954	5.0260	5.7556	4.7179	4.1805	3.3246
0.2500	5.1132	8.4972	9.7161	11.1265	9.1205	8.0816	6.4270
0.3000	7.5024	12.4675	14.2560	16.3255	13.3821	11.8578	9.4300
0.3500	9.6494	16.0354	18.3357	20.9974	17.2118	15.2512	12.1286
0.4000	11.4265	18.9886	21.7126	24.8645	20.3816	18.0599	14.3624
0.4500	12.7415	21.1738	24.2112	27.7259	22.7271	20.1382	16.0151
0.5000	13.5374	22.4964	25.7235	29.4577	24.1467	21.3961	17.0155
0.5500	13.7927	22.9207	26.2088	30.0134	24.6022	21.7997	17.3365
0.6000	13.5215	22.4700	25.6934	29.4232	24.1184	21.3711	16.9956
0.6500	12.7730	21.2262	24.2712	27.7945	22.7834	20.1881	16.0548
0.7000	11.6321	19.3303	22.1032	25.3119	20.7483	18.3849	14.6208
0.7500	10.2190	16.9819	19.4179	22.2368	18.2276	16.1513	12.8445
0.8000	8.6891	14.4396	16.5110	18.9078	15.4989	13.7334	10.9216
0.8500	7.2336	12.0208	13.7453	15.7406	12.9027	11.4329	9.0922
0.9000	6.0789	10.1019	11.5511	13.2279	10.8430	9.6079	7.6408
Fórmulas:	$kAt(r/a) = -6.58562-4.8393(r/a)+473.70453(r/a)^2-893.61636\,(r/a)^3+442.11306(r/a)^4$ $kAt(\varepsilon_r) = -3.48827+5.00447(\varepsilon_r)-2.04962(\varepsilon_r)^2+0.37399(\varepsilon_r)^3-0.02667(\varepsilon_r)^4$						

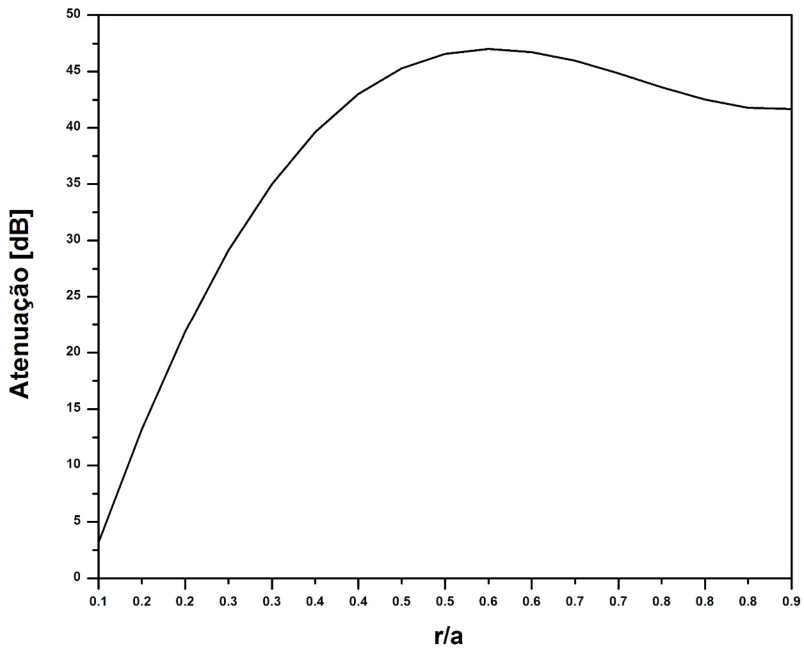




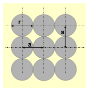
METAIS – DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-II.9: Metais – Distribuição Triangular - Polarização TM

(r/a)	At
0.1000	3.1577
0.1500	13.2239
0.2000	21.8687
0.2500	29.1163
0.3000	35.0096
0.3500	39.6109
0.4000	43.0009
0.4500	45.2798
0.5000	46.5665
0.5500	46.9988
0.6000	46.7337
0.6500	45.9470
0.7000	44.8335
0.7500	43.6071
0.8000	42.5004
0.8500	41.7652
0.9000	41.6722



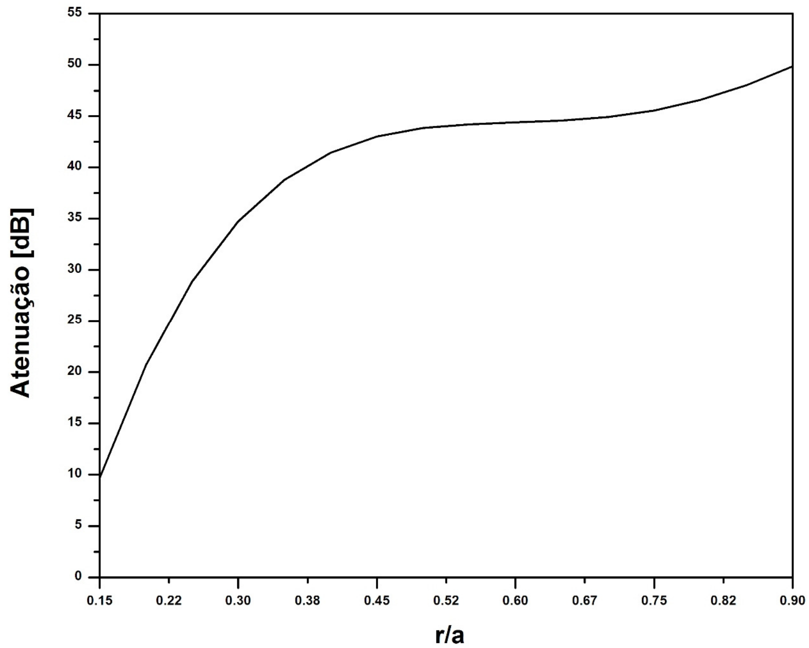
$kAt(r/a) = -21.24047+272.04775(r/a)-276.29139(r/a)^2-56.3801(r/a)^3+126.45455(r/a)^4$



METAIS – DISTRIBUIÇÃO QUADRADA - POLARIZAÇÃO TM

Tab. A-II.10: Metais – Distribuição Quadrada - Polarização TM

(r/a)	At
0.1000	-
0.1500	9.7107
0.2000	20.6737
0.2500	28.8587
0.3000	34.7555
0.3500	38.8135
0.4000	41.4414
0.4500	43.0070
0.5000	43.8377
0.5500	44.2199
0.6000	44.3996
0.6500	44.5818
0.7000	44.9312
0.7500	45.5716
0.8000	46.5859
0.8500	48.0168
0.9000	49.8658



$$kAt(r/a) = -45.35706+502.0881(r/a)-1028.31115(r/a)^2+897.45334(r/a)^3-271.25112(r/a)^4$$