

Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação na área de Microondas e Optoeletrônica.

Francisco Eduardo de Carvalho

**CARACTERIZAÇÃO DA ANISOTROPIA NA
PERMISSIVIDADE COMPLEXA EM COMPÓSITOS DE
FIBRA CARBONO**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:


Prof. Dr. Alberto José de Faro Orlando
Orientador

Prof. Dr. Celso Massaki Hirata
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Carvalho de, Francisco Eduardo

Caracterização da Anisotropia na Permissividade Complexa em Compósitos de Fibra Carbono / Francisco Eduardo de Carvalho

São José dos Campos, 2009.

Número de folhas no formato 123f.

Tese de mestrado – Engenharia Eletrônica e Computação, Microondas e Optoeletrônica
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009. Orientador: Ph, D. Alberto José de Faro Orlando.

1. Anisotropia. 2. Permissividade elétrica. 3. Fibra de Carbono. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Ensino à qual está vinculado o orientador. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE CARVALHO, Francisco Eduardo. - **Caracterização da Anisotropia na Permissividade Complexa em Compósitos de Fibra Carbono**. 2009. 123f. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação - área de optoeletrônica e microondas – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Francisco Eduardo de Carvalho

TÍTULO DO TRABALHO: Caracterização da Anisotropia na Permissividade Complexa em Compósitos de Fibra Carbono.

TIPO DO TRABALHO / ANO: Tese / 2009

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Francisco Eduardo de Carvalho
R. Celso Vilhena Vieira, 53, Vista Verde

**CARACTERIZAÇÃO DA ANISOTROPIA NA
PERMISSIVIDADE COMPLEXA EM COMPÓSITOS DE
FIBRA CARBONO**

Francisco Eduardo de Carvalho

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Marques.	Presidente – ITA
Prof. Dr. Alberto J. de Faro Orlando	Orientador – ITA
Prof. Dr. Pedro José de Castro	Membro Externo – INPE
Prof. Dr. Antonio C. C. Migliano	Membro Externo – IEAv
Prof. Dr. Gefeson M. Pacheco	Membro Interno – ITA

ITA

Dedicatória

Dedico este trabalho...

Aos meus filhos, para que se torne um exemplo de luta ...

À minha esposa, que me incentivou em todos os momentos dessa luta...

Aos meus pais, que me ensinaram a perseverar na luta e combater o bom combate.

Agradecimentos

Ao meu orientador, o professor Alberto José de Faro Orlando e os demais professores do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) que participaram desta etapa da minha formação.

Ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv) por disponibilizar sua infraestrutura e possibilitar a realização de todos os experimentos no Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos (LSE). Particularmente, quero agradecer ao Professor Antônio Carlos da Cunha Migliano, responsável pelo LSE, por acompanhar e orientar a parte experimental deste trabalho.

Ao Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial, que incorpora as instituições supracitadas e um corpo técnico de alto nível de capacitação, para dar suporte as atividades técnico-científicas relacionadas à pesquisa e o desenvolvimento do setor aeronáutico.

*Há homens que lutam um dia e são bons.
Há outros que lutam um ano e são melhores.
Há os que lutam muitos anos e são muito bons.
Porém, há os que lutam toda a vida.
Esses são os imprescindíveis.*

Bertolt Brecht

Resumo

A caracterização da anisotropia na permissividade relativa complexa do Compósito de Fibra de Carbono (CFC) tornou-se importante para avaliar os efeitos diretos e indiretos causados por impacto de raio em aeronaves construídas com esse material. Esta importância está associada à relação que existe entre a blindagem eletromagnética utilizada para proteger os equipamentos de bordo e a permissividade do CFC. Devido a estas relações e sua relevância para a indústria aeronáutica, foi realizada uma extensa investigação da permissividade do CFC.

Foram medidas as partes real e imaginária (ϵ' e ϵ'') da permissividade na faixa de frequência de 1 kHz a 10 MHz, a 25°C, a partir de amostras cilíndricas extraídas de uma mesma placa multicamadas de CFC, com seus eixos ortogonais entre si e paralelos aos eixos cartesianos. Os resultados destas medidas foram compilados em uma base de dados para serem utilizados em um software de simulação baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). Como resultado, foi possível representar em três eixos o campo próximo e a intensidade da energia eletromagnética a que pode ser submetida uma estrutura de CFC com geometria arbitrária no espaço tridimensional de uma placa de CFC do material iluminada pela componente elétrica. Além disso, foi observada a anisotropia entre os planos YZ e YX, apontando que a maior anisotropia ocorre na direção do eixo Y. O material analisado apresentou baixa perda, com ϵ'' tendendo assintoticamente a zero.

Abstract

The anisotropy characterization of the complex relative permittivity of the Carbon Fiber Composite (CFC) has become important to evaluate the direct and indirect damage effects caused by lightning strike in aircrafts built with this material. This importance is associated with the relation that exists between the electromagnetic shielding used to protect the airborne equipment and the CFC permittivity. Due to this relation and its relevance to the aeronautic industry thorough investigation of the CFC permittivity was performed.

The real and imaginary parts (ϵ' e ϵ'') of the permittivity have been measured in the frequency range from 1kHz through 10 MHz, at 25°C, from cylindrical samples extracted from a multilayer plate of CFC, with it axis mutually orthogonal and parallel to this Cartesian axis. The results from those measurements were compiled in the data base to be used in a software simulation based in the Finite Difference Time Domain Method (FDTD). As a result, it was possible to represent the near field and the electromagnetic energy intensity that a CFC structure can be submitted with arbitrary geometry in the three-dimensional space of a multilayer plate of the material being illuminated by electrical component. In addition, the anisotropy between YZ and YX plans was observed, indicating that the greatest anisotropy occurs in the Y axis. The analyzed materials shows low loss, with ϵ'' tending asymptotically to zero.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	(a) Potencial a que fica Submetida a Estrutura em Função de seu Efeito Resistivo; (b) Acoplamento do Campo Magnético; (c) Acoplamento do Campo Elétrico.	20
Figura 2	Ocorrência de Centelha em junção de CFC.	22
Figura 3	Laboratório de Alta Tensão e Alta Corrente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)	23
Figura 4	Estrutura de Compósito Painel Múltiplo.	33
Figura 5	Estrutura com Painel Simples de Fibra de Material Composto	35
Figura 6	Modelo não Homogêneo de Painel com 3 Camadas	37
Figura 7	Seção Cruzada Típica de uma Matriz de Fibra	38
Figura 8	Meio Laminado Periódico,	38
Figura 9	Coordenada de Transformação para Painel Simples com Estrutura de Fibra de Carbono.	40
Figura 10	Modelo Homogêneo de 3 Camadas,	41
Figura 11	Representação para o Período da Célula do Modelo Homogêneo de 3 Camadas	41
Figura 12	Modelo Homogêneo de 1 Camada	42
Figura 13	Representação do Período da Célula para o Modelo Homogêneo de 1 Camada,	43
Figura 14	Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Painel de Fibra Compósito Simples com: $D = 0,05$ mm, $p = 0,1$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ e $\sigma_b = 10000$ S/m.	46
Figura 15	Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Painel de Fibra Compósito Simples com: $D = 0,05$ mm, $p = 0,1$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ e vários valores de σ	47
Figura 16	Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Painel de Fibra Compósito Simples com: $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$. λ é o comprimento de onda no espaço livre e o campo E é ortogonal as fibras.	48

Figura 17	Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Pannel de Fibra Compósito Simples com: $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$ S/m. λ_o é o comprimento de onda no espaço livre	48
Figura 18	Compósito de Fibra de duas Camadas com: $D = 7.5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm	50
Figura 19	Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Fibra de Compósito de duas Camadas com: $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$ S/m.	51
Figura 20	SE para uma Fibra de Compósito de duas Camadas com: $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$ S/m.	53
Figura 21	SE para uma Fibra de Compósito de Camada Simples com: $D = 0,05$ mm, $P = 0,10$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ para ambos $\sigma = 1$ S/m. e $\sigma = 1 \cdot 10^4$ S/m. o campo E incidente está paralelo às fibras	54
Figura 22	SE para quatro Painéis de Fibra Compósito com cada Pannel tendo: $D = 0,05$ mm, $P = 0.10$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ para ambos $\sigma = 1$ S/m. e $\sigma = 1 \cdot 10^4$ S/m. O campo E incidente é ortogonal às fibras no primeiro pannel	55
Figura 23	SE para dois Painéis de Fibra Compósito com cada Pannel tendo: $D = 0,05$ mm, $P = 0.10$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ para ambos $\sigma = 1$ S/m. e $\sigma = 1 \cdot 10^4$ S/m. O campo E incidente é ortogonal às fibras no primeiro pannel.	56
Figura 24	(a) Placa de CFC de 60 Camadas; (b) Amostras Retiradas de 3 Eixos	62
Figura 25	Amostra usinada	63
Figura 26	(a) Seleção Visual das Amostras ; (b) Teste Passa-Não Passa no Conector.	64
Figura 27	Montagem da Ligação do Analisador de Impedância e Fase no PC.	65
Figura 28	(a) Configuração da bancada de teste;(b)Detalhe do Porta Amostras HP 1608	66
Figura 29	Gráficos representando o comportamento da permissividade relativa Real (curva azul) e Imaginária (curva amarela)	67
Figura 30	Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo X . Componente Real.	68
Figura 31	Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo X . Componente Imaginária	68
Figura 32	Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo Y. Componente Real.	69
Figura 33	Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo Y. (Componente Imaginária	69

Figura 34	Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo Z .(a) Componente Real.	70
Figura 35	Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo Z. Componente Imaginária	70
Figura 36	Resultado final para o eixo X: Permissividade Real.	72
Figura 37	Resultado final para o eixo X: Permissividade Imaginária.	72
Figura 38	Resultado final para o eixo Y: Permissividade Real.	73
Figura 39	Resultado final para o eixo Y: Permissividade Real.	73
Figura 40	Resultado final para o eixo Z: Permissividade Real.	74
Figura 41	Resultado final para o eixo Z: Permissividade Imaginária.	74
Figura 42	Relação da permissividade entre eixos	75
Figura 43	Célula Básica do Método FDTD	79
Figura 44	Volume representativo do material visualizado através de malha.	84
Figura 45	Máscara de parâmetros do XFDTD	85
Figura 46	Representação da Intensidade de energia eletromagnética instantânea através do Método FDTD	85
Figura 47	Componentes z do Vetor de Poynting(S_z), considerando a maior anisotropia nos eixos.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Medidas das Cotas da Amostra	63
Tabela 2	Discrepância de Medidas entre Amostras	71

LISTA DE SIMBOLOS

<i>B</i>	Densidade de fluxo de campo magnético em Wb/m ²
<i>c</i>	Velocidade da luz no vácuo $\approx 2,997925 \times 10^8$ em m/s
<i>C</i>	Capacitância elétrica em Coulomb
<i>D</i>	Densidade de fluxo de campo elétrico em C/m ²
<i>E</i>	Intensidade de campo elétrico em V/m
<i>H</i>	Intensidade de campo magnético em A/m
<i>J</i>	Densidade de corrente elétrica em A/m ²
<i>L</i>	Indutância em H
<i>L₀</i>	Indutância do vácuo em H
<i>v</i>	Velocidade de propagação da onda no material em m/s
<i>V</i>	Tensão elétrica em V
<i>X</i>	Reatância
<i>Z</i>	Impedância em Ω
<i>Z₀</i>	Impedância característica do vácuo $\approx 376,991$ em Ω
<i>Z_{in}</i>	Impedância de entrada em Ω
ϵ	Permissividade em F/m
ϵ^*	Permissividade elétrica complexa em F/m
ϵ'	Componente real da permissividade elétrica complexa
ϵ''	Componente imaginária da permissividade elétrica complexa
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo $\approx 8,854 \times 10^{-12}$ em F/m
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa;
ϵ_r^*	Permissividade elétrica complexa relativa

ϵ_r'	Componente real da permissividade elétrica complexa relativa;
ϵ_r''	Componente imaginária da permissividade elétrica complexa relativa
λ	Comprimento de onda em m
λ_x	Comprimento de onda da frequência de interesse em m
η	Impedância intrínseca do meio em Ω
μ	Permeabilidade magnética em H/m
μ^*	Permeabilidade magnética complexa em H/m
μ'	Componente real da permeabilidade magnética complexa
μ''	Componente imaginária da permeabilidade magnética complexa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo $\approx 1,256 \times 10^{-6}$ em H/m
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
μ_r^*	Permeabilidade magnética complexa relativa
μ_r'	Componente real da permeabilidade magnética complexa relativa
μ_r''	Componente imaginária da permeabilidade magnética complexa relativa
ρ	Resistividade elétrica em $\Omega \cdot m$
σ	Condutividade elétrica em S/m
χ	Susceptibilidade magnética
ω	Coefficiente angular em rad/s
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos do trabalho	21
1.2 Justificativa e Motivação	22
1.3 Metodologia Experimental e Dificuldades Inerentes à Pesquisa	24
2. REVISÃO DA TEORIA DAS RELAÇÕES CONSTITUTIVAS	26
2.1 Anisotropia	26
2.2 Permissividade	26
2.3 Medida dos Tensores de Permissividade e Permeabilidade	28
2.4 Materiais Dielétricos Anisotrópicos	29
2.5 Vetor de Poynting	30
2.6 Condutividade Elétrica	31
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO	32
3.1 Materiais Compósitos	32
3.2 Compósitos Estruturais	33
3.3 Desempenho Elétrico dos Materiais Compósitos	34
3.4 Modelos Equivalentes de Camadas	35
3.4.1 Modelos não Homogêneo de 3 Camadas	37
3.4.2 Modelo Homogêneo de 3 Camadas	41
3.4.3 Modelo Homogêneo de 1 Camada	42
3.5 Estruturas de Compósito de Painel Múltiplo.	43
3.5.1 Exemplo Numérico com Discussão dos Diferentes Modelos.	44

3.5.2	Painel Simples de Compósito de Fibra de Carbono	45
3.5.3	Painel Múltiplo de Compósito de Fibra de Carbono.	49
4.	MEDIDAS DE PERMISSIVIDADE RELATIVA COMPLEXA	58
4.1	Mecanismos de Acoplamento	59
4.1.1	Modelo Físico-Matemático para Caracterização da Anisotropia na Permissividade Relativa Complexa.	59
4.1.2	Usinagem das amostras	62
4.1.3	Tratamento Superficial das Amostras	64
4.1.4	Arranjo Experimental e Calibração da Instrumentação	64
4.1.5	Medidas de Permissividade Relativa	66
4.1.6	Análise dos Resultados	71
4.2	Determinação da Condutividade Característica do Compósito de Fibra de Carbono	76
5.	SIMULAÇÃO DE UMA PLACA DE COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO SUBMETIDA A UM PULSO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA	77
5.1	Introdução	77
5.2	Método das diferenças finitas no domínio do tempo	78
5.3	Algoritmo FDTD para as equações eletromagnéticas	81
5.4	Procedimentos para aplicação do método FDTD	83
5.5	Definição do modelo geométrico adotado	83
5.6	Ambientes para simulação	84
5.7	Resultados obtidos	85
6.	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	87

7. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	88
8. REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE A - MATERIAIS COMPOSTOS	92
APÊNDICE B – EXEMPLO DE TABELA DE MEDIDAS DE PERMISSIVIDADE COMPLEXA (REAL E IMAGINÁRIA)	100
APÊNDICE C – ARP 5412-A	117

1. INTRODUÇÃO

O estudo da anisotropia na permissividade complexa em amostras de Fibra de Carbono Composto (CFC) tornou-se importante para o entendimento dos efeitos de descargas elétricas em estruturas aeronáuticas, para que não ocorram prejuízos estruturais quando submetidos aos pulsos de corrente de alta magnitude [2].

Tem sido significativo o aumento da utilização do Composto de fibra de carbono (CFC) na construção de aeronaves, em substituição aos materiais metálicos, dadas as vantagens em relação às propriedades mecânicas e químicas, tais como: baixo peso, alta rigidez e robustez, baixa corrosão, baixo custo de usinagem e facilidade de fabricação [1]. Entretanto, a qualidade desse material sob efeitos de descargas elétricas vem sendo avaliada nesta última década, visando a garantia de robustez das aeronaves sob um ambiente eletromagnético com altos níveis de potência de radiação não-ionizante (RNI).

O interesse da comunidade científica na caracterização do desempenho eletromagnético (EM) dos compósitos tem aumentado pelo fato desses materiais estarem sendo usados com mais frequência como caixas e blindagem de dispositivos elétricos e eletrônicos para proteção de sistemas complexos, levando a investigações experimentais e teóricas de diversos aspectos dos compósitos [1], tais como:

- 1) O efeito direto da corrente originada por impacto de raio sobre estruturas de compósito [2];
- 2) Capacidade de manipulação da corrente dos materiais compósitos [3];
- 3) o desempenho das blindagens das estruturas de compósito com forma planar, cilíndrica ou complexa [4];
- 4) os efeitos da difusão de campo magnético através de encapsulamento de metal pelo compósito [5];

5) Métodos de medida [6].

Os projetos de pesquisa para desenvolvimento de material compósito de alto desempenho visam melhorar a eficiência da blindagem, a capacidade de manuseio de corrente, e a absorção eletromagnética existente [16]-[17].

Uma vez que o efeito resistivo na fuselagem associado à corrente elétrica da descarga determina a distribuição espacial do potencial elétrico nessa estrutura, torna-se necessário caracterizar sua anisotropia elétrica. Estes dados podem definir um modelo elétrico equivalente que possibilite determinar as condições de contorno no seu processo de montagem em camadas, garantindo sua rigidez dielétrica.

Atualmente, são necessários ensaios em um ambiente eletrostático que simule tal cenário, até que o limiar de centelhamento seja atingido, levando-se em conta a aplicação de um pulso de corrente de alta magnitude sobre toda a superfície estudada.

Deve-se levar em conta a necessidade de um elevado número de corpos de prova devido a degradação do material submetido a grandes potenciais elétricos e que os resultados obtidos nesses ensaios são binários, ou seja, podem ocorrer ou não o aparecimento de centelha. De outra maneira, um número de amostras reduzido resultaria em um programa de teste que limitaria os dados disponíveis sobre o efeito da exposição ambiental sobre o material [2].

Um dos desafios tecnológicos para viabilizar o emprego do CFC é a sua baixa resistência a impactos de raios, que pode causar danos a sua superfície, incluindo a pirólise da resina e fratura dos laminados, devido a onda de choque da descarga. Esses efeitos ocorrem no ponto de impacto ou em regiões circundantes, em razão, principalmente, do pico inicial da corrente de descarga, onde a extensão do dano decorre principalmente do tipo de da espessura do CFC, da isolação imposta pela espessura da pintura e acabamentos bem como da intensidade da descarga [7].

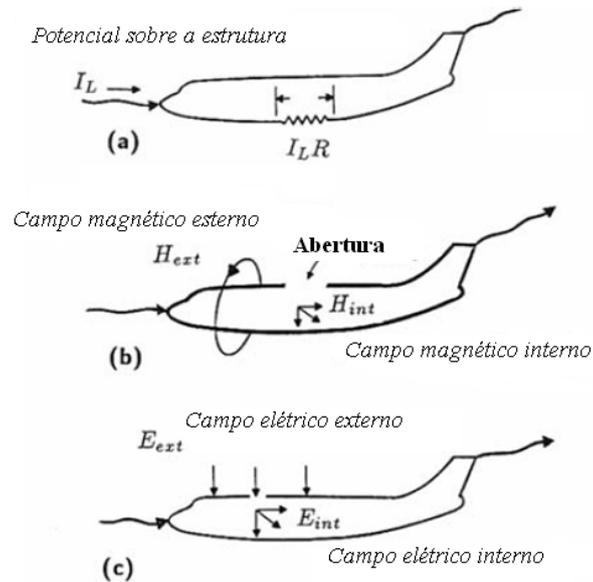


Figura 1 - (a) Potencial a que fica Submetida a Estrutura em Função de seu Efeito Resistivo;
 (b) Acoplamento do Campo Magnético;
 (c) Acoplamento do Campo Elétrico.

Ao analisarmos os efeitos causados sobre uma superfície de compósito percorrida por uma corrente de alta magnitude, decorrente de descarga atmosférica, além da impedância associada ao material, os campos elétrico e magnético devem ser considerados como mecanismos de acoplamento, conforme ilustrado na figura 1. Basicamente, o efeito resistivo da estrutura associado à corrente elétrica da descarga, determina o potencial a que a mesma fica submetido. Se considerarmos a estrutura de uma aeronave de CFC, com valor típico de resistência em corrente contínua (CC) da ordem de $60 \text{ m}\Omega$ percorrida por uma corrente de 200 KA , a tensão gerada entre as suas extremidades seria da ordem de 12000 Volts [19].

Atualmente, o modelo utilizado em laboratório para execução de ensaios de descarga atmosférica em Compósito de Fibra de Carbono para atender aos requisitos aeronáuticos está orientado na ARP 5412-A [8] que está reproduzida parcialmente no ANEXO C.

Neste trabalho, adotou-se um método não destrutivo e que requereu poucos recursos financeiros, dado que para caracterizar a anisotropia na permissividade complexa no CFC foram necessárias somente algumas amostras extraídas de uma placa do material estudado.

Os dados obtidos contribuirão para a caracterização de outros parâmetros minimizando os esforços empreendidos nas investigações quanto aos efeitos da corrente originada por impacto de raio.

Admitindo que o material estudado não é magnético, pode-se considerar a permeabilidade magnética complexa relativa do material igual a um ($\mu^*=1$).

A permissividade elétrica relativa complexa (\mathcal{E}^*) do mesmo é obtida através de resultados de medidas em laboratório, utilizando amostras de uma mesma placa, extraídas em três eixos ortogonais entre si, denominados X, Y e Z.

Para a caracterização da anisotropia na permissividade complexa do CFC, foi realizado um conjunto de medidas constituído de no mínimo 6 amostras de cada eixo distinto (X, Y e Z), considerando o campo TEM nas direções transversal e longitudinal da fibra. Isto minimiza custo e requer um arranjo experimental menos complexo.

Os resultados dessas medidas foram compilados para formar as bases de dados para construção de gráficos representativos do comportamento da permissividade do material estudado na faixa de frequências de 1KHz a 10 MHz, à 25°C possibilitando uma generalização analítica em contraposição à generalização estatística.

1.1 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a anisotropia elétrica do composto de fibra de carbono, a partir de medidas da permissividade complexa desse material. Deste modo é possível conferir as propriedades elétricas do material através da utilização de um método computacional, que trata dos fundamentos do método das diferenças finitas em uma forma adequada a aplicações que envolvam interações eletromagnéticas em materiais com dielétrico penetrável e geometria complexa.

Através desse procedimento pode-se estabelecer um modelo equivalente que possibilite determinar as condições de contorno ótimas na montagem em camadas de um material, de forma a garantir sua rigidez dielétrica quando este for submetido a uma descarga atmosférica

1.2 Justificativa e Motivação

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi encontrada após os testemunhos das campanhas de ensaios feitos pela Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER) para pesquisar os efeitos diretos causados pela ocorrência de centelha (spark) em junções de placas de CFC originados por descargas elétricas, conforme ilustra a figura 2.



Figura 2 - Ocorrência de Centelha em junção de CFC.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão e Alta Corrente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), localizado no Rio de Janeiro, como ilustrado na figura 3. Basicamente, os ensaios consistiam em submeter junções de placas de CFC às correntes com magnitudes similares às que ocorrem em descargas atmosféricas,

sendo necessário descarregar a corrente armazenada em bancos de capacitores, imposta pela tensão retificada da linha de transmissão.



Figura 3 - Laboratório de Alta Tensão e Alta Corrente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)

O objetivo desses ensaios era identificar os níveis de correntes que dão origem ao fenômeno estudado, estabelecendo uma relação com o dano causado e constituindo um método de avaliação que estabeleça parâmetros para utilização de compósito de Fibra de Carbono na construção de aeronaves. Todos os esforços foram somados no sentido de possibilitar o desenvolvimento de uma metodologia de análise estatística que agregasse um nível de confiabilidade associado à tolerância ao dano causado por um impacto de raio.

Para qualificar este material para uso aeronáutico, os ensaios deveriam comprovar que o mesmo atende aos requisitos estabelecidos pelas autoridades aeronáuticas, conforme estabelecido pela ARP 5412 [20]. A realização desses ensaios demandou um delineamento experimental complexo e caro, requerendo um número significativo de amostras para se testar exhaustivamente cada configuração.

Foram providos os meios para registrar a ocorrência de centelhamento em corpos de prova e efetuar as medidas dos parâmetros relacionados aos danos e capacidade de geração de faíscas. Não obstante, junções de CFC têm a propriedade de se modificar após a exposição a impactos de raios, reduzindo a centelha no próximo impacto. Isto limitaria o número de testes que poderia ser desenvolvido em uma amostra, até que o pior caso fosse experimentado. Outra consideração é que os resultados de testes de impacto de raios são binários por natureza, ainda que uma fonte de ignição seja observada ou não [2]. Não há possibilidade de conhecer o início de uma falha testando um único modelo para se estabelecer um nível de qualidade desses painéis sob efeitos de descargas elétricas, visando a garantia de robustez das aeronaves sob um ambiente eletromagnético com altos níveis de potência de radiação não-ionizante (RNI).

1.3 Metodologia Experimental e Dificuldades Inerentes à Pesquisa.

A partir da análise de modelos em camadas equivalentes do CFC [1] definiu-se um método para validação dos resultados do método estatístico empregado para estimar o limiar do centelhamento em junções de compósito [2]. Como parâmetro a ser estudado foi escolhida a permissividade complexa relativa do CFC uma vez que a sua caracterização serviria para obtenção de outros parâmetros associados ao material. Delineou-se então uma configuração experimental mais econômica para buscar resultados mais confiáveis levando-se em conta que os ensaios são NÃO DESTRUTIVOS (NDT) dado a preservação estrutural da amostra.

Essas medidas foram efetuadas dentro do Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos (LSE) que possui infra-estrutura adequada e está instalado dentro do Instituto de Estudo Avançados (IEAv) que pertence ao Comando da Aeronáutica. A obtenção de resultados para caracterização do material foi planejada de forma sistemática para ser executada em etapas.

Inicialmente, além da familiarização com os procedimentos experimentais de configuração e calibração dos equipamentos, as dificuldades em se obter uma placa nas dimensões apropriadas para a extração das amostras, bem como a usinagem e preparação das mesmas, uma vez que se tratava de um material muito duro, impuseram certa morosidade na realização das primeiras medidas, que foram descartadas em decorrência da obtenção de resultados divergentes.

A partir da adoção de procedimentos detalhados no capítulo 4 foram adquiridas dez amostras de cada um dos três eixos (X, Y e Z) para que seis delas, no mínimo, compusessem o espaço amostral de cada eixo. O processo de aquisição das amostras de cada eixo foi dividido em cinco fases antes que fosse efetuada a medida de permissividade propriamente dita.

Na primeira fase, houve a necessidade de acompanhamento da usinagem para que as amostras fossem confeccionadas numa geometria cilíndrica com formato toroidal apropriado para o acoplamento físico no porta-amostra do medidor de impedância.

A segunda fase foi dedicada à limpeza e seleção das amostras quanto às medidas de comprimento e diâmetros externo e internos do cilindro coaxial. A terceira fase constituiu-se de um recobrimento das faces externa e interna da amostra com tinta qualificada. A quarta fase foi destinada à realização de medidas de permissividade propriamente dita. Na quinta fase, constituiu-se da análise de resultados. Finalmente, as amostras foram identificadas e armazenadas para conferências futuras.

2. REVISÃO DA TEORIA DAS RELAÇÕES CONSTITUTIVAS

Neste capítulo são revistos alguns conceitos e fundamentos físicos necessários ao entendimento da caracterização da permissividade elétrica complexa do material e de uma simulação utilizando o método das diferenças finitas no domínio de tempo que permite a visualização do fluxo de energia (Vetor de Poynting) através de uma placa do material estudado.

2.1 Anisotropia.

A anisotropia é a característica que uma substância possui em que certa propriedade física varia com a direção e é uma propriedade intrínseca do material que está relacionada a sua estrutura. Um meio é anisotrópico se suas propriedades eletromagnéticas dependem das orientações dos campos a que é submetida [9].

2.2 Permissividade

A permissividade é determinada pela capacidade de um material de polarizar-se em resposta a um campo elétrico aplicado e, dessa forma, cancelar parcialmente o campo dentro do material. Está diretamente relacionado com a susceptibilidade elétrica. Por exemplo, um capacitor uma alta permissividade faz com que a mesma quantidade de carga elétrica seja guardada com um campo elétrico menor e, portanto, a um potencial menor, levando a uma maior capacitância do mesmo.

Em eletromagnetismo define-se um campo de indução elétrica D , que representa como um campo elétrico E influirá na ordenação das cargas elétricas no meio [9]-[10], por exemplo, redistribuição de cargas e reorientação de dipolos elétricos.

A relação de ambos os campos (para meios lineares) com a permissividade é

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (2.1)$$

Onde ε é um tensor, sendo de ordem zero ou um escalar, se o meio é isotrópico ou de segunda ordem, que é representado por uma matriz quadrada 3 por 3 se for anisotrópico,

A permissividade é medida em função da frequência e tem valores reais ou complexos. Geralmente, não é uma constante, uma vez que pode variar com a posição do meio, a frequência do campo aplicado, a umidade ou a temperatura, entre outros parâmetros. Em um meio não linear, a permissividade pode depender da magnitude do campo elétrico e sua unidade de medida no Sistema Internacional é o Farad por metro (F/m).

O campo de deslocamento D é medido em Coulombs por metro quadrado (C/m^2), enquanto que o campo elétrico E se mede em Volts por metro (V/m). D e E representam o mesmo fenômeno, a interação entre objetos carregados. D é relacionado com as densidades de carga associada a esta interação e E se relaciona com as forças e diferenças de potencial envolvidas.

A permissividade do vácuo ε_0 é o fator que relaciona os valores de D e E nesse meio, e apresenta um valor igual a $8,8541878176... \times 10^{-12}$ F/m obtido da expressão:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \quad (2.2)$$

onde c é a velocidade da luz e μ_0 é a permeabilidade no vácuo.

A permissividade no vácuo está relacionada a Lei de Coulomb, usada para expressar a força de atração entre duas cargas unitárias no vácuo e encontra-se inserida no termo $1/4\pi\varepsilon_0$ denominado Constante Dielétrica.

A permissividade de um material é usualmente dada em relação à permissividade do vácuo, denominando-se Permissividade Relativa, ε_r .

Pode-se determinar a permissividade absoluta ε a partir da expressão:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = (1 + \chi_e) \varepsilon_0, \quad (2.3)$$

onde χ_e é a suscetibilidade elétrica do material.

No caso comum de um meio isotrópico, D e E são vetores paralelos e ϵ é um escalar, mas em meios anisotrópicos, este não é o caso e ϵ é um tensor de segunda ordem. A permissividade elétrica ϵ e a permeabilidade magnética μ de um meio determinam a velocidade de fase de radiação eletromagnética ν dentro do mesmo, conforme a expressão a seguir:

$$\epsilon\mu = \frac{1}{\nu^2} \quad (2.4)$$

Quando um campo elétrico é aplicado a um meio, uma corrente flui. A corrente total que percorre um material real está, em geral, composta de duas partes: uma corrente de indução outra de deslocamento. A corrente de indução pode ser descrita como a resposta de um material ao campo elétrico aplicado. Ao aumentar a magnitude do campo elétrico aplicado, a corrente de indução é armazenada no material, e quando a intensidade do campo diminui, o material libera a corrente. A corrente de deslocamento pode ser separada entre uma contribuição do vácuo e outra do material, como segue:

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi E = \epsilon_0 E (1 + \chi), \quad (2.5)$$

onde P é a polarização do meio e a permissividade relativa e a susceptibilidade do material estão relacionadas através da expressão $\epsilon_r = \chi + 1$.

$$(2.6)$$

2.3 Medida dos Tensores de Permissividade e Permeabilidade.

Os materiais anisotrópicos têm encontrado aplicações importantes em engenharia e dentre elas estão os substratos para circuitos integrados de microondas, radomes de antena e absorvedores de onda eletromagnética [6]. Se considerarmos uma onda incidente em uma placa de CFC, suas propriedades anisotrópicas podem ser sentidas em função do ângulo de incidência da onda com a superfície do material. Embora a teoria eletromagnética dos materiais anisotrópicos esteja bem estabelecida, as técnicas experimentais estão sempre necessitando de determinação para os parâmetros constitutivos desses materiais. A

determinação dos parâmetros constitutivos dos materiais anisotrópicos é um problema inverso típico, e o problema é complicado pelo fato de que tais materiais têm perdas e são dispersivos. Primeiramente, devemos nos assegurar de que os dados medidos são necessários e suficientes para a determinação inequívoca dos parâmetros constitutivos. Posteriormente, devemos desenvolver configurações experimentais que sejam apropriadas para colher os dados necessários. Nas décadas passadas, muitos recursos foram gastos para caracterização de materiais anisotrópicos e, como resultado, muitos métodos foram desenvolvidos para diferentes aplicações.

2.4 Materiais Dielétricos Anisotrópicos

Para um material dielétrico anisotrópico, a relação entre o tensor deslocamento $[D]$ e o tensor de campo elétrico $[E]$ é dado por:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Para um material fisicamente real, seu tensor permissividade é definido por $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^*$. Então a matriz pode ser diagonalizada usando as coordenadas principais de x, y e z, como segue:

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

onde ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz} são componentes de permissividade principal.

A densidade de energia elétrica U pode então ser expressa como:

$$U = \frac{1}{2} \left(\frac{D_x^2}{\varepsilon_{xx}} + \frac{D_y^2}{\varepsilon_{yy}} + \frac{D_z^2}{\varepsilon_{zz}} \right) \quad (2.9)$$

Definindo as quantidades X, Y e Z ao longo do eixo espacial principal,

$$X = \frac{D_x}{\sqrt{2\varepsilon_{xx}U}} \quad (2.10)$$

$$Y = \frac{D_y}{\sqrt{2\varepsilon_{yy}U}} \quad (2.11)$$

$$Z = \frac{D_z}{\sqrt{2\varepsilon_{zz}U}} \quad (2.12)$$

A equação (2.9) pode ser reescrita como:

$$\frac{X^2}{\varepsilon_1} + \frac{Y^2}{\varepsilon_2} + \frac{Z^2}{\varepsilon_3} = 1 \quad (2.13)$$

com

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{xx}/\varepsilon_0 \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{yy}/\varepsilon_0 \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{zz}/\varepsilon_0, \quad (2.16)$$

Das equações acima, o tensor permissividade relativa no eixo principal representa o grupo de materiais anisotrópicos e pode ser expresso como:

$$[\varepsilon_i] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.5 Vetor de Poynting

É um vetor cujo módulo representa a densidade superficial instantânea de energia eletromagnética que se propaga por unidade de tempo na direção e sentido da onda eletromagnética associada, e por definição na direção e sentido do vetor de Poynting em si [12]. Seu módulo representa portanto a quantidade de energia que atravessa uma seção reta

imaginária de área unitária em posição perpendicular à direção de propagação da onda eletromagnética por intervalo de tempo adequadamente considerado.

Formalmente, podemos definir o vetor de Poynting como o produto vetorial do campo elétrico pelo campo magnético da respectiva onda eletromagnética e representá-lo pelo símbolo \vec{S} , e tem por unidade o Joule por metro quadrado e por segundo [$\text{J}/\text{m}^2\text{s}$], ou Watt por metro quadrado [W/m^2].

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B} \quad (2.18)$$

onde \vec{E} representa o campo elétrico, \vec{H} representa o vetor indução magnética e \vec{B} o campo magnético.

2.6 Condutividade Elétrica (σ)

Condutividade elétrica ou condutância específica é uma medida da capacidade do material de conduzir corrente elétrica entre dois pontos e é dependente das dimensões geométricas do material [10]. A condutividade é o inverso da resistividade (ρ) sendo sua unidade de medida o [$\Omega \cdot \text{m}$]⁻¹ ou Siemens e pode ser representada por:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.19)$$

onde ρ é a resistividade elétrica [$\Omega \cdot \text{m}$].

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO

A caracterização das propriedades de um material é uma disciplina da ciência que envolve investigação das correlações existentes com suas estruturas e contrasta com a atividade de engenharia que utiliza em seus projetos, os resultados obtidos em pesquisa, para produzir um conjunto de propriedades pré-estabelecidas. As tecnologias modernas requerem materiais com combinações de propriedades não usuais para atender as tendências do segmento aeroespacial, bem como a grande demanda do setor aeronáutico. Tem aumentado a preferência pelos materiais compósitos, uma vez que suas propriedades são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa e não podem ser atendidas por ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos [1], [9]. Para idealizar e planejar este trabalho, alguns conceitos físicos, bem como as teorias que os envolvem, tiveram que ser revistos conforme apresentados a seguir.

3.1 Materiais Compósitos.

Os materiais compósitos, também conhecidos como materiais conjugados ou materiais compostos, são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais. Um exemplo típico é o compósito de fibra de vidro em matriz polimérica usado nos radomes das aeronaves, devido à sua transparência em relação aos sinais na faixa de microondas. A fibra de vidro confere resistência mecânica, enquanto a matriz polimérica, na maioria dos casos constituída de resina de epóxi, é responsável pela flexibilidade do compósito. Não obstante, a matriz pode ser polimérica, metálica ou cerâmica. Outro composto usado com frequência pela engenharia aeronáutica é constituído de Fibra de Carbono. Nos dois casos, a condutividade elétrica apresentada por esses materiais é muito baixa, sendo ligeiramente maior no composto de fibra de carbono [1].

3.2 Compósitos Estruturais.

Um compósito estrutural é normalmente composto de materiais homogêneos ou materiais compósitos cujas propriedades dependem não apenas das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais. São normalmente montados em camadas e podem ser constituídos de uma matriz de ligação de vários materiais diferentes (ex. metálico, polimérico, cerâmico, etc.) reforçados por inclusão de diferentes formas (fibras longas e curtas, flocos, filamentos). Atualmente em sua quarta geração, os materiais compósitos avançados são materiais relativamente novos originados de indústria de plástico de fibra de vidro reforçado. São compostos por uma matriz de resina reforçada por fibras de alto esforço, tais como grafite, boro, vidro, carbono ou aramida [14]. Os painéis de compósito são manufacturados por um processo de prensagem e ligação de diversas matrizes de laminados reforçados com diferentes orientações nas fibras. Cada camada é preenchida com um reforço unidirecional ou tecido conforme ilustrado na figura 4, onde D representa o diâmetro da fibra, P é a distância entre elas e L é a espessura de cada painel [1].

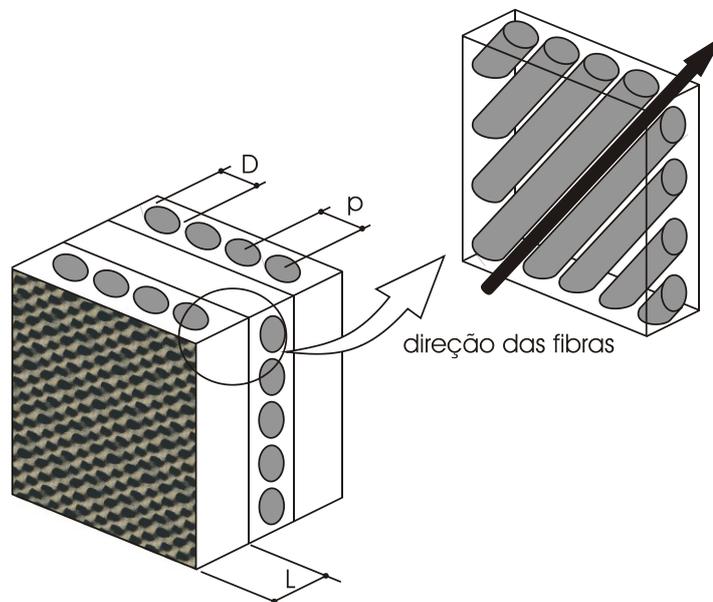


Figura 4 – Estrutura de Compósito Painel múltiplo.

3.3 Desempenho Elétrico dos Materiais Compósitos

Devido à natureza não homogênea dos compósitos, a resistividade superficial e volumétrica do painel de compósito de fibra carbono pode ser definida por uma média. Ambas as resistividades superficial e volumétrica, assim como a eficiência da blindagem eletromagnética imposta pela estrutura de compósito são fortemente afetadas pela fração ou percentagem de fibra carbono. As principais vantagens desse material em relação aos metais são as propriedades mecânicas e químicas tais como baixo peso, alta rigidez e robustez, baixa corrosão, baixo custo de usinagem, e grande facilidade de fabricação. Em contrapartida, o material compósito não é eletricamente condutivo como os metais. Por exemplo, um compósito de fibra carbono reforçado (CFRC- Carbon Fiber Reinforced Composite) tem uma condutividade elétrica cerca de 1000 vezes menor do que a maioria dos metais [15].

O desempenho elétrico dos materiais compósito depende fortemente das características de fabricação. Um tipo de compósito de fibra reforçada é feita de fibras fráccidas que são misturadas com resinas e um agente de cura para formar um compósito sólido (figuras 4 e 5). Outro tipo de compósito é constituído de fibras unidirecionais pré-impregnadas com resinas como mantas ou tecido em trama que são colocados em camadas para formar o material compósito acabado. A condutividade elétrica e a resistência mecânica são maiores na direção do reforço das fibras, conforme indicado na figura 4.

A alta blindagem eletromagnética dos materiais compósitos avançados é alcançada usando fibras de grafite com bromina ou por uma composição alógena, ou coberta com níquel. Para este propósito, têm sido desenvolvidos coberturas e filmes finos. Recentemente, tem-se conseguido painel laminado de material compósito avançado com alto desempenho mecânico e alta capacidade de absorção de energia eletromagnética. Este material tem uma estrutura do tipo sanduíche, e é caracterizado por um coeficiente de absorção menor do que 17 dB na faixa de frequência de 7 a 18 GHz [18].

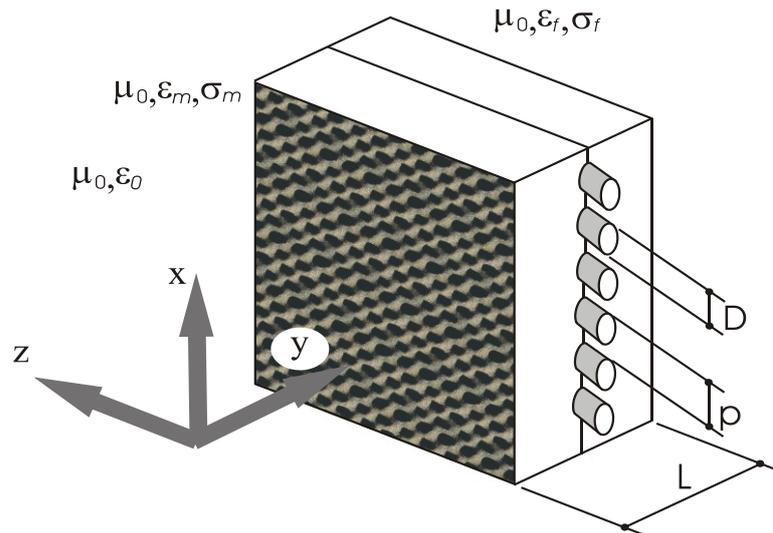


Figura 5- Estrutura com Painel Simples de Fibra de Material Composto

3.4 Modelos Equivalentes de Camadas.

Para discutir a eficiência da blindagem, a reflexão e transmissão da onda eletromagnética incidente em um painel de material composto, como mostrado na figura 5, são apresentados três modelos que abordam as propriedades efetivas do material com diferentes ordens de aproximação. Os resultados desses modelos são comparados com resultados numéricos obtidos de métodos de elementos finitos (FE). Como esperado, quanto mais detalhes são adicionados (alta ordem de aproximação) para os modelos, o limite de frequência superior de validação é aumentado [1].

Uma aproximação que pode ser usada para analisar interações eletromagnéticas em compósito de fibras de carbono é a aproximação numérica que embora seja uma boa ferramenta, requer um tempo computacional proibitivo para serem resolvidas [1]. As aproximações numéricas requerem fibras de material composto com painéis multicamadas finos para ser resolvido por degraus de discretização muito pequenos que necessitam resolver as características geométricas das fibras de compósito. Mesmo os métodos de subdivisão não

são suficientes para análise de painéis de compósito finos excitados por fontes eletromagnéticas em frequências maiores que 100 MHz, sendo necessário um método mais eficiente [1].

Trabalhos anteriores [20]-[22] mostram que, se o período de uma estrutura periódica é pequeno comparado com o comprimento de onda, as ondas vêem o compósito como um meio efetivo, e os campos médios de ordem zero (fundamental) são descritos por:

$$\nabla \times (\overline{E^o})_{avg} = -j\omega[\mu^h].(\overline{H^o})_{avg} \quad (3.1)$$

e

$$\nabla \times (\overline{H^o})_{avg} = -j\omega[\varepsilon^h].(\overline{E^o})_{avg} \quad (3.2)$$

Estas expressões fazem com que os campos médios no domínio da frequência satisfaçam as equações de Maxwell em um meio homogêneo anisotrópico caracterizado pelos tensores $[\varepsilon^h]$ e $[\mu^h]$ e as propriedades efetivas do material são chamadas permissividade e permeabilidade homogeneizadas.

Uma vez que os campos médios tratam a média periódica como uma região efetiva anisotrópica não homogênea com tensor permissividade $[\varepsilon^h]$ e tensor permeabilidade $[\mu^h]$, os coeficientes de reflexão e/ou transmissão homogeneizados da estrutura de compósito podem ser obtidos com aproximação das médias clássicas das camadas ou pelos métodos de linhas de transmissão clássica [23].

Houve uma atenção no passado para determinar propriedades eficazes de regiões dos compósitos onde um exame deste trabalho pode ser encontrado em [24]-[26]. Este trabalho apresenta três modelos para tratar as propriedades efetivas do material de uma estrutura periódica que se assemelha a seção transversal das hastes da fibra encaixado em um meio

dielétrico conforme mostrado na figura 5. Estes três modelos são apresentados a seguir e estão baseados na redução do compósito em três diferentes representações de camadas equivalentes para representarem os diferentes níveis de aproximação.

3.4.1 Modelos não Homogêneo de 3 Camadas.

Neste modelo, o painel de composto mostrado na figura 5 é representado pelo modelo de 3 camadas mostrada na figura 6. Como a onda se propaga no interior do painel de fibra de compósito, como mostrado na figura 5, ela experimenta as três regiões separadas. A onda inicialmente entra no painel e vê uma camada homogênea (região 1 da figura 6).

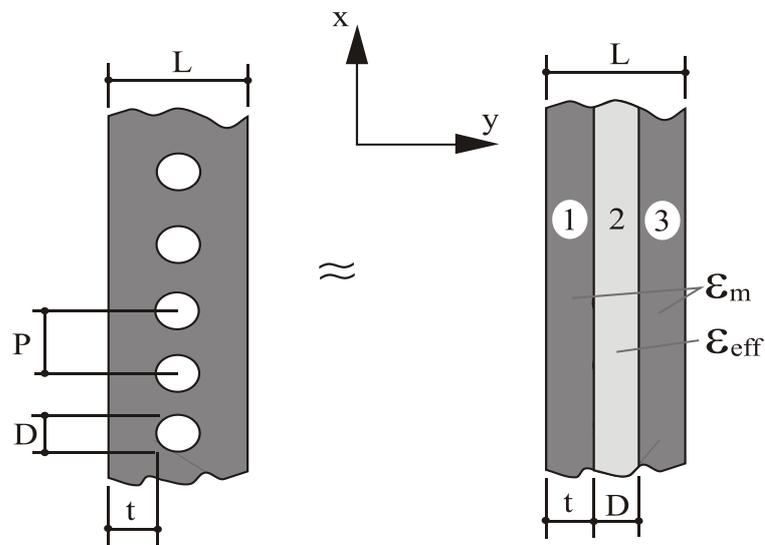


Figura 6 - Modelo não Homogêneo de Painel com 3 Camadas

Esta camada tem as propriedades do material constante, que correspondem a matriz ou resina, que envolve a fibra. A camada tem uma espessura t que corresponde a distância da borda do painel 1 até a borda da fibra, e $\epsilon = \epsilon_m$.

Como a onda se propaga dentro da segunda região, definida como sendo de uma borda da fibra até a outra, indicada como região 2 da figura 6, ela enxerga um aumento da seção cruzada da fibra até que o seu centro da fibra ser alcançado. Neste ponto, a onda vê um decréscimo da seção cruzada da fibra. A figura 7 ilustra este caso. Ela sugere uma camada

não homogênea, e as propriedades do material de uma camada é dado abaixo. A espessura da camada é D (o diâmetro das fibras). A onda finalmente entra numa camada homogênea (região 3 da figura 7). Esta camada é idêntica a camada 1, onde a constante do material é $\epsilon = \epsilon_m$ e espessura t .

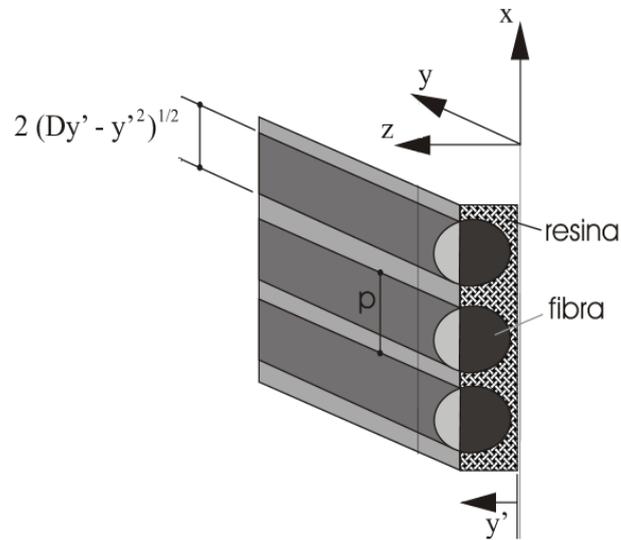


Figura 7 – Seção Cruzada Típica de uma Matriz de Fibra

Em uma dada seção cruzada qualquer da camada não homogênea (região 2), as propriedades do material são aproximadas pelas propriedades efetivas do material da média periódica do laminado mostrado na figura 8.

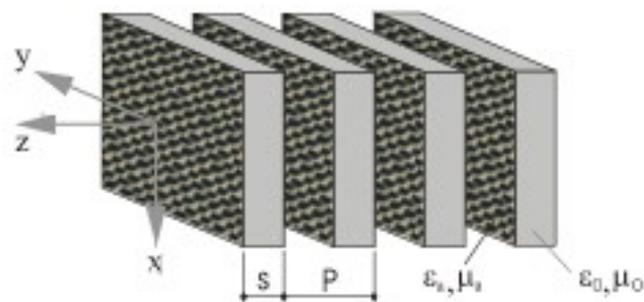


Figura 8 – Meio Laminado Periódico, onde, $s = \sqrt{2Dy' - y'^2}$ y' é a distância dentro da região 2 e D o diâmetro das fibras.

Onde ϵ_a , μ_a , ϵ_b , e μ_b estão indicados na Figura 5, e g é o volume relativo do espaço ocupado pelo material com ϵ_b , ou μ_b . Este tipo de comportamento médio é conhecido como uma anisotropia uniaxial mas o material homogêneo com o seguinte tensor (possivelmente complexo) de permissividade e permeabilidade.

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

e

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \epsilon\mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\epsilon_x^{-1} = (1 - g)\epsilon_a^{-1} + g\epsilon_b^{-1}$$

$$\mu_x^{-1} = (1 - g)\mu_a^{-1} + g\mu_b^{-1}$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = (1 - g)\epsilon_a + g\epsilon_b$$

$$\mu_y = \mu_z = (1 - g)\mu_a + g\mu_b \quad (3.5)$$

As propriedades efetivas do material de camada não homogênea (região 2) podem ser aproximadas pela expressão dada em (3.5) para permitir que ϵ_a represente o material em torno das hastes (ou ϵ_m), ou permitindo ϵ_b representar a permissividade das fibras (ou ϵ_f), onde g é o volume relativo do espaço ocupado pelas fibras a uma dada distância y' como definido na figura 7.

Ao contrário do meio laminado, g para região 2 na Figura 3 é função da distância (y') medida da superfície até a borda posterior das hastes e é dada

$$g = \frac{2\sqrt{Dy' - y'^2}}{p} \quad (3.6)$$

Onde y' varia de 0 a D (ver Figura 4). Este modelo captura maiores detalhes do painel de fibra de carbono dos três modelos apresentados neste trabalho. Este modelo é mais preciso para altas frequências do que os outros modelos mostrados a seguir.

Em algumas situações, as coordenadas principais das fibras podem não corresponder as coordenadas do campo eletromagnético incidente sobre a estrutura de compósito, como mostrado na figura 9. Nesta figura, os eixos ψ e ξ correspondem respectivamente aos eixos x e z rotacionados por um ângulo α .

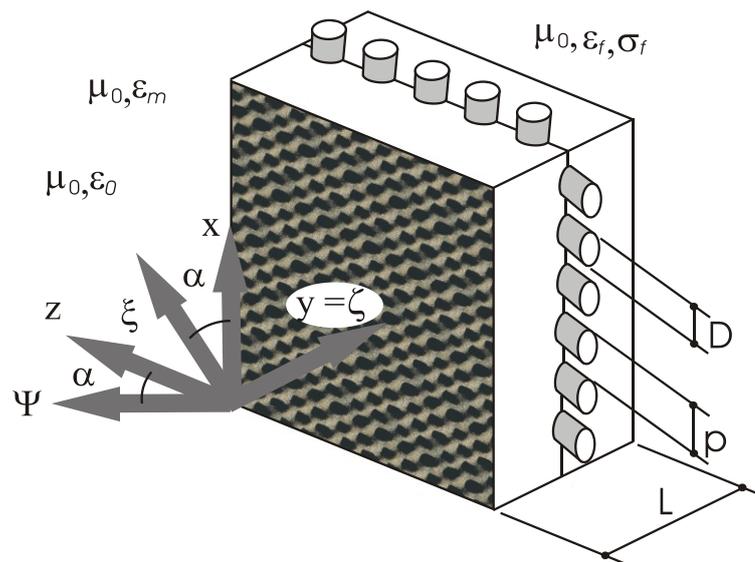


Figura 9 – Coordenada de Transformação para Painel Simples com Estrutura de Fibra de Carbono.

Quando isto ocorre, as seguintes coordenadas de transformação podem ser usadas.

$$\begin{bmatrix} E_z \\ H_x \\ E_x \\ H_z \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} E_\psi \\ H_\xi \\ H_\xi \\ H_\psi \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

onde $[R]$ é uma matriz de transformação 4×4 , dada por

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.4.2 Modelo Homogêneo de 3 Camadas.

Neste modelo, o painel de compósito mostrado na figura 5 é representado por um modelo de 3 camadas mostrado na figura 10. Este modelo difere da seção anterior pelo fato de que o centro da camada é homogêneo (i.e., ϵ_{off} é constante na região 2).

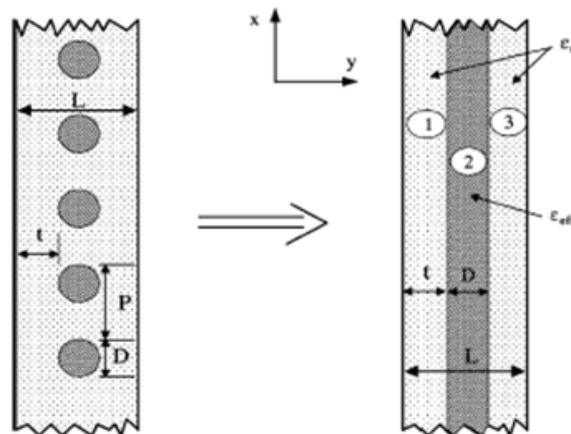


Figura 10- Modelo Homogêneo de 3 Camadas, onde $\epsilon = \epsilon_{\text{off}}$ é constante em toda camada 2

Daqui em diante, este modelo será denominado modelo de 3 camadas homogêneo. Neste modelo, as camadas 1 e 3 tem uma espessura t e as propriedades constantes do material ϵ_{off} . A camada 2 tem uma espessura D e as propriedades do material são dadas em (3). O fator de preenchimento g necessário para expressar o modelo de 3 camadas homogêneo é constante com y' , e representa simplesmente o volume relativo do espaço ocupado pela fibra no período da célula representado pela figura 11.

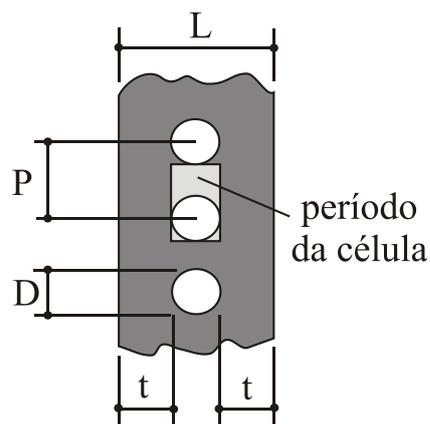


Figura 11 – Representação para o Período da Célula do Modelo Homogêneo de 3 Camadas

O fator de preenchimento pode ser expresso por:

$$g = \frac{\pi D^2}{4PD} = \frac{\pi D}{4P} \quad (3.9)$$

Entretanto, este modelo captura menos detalhes do painel de fibra que o modelo de 3 camadas não homogêneo anteriormente descrito.

3.4.3 Modelo Homogêneo de 1 Camada.

Este modelo é mais simples que os modelos discutidos anteriormente e consiste em representar um painel de fibra compósito como um material de camada simples e está ilustrado na figura 12.

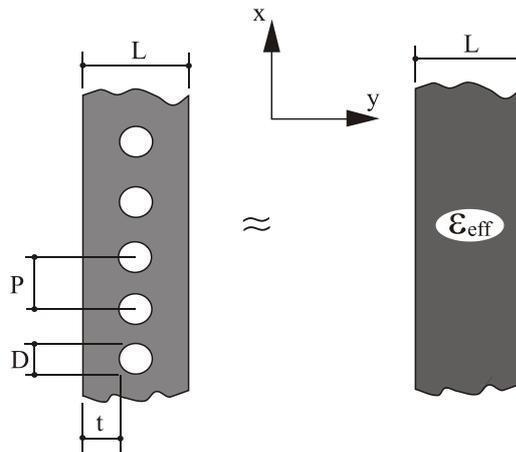


Figura 12 – Modelo Homogêneo de 1 Camada

Esta camada simples tem espessura L e suas propriedades materiais são dadas na expressão mostrada na Equação (3). O fator de preenchimento g necessário nesta expressão para este modelo é constante, é o volume relativo do espaço ocupado pela fibra num período da célula como ilustrado na Figura 13, e o fator g de preenchimento é dado pela expressão:

$$g = \frac{\pi D^2}{4PL} \quad (3.10)$$

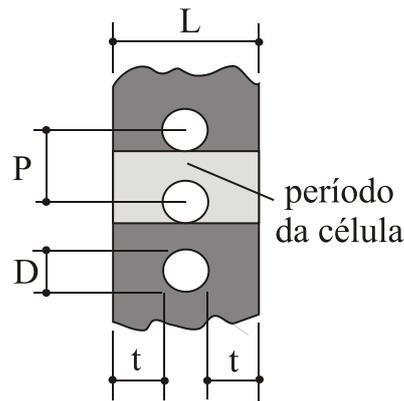


Figura 13 – Representação do Período da Célula para o Modelo Homogêneo de 1 Camada,

Este modelo (i.e., modelagem de um painel simples com uma camada equivalente) é uma aproximação do modelo de três camadas [1], [27], [28]. A diferença entre o modelo de três camadas e o modelo de uma camada está na expressão usada para as propriedades efetivas da camada. O modelo de uma camada considera menos detalhes das fibras que os dois modelos de 3 camadas, sendo menos acurado para altas frequências do que os outros dois modelos anteriores.

Os três modelos apresentados nas seções 3.4 não são os únicos modelos de camada eficazes que podem ser obtidos, logo, se diferentes formas de calcular a média são usadas, parâmetros eficazes diferentes podem ser obtidos. Entretanto, os três modelos apresentados aqui são simples de se obter, possuem boa precisão e podem ser usados para ilustrar que quanto mais detalhes da geometria da fibra de compósito é considerada com os diferentes modelos, o limite da frequência superior para validação aumenta.

3.5 Estruturas de Compósito de Painel Múltiplo.

È necessário um esclarecimento sobre o uso de modelos em camadas apresentados na seções anteriores, quando usados para analisar estruturas de painéis de múltiplas camadas como mostrado na figura 4. Quando o termo painel de fibra compósito é aqui usado, este se

refere à estrutura mostrada na figura 5, que é uma estrutura consistindo em fibras alinhadas em uma só direção, encaixada no centro de uma matriz, ou resina, com espessura L . Algumas estruturas de compósito analisadas consistem de duas ou mais estruturas de painéis de múltipla camada, como mostrada na figura 4. Em geral, as fibras em cada painel da estrutura de compósito podem ser orientadas em diferentes direções. Quando é usado um dos modelos apresentados aqui, cada painel de uma estrutura de painel múltiplo é representado por um dos três modelos discutidos anteriormente.

Por exemplo, considere-se a estrutura de compósito de três painéis conforme mostrada na figura 1. Se qualquer um dos modelos de 3-camadas apresentados na seção 3.4 for usado para esta estrutura de painel múltiplo, então cada painel será representado por três camadas. Assim, os três painéis de compósito da figura 4 serão representados por um total de nove camadas. Por outro lado, se o modelo de uma camada (seção 3.4.3) foi usado para representar esta estrutura de painéis múltiplos, então cada painel será representado por uma camada somente. Assim, os três painéis de compósito mostrados na figura 4 serão representados por um total de três camadas. Temos que ter sempre em mente que quando as fibras são orientadas em direções diferentes do campo incidente, logo a transformação discutida na seção 3.4.1 será necessária.

3.5.1 Exemplo Numérico com Discussão dos Diferentes Modelos.

Conforme encontrado na literatura [1], os vários painéis de compósito são investigados para avaliar a exatidão dos três modelos apresentados. Os primeiros exemplos investigam a habilidade dos modelos de calcular propriedades da reflexão dos painéis compostos, e o último conjunto de exemplos investiga a habilidade dos modelos de calcular a eficiência da blindagem dos painéis. Para este fim, são estudadas as diferentes ordens de aproximação associada com os três modelos. Os resultados dos três modelos de camadas equivalentes são

comparados com os resultados obtidos da solução numérica de onda completa do composto periódico real da fibra, onde uma solução numérica pode ser escolhida para esta comparação.

Os resultados do Método dos Elementos Finitos (MEF) são considerados convergentes para uma solução numérica precisa onde uma tolerância desejada é obtida. Para os resultados mostrados neste trabalho, os resultados do MEF foram calculados para aumentar a resolução até que uma convergência de 10^{-5} fosse obtida (como medido pela mudança dos coeficientes de reflexão ou transmissão na maior frequência apresentada).

Faz-se necessário entender como o cálculo do coeficiente de reflexão e a eficiência da blindagem foram obtidos com os modelos de camadas equivalentes. Uma vez que o compósito de fibra é substituído pela camada equivalente, o coeficiente de reflexão e a eficiência da blindagem são obtidos resolvendo um problema clássico de onda plana incidente sobre um meio em camadas. Nesta aproximação, Os parâmetros efetivos dos materiais para cada camada são usados para determinar a constante de propagação, a impedância e a admitância de cada camada, de onde o coeficiente de transmissão ou recepção pode ser calculado eficientemente [29], [30], [31] e [32]. Quando uma camada não homogênea está presente, a mesma pode ser subdividida em muitas subcamadas [30].

Nos resultados apresentados neste trabalho, somente 10 ou 15 subcamadas (na região 2 do modelo não homogêneo de 3 camadas) são necessários para capturar com precisão o comportamento de camadas não homogêneas.

3.5.2 Painel Simples de Compósito de Fibra de Carbono.

A primeira estrutura de compósito investigada é um painel simples, com as fibras orientadas na direção z (ver figura 6). A figura 14 mostra os resultados do coeficiente de reflexão obtidos de um modelo não homogêneo de 3 camadas para $D = 0,05$ mm, $p = 0,1$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ e $\sigma_b = 10000$ S/m. Os resultados nesta Figura são

para um campo elétrico (E) polarizado nas direções z e x . Ainda nesta figura são mostrados os coeficientes de reflexão obtidos de soluções utilizando Elementos Finitos para um campo E propagando-se através da fibra de compósito. A comparação com resultados numéricos indica que o modelo não homogêneo de 3 camadas bastante acurado na aproximação com a reflexão da fibra de compósito. A forte natureza anisotrópica da reflexão indica que esta condução na fibra se comporta como uma grade do período eletromagnético [33], [34]. Quando o comprimento de onda é grande comparado com o período, o campo incidente E paralelo as fibras não penetra nas fibras de compósito e é totalmente refletido, visto que o campo incidente E paralelo às fibras é quase totalmente transmitido. A figura 12 nos mostra o resultado da mesma estrutura para várias condutividades da fibra (com polarização em z). Mais uma vez, podemos notar a correlação entre as duas soluções sobre uma larga faixa de frequências [1] e para vários valores de σ_b .

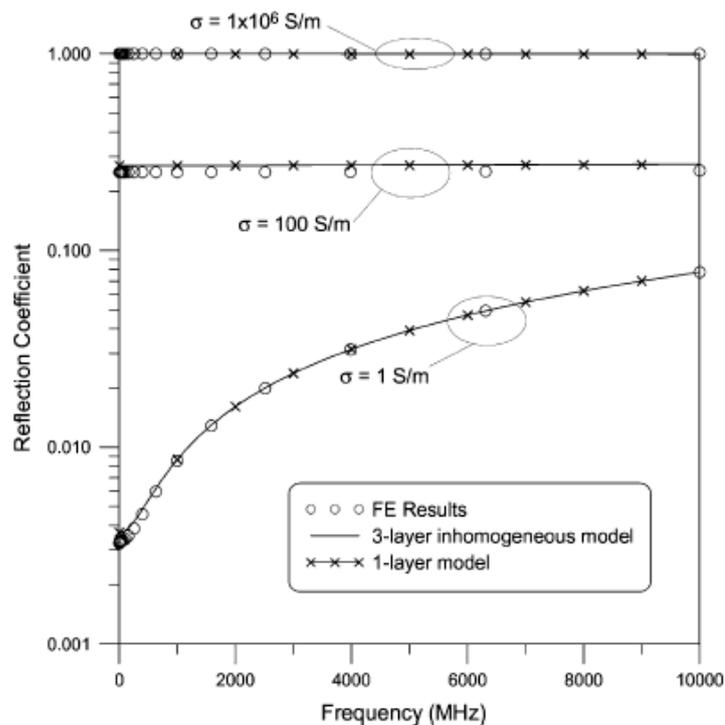


Figura 14 – Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Painel de Fibra Compósito Simples com: $D = 0,05$ mm, $P = 0,1$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_r = 2,0\epsilon_o$ e $\sigma_b = 10000$ S/m[1].

Esta comparação indica que o modelo não homogêneo de 3 camadas é mais preciso. Pode-se definir também qual o modelo menos preciso. Na figura 14 estão os resultados do modelo de 1 camada discutido na seção 3.4.3. Para essa estrutura particular é mostrado que o modelo de 1 camada captura detalhes físicos do painel suficientes para ser considerado acurado. Entretanto, este não é o caso se as dimensões do painel aumentam, se a estrutura se torna mais complicada, e/ou se a frequência de operação aumenta como veremos mais adiante.

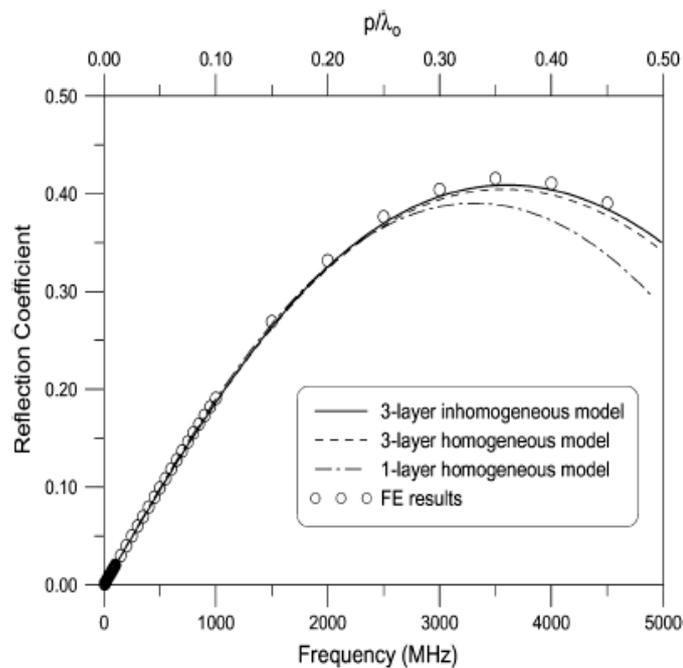


Figura 15 - Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Painel de Fibra Compósito Simples com: $D = 0,05$ mm, $p = 0,1$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ e vários valores de σ [1].

A próxima estrutura de compósito a ser investigada é um painel simples com fibras orientadas na direção z (ver figura 15) e o campo polarizado na direção x . Para este exemplo $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma_b = 0$. A figura 16 mostra o coeficiente de reflexão para os três modelos. Também nesta figura são mostrados os resultados obtidos da solução de MEF. Note que o modelo não homogêneo de três camadas é o mais preciso. Os resultados para o modelo de três camadas começam a cair em 4 GHz, e os resultados para o modelo de 1 camada começa a cair em 2,5 GHz.

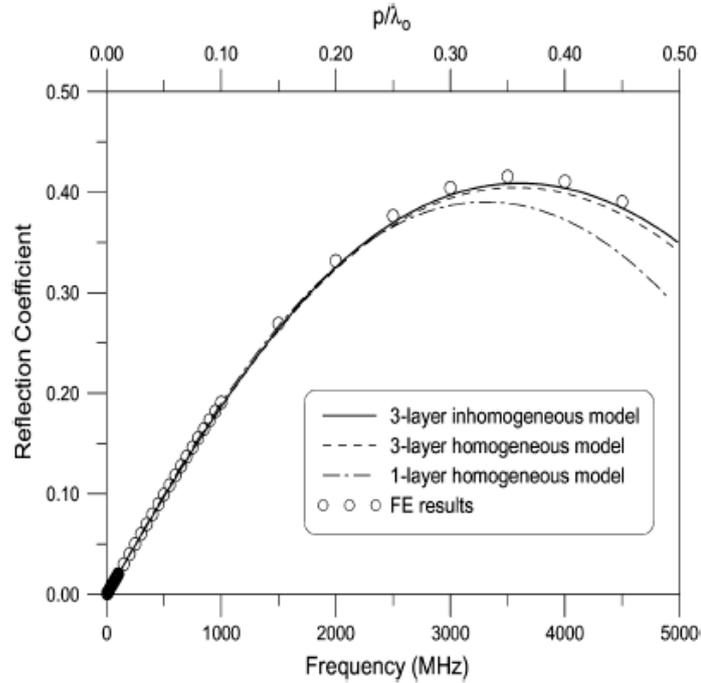


Figura 16 - Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Pannel de Fibra Compósito Simples com: $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$. λ é o comprimento de onda no espaço livre e o campo E é ortogonal as fibras[1].

A figura 17 mostra os resultados para a mesma estrutura, mas para o campo E com polarização paralela as fibras.

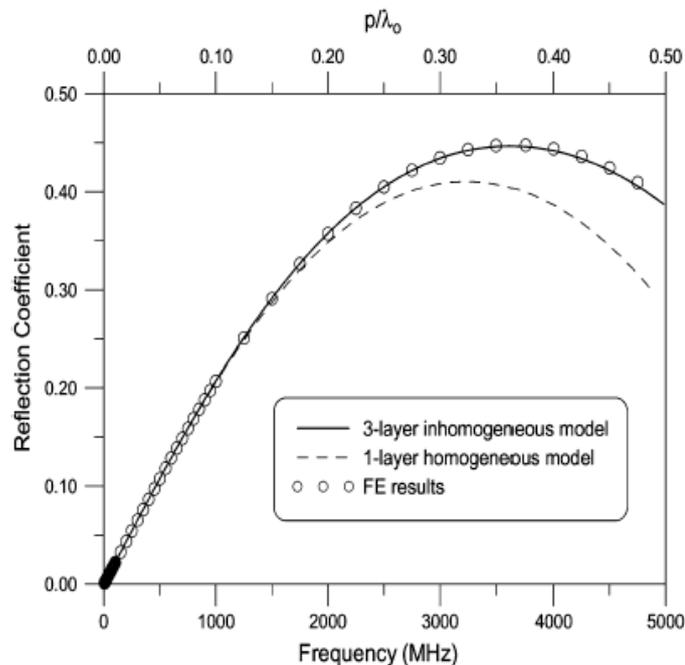


Figura 17 - Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Pannel de Fibra Compósito Simples com: $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$ S/m. λ_o é o comprimento de onda no espaço livre [1].

3.5.3 Painel Múltiplo de Compósito de Fibra de Carbono.

Os exemplos acima trataram até agora de painéis de compósito simples (ver Figura 2). A real distinção entre os três diferentes modelos pode ser visto para estruturas de compósito mais complicadas. No próximo exemplo, o compósito de dois painéis como é mostrado na figura 18 é analisado. Nesta estrutura, as fibras nos dois painéis estão alinhadas ortogonalmente umas com as outras. Um conjunto de fibras está alinhado ao longo do eixo x e a outra ao longo do eixo y.

Para cada painel, $D = 7.5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$ S/m. Cada painel desta estrutura de compósito de dois painéis é substituído por um dos três modelos discutidos na Seção 3.4. Para o modelo não homogêneo de 3 camadas, cada painel é representado por três camadas. Entretanto, a estrutura de dois painéis é modelada por um total de seis camadas, referindo-se ao modelo não homogêneo de seis camadas e o modelo homogêneo de seis camadas, respectivamente. Enquanto para o modelo de 1 camada, duas camadas diferentes são usadas para o painel composto de duas camadas, resultando num total de duas camadas e indicado como um modelo de duas camadas para este exemplo. A Figura 19 mostra o coeficiente de reflexão obtido dos três modelos. Esta Figura mostra também os resultados obtidos de uma solução usando Elementos Finitos. O modelo não homogêneo de seis camadas é muito preciso na frequência de 9,5 GHz, enquanto os outros modelos quebram os valores em frequências mais baixas. O modelo de painel de duas camadas cai em 3 GHz e o modelo homogêneo de seis camadas cai em aproximadamente 7,5 GHz.

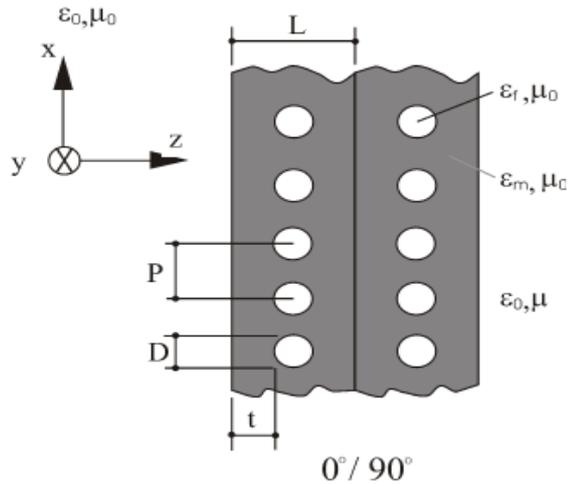


Figura 18 - Compósito de Fibra de duas Camadas organizadas ortogonalmente com:
 $D = 7.5 \text{ mm}$, $P = 15 \text{ mm}$, $L = 15 \text{ mm}$, $t = 3,75 \text{ mm}$

A razão pela qual os diferentes modelos caem em diferentes frequências pode ser explicada por argumentos físicos. Note que para frequências acima de 10 GHz, o coeficiente de reflexão experimenta diversas ressonâncias. Os diferentes modelos exibem diferentes comportamentos de ressonância, os quais são resultados diretos do número e espessura de cada camada usada nos diferentes modelos. Estes modelos diferentes capturarão diferentes níveis ou ordens de ressonância na estrutura de compósito de dois painéis.

Para ilustrar este ponto, devemos observar como cada painel da estrutura de compósito de dois painéis é modelado. Por exemplo, quando cada painel é modelado como um painel simples, a ressonância em cada painel é governada por uma camada simples com espessura de 15 mm. Por outro lado, quando cada painel é modelado com modelo de 3 camadas homogêneo ou não homogêneo, a ressonância em cada painel é governada pela ressonância do meio das três camadas. No painel de compósito puro há um comportamento de ressonância complicado resultado da onda se propagando através do painel. Primeiramente, uma vez que a onda entra no painel e se propaga pelas fibras, a reflexão ocorre na sua superfície. A onda continua a se propagar através das fibras e a reflexão ocorrerá no final das mesmas. Reflexões contínuas ocorrerão com a propagação da onda

através da região não homogênea das fibras (i. e., a onda enxerga diferentes seções cruzadas de fibras quando se propaga através das mesmas). Esta complicada interação do campo, fica melhor representada por um modelo não homogêneo, como visto na figura 19. A terceira camada do modelo homogêneo captura mais fenômenos de ressonância entre as camadas, mas não captura a ressonância que ocorre através das fibras.

O campo E é polarizado na direção x, com as fibras da primeira camada alinhadas perpendicularmente ao campo incidente e as fibras da segunda camada alinhadas paralelamente ao mesmo campo.

A importância de se capturar maiores detalhes do painel de compósito, especialmente nas altas frequências, é enfatizada a seguir.

Uma aproximação que pode ser usada para modelar uma estrutura de compósito do tipo painel-múltiplo é modelar a estrutura inteira do painel simples como uma camada simples.

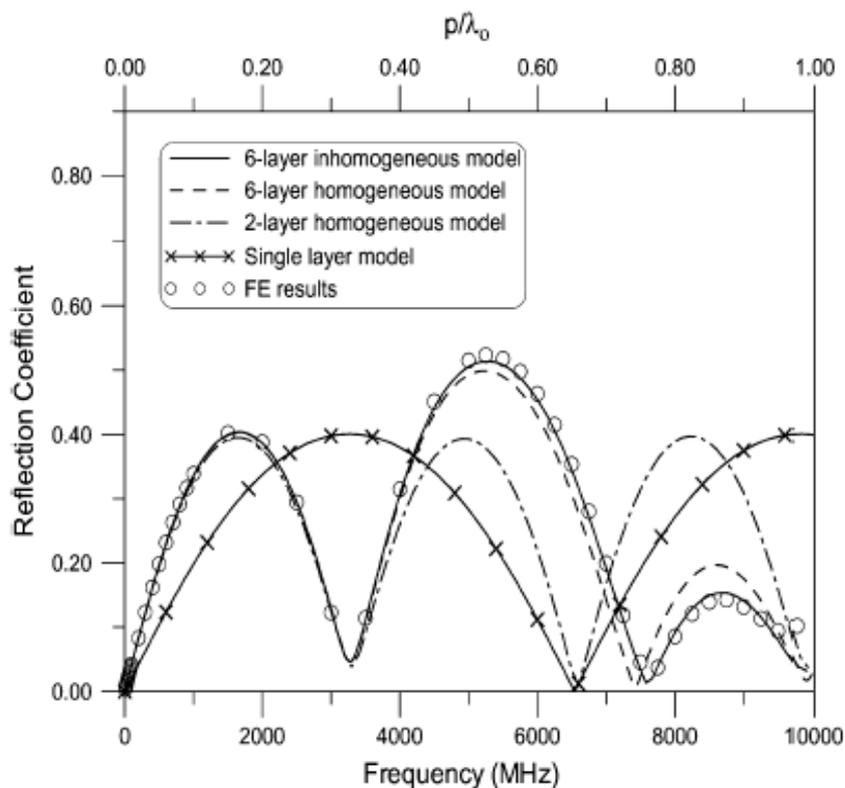


Figura 19 - Magnitude do Coeficiente de Reflexão para Fibra de Compósito de duas Camadas com: $D = 7,5 \text{ mm}$, $P = 15 \text{ mm}$, $L = 15 \text{ mm}$, $t = 3,75 \text{ mm}$, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_0$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_0$ e $\sigma = 0 \text{ S/m}$ [1].

Tal modelo será válido somente para baixas frequências e, desde que não seja considerada a ressonância nenhuma camada. Por exemplo, o painel duplo da figura 15 seria modelado como um painel simples com espessura de $2L$, com as propriedades do material dadas por [35] e [36]

$$\epsilon_{ef} = \sqrt{\epsilon_z \epsilon_x}$$

onde ϵ_z e ϵ_x são dados em (3.5) e o valor de g em (3.10).

Neste modelo de camada simples, a forte natureza anisotrópica das fibras orientadas ortogonalmente pode ter sua média calculada pela média geométrica das propriedades dos dois materiais ortogonais (i.e., ϵ_x e ϵ_z). A figura 16 mostra os resultados deste modelo de camada simples da estrutura de compósito de dois painéis comparada com outros modelos e com os resultados do MEF. O modelo de camada simples não pode capturar as ressonâncias complicadas da estrutura de compósito de duas camadas. Entretanto, como esperado, o modelo que captura mais ressonâncias fundamentais da estrutura de painel múltiplo (i. e., modelo não homogêneo) fica mais acurada com o aumento da frequência. Estes pontos serão melhor estudados nos 4 exemplos seguintes. Devemos estar atentos ao cálculo da eficiência da blindagem (SE) com estes modelos de camadas equivalentes. A eficiência SE é que pode ser definida como a taxa (em dB) do campo elétrico E transmitido através do compósito pelo campo elétrico E incidente.

$$E = -20 \text{Log}_{10} \left(\frac{E^t}{E^i} \right) \quad (3.11)$$

Onde E^t é o campo elétrico transmitido através da estrutura de compósito e E^i é o campo elétrico incidente. O primeiro exemplo é do compósito de duas camadas com as mesmas dimensões do compósito analisado na figura 16 (i.e., um conjunto de fibras está alinhado ao longo do eixo x e o outro está alinhado ao longo do eixo z , e para cada painel $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$ S/m). A figura 17 mostra uma comparação do SE obtido de um modelo não homogêneo de 3 camadas com o resultado

obtido utilizando o MEF. Novamente, é possível notar uma boa correlação entre os dois resultados para o SE calculado, mesmo para P/λ_0 próximo de 1, onde λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre.

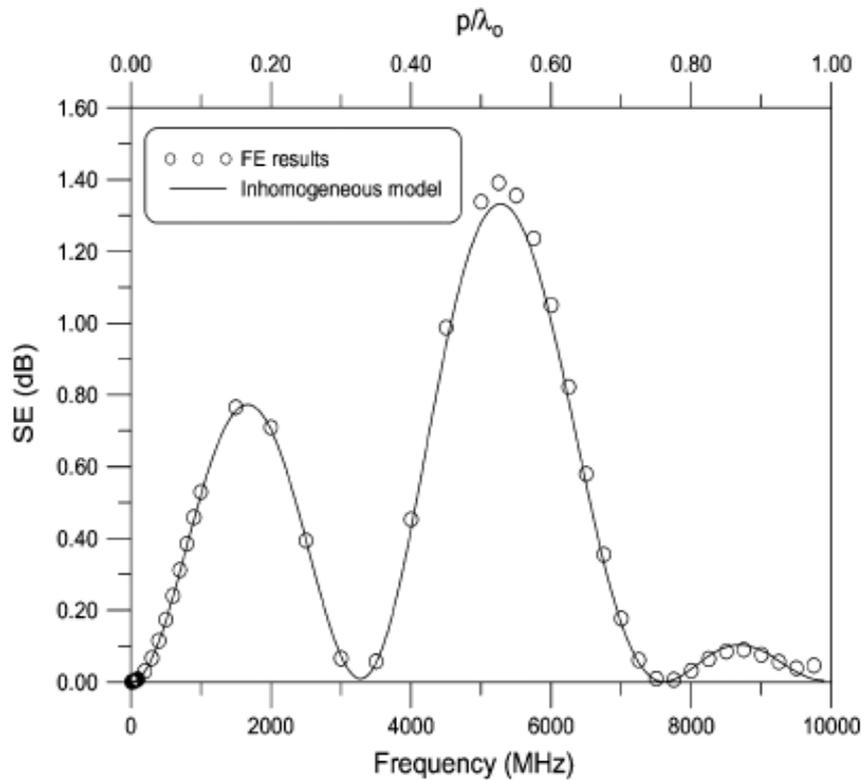


Figura 20 – SE para uma Fibra de Compósito de duas Camadas com: $D = 7,5$ mm, $P = 15$ mm, $L = 15$ mm, $t = 3,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 4,0\epsilon_o$ e $\sigma = 0$ S/m[1].

No próximo conjunto de exemplos, olharemos para o compósito com dimensões muito menores para examinar em qual frequência estes diferentes modelos de camadas falham. Na figura 18 é mostrado a eficiência da blindagem SE para um painel de compósito com $D = 0,05$ mm, $P = 0,10$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ para ambos $\sigma = 1$ S/m. e $\sigma = 1 \cdot 10^4$ S/m. Note que o modelo não homogêneo de 3 camadas e o modelo de uma camada capturam a oscilação para este caso de baixa condutividade e são indistinguível dos resultados de MEF para frequências da ordem de 100 GHz. Entretanto, para o caso de alta condutividade, o modelo de 1-camada é falho na frequência que está em aproximadamente numa ordem de magnitude mais baixa do que a magnitude do modelo de 3-camadas Assim,

podemos ver que como a condutividade aumenta, o modelo não homogêneo desempenha melhor a captura de ressonâncias internas do que o modelo de 1-camada.

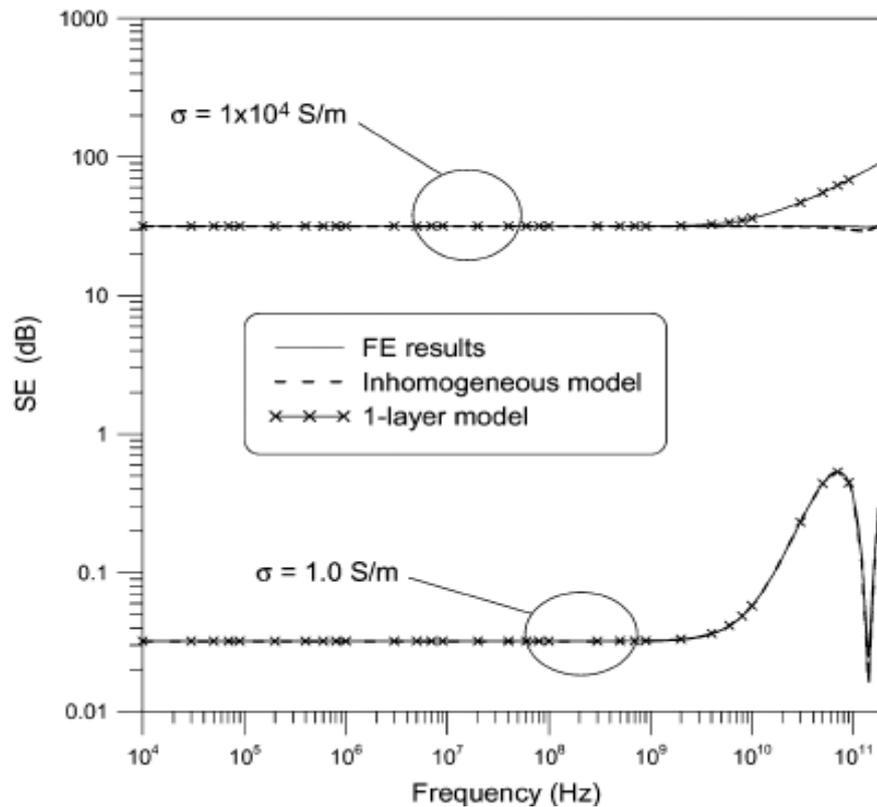


Figura 21 - SE para uma Fibra de Compósito de Camada Simples com: $D = 0,05$ mm, $P = 0,10$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ para ambos $\sigma = 1$ S/m. e $\sigma = 1. 10^4$ S/m. o campo E incidente está paralelo às fibras [1].

Para painéis-múltiplos de fibras de compósito, as ressonâncias internas das diferentes camadas tornam-se importantes, e o modelo de 1 camada não pode capturar este comportamento, visto que o modelo de 3-camadas faz um excelente trabalho de representação de um painel múltiplo de material composto, Isto será ilustrado no exemplo final. A próxima estrutura a ser analisada consiste de quatro painéis com fibras orientadas em diferentes direções. No primeiro painel, as fibras são orientadas ao longo do eixo x. No segundo painel, as fibras são orientadas ao longo do eixo z. O terceiro painel tem fibras orientadas ao longo do eixo x, e o último painel tem fibras orientadas ao longo do eixo z. Para cada painel, $L = 0,75$ mm, $D = 0,05$ mm, $P = 0,10$ mm, e $\epsilon_m = \epsilon_f = 2,0\epsilon_o$. Cada painel da estrutura de quatro painéis é representado por um dos três modelos discutidos na Seção 3.4.

A eficiência da blindagem SE obtida de dois desses três modelos é mostrada na figura 19 para ambos $\sigma = 1 \text{ S/m}$ e $\sigma = 1.10^4 \text{ S/m}$. Os resultados obtidos de MEF também são mostrados nessas figuras. Note que para o caso de baixa condutividade, o modelo não homogêneo e o modelo de 1-camada produzem uma boa correlação. Por outro lado, para o caso de alta condutividade, o modelo de 1-camada falha em aproximadamente 2 GHz, enquanto os resultados do modelo não homogêneo são indistinguíveis (mesmo capturando as ressonâncias) se comparados com os resultados obtidos a partir de MEF para frequências próximas de 100 GHz.

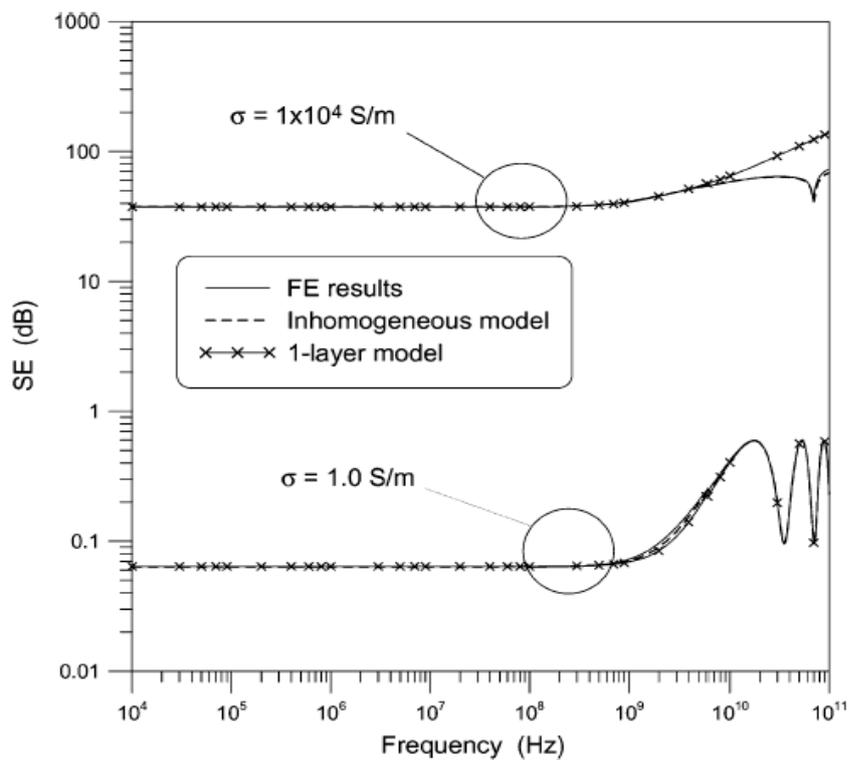


Figura 22 – SE para quatro Painéis de Fibra de Compósito com cada painel tendo: $D = 0,05 \text{ mm}$, $P = 0,10 \text{ mm}$, $L = 0,75 \text{ mm}$, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ para ambos $\sigma = 1 \text{ S/m}$. e $\sigma = 1.10^4 \text{ S/m}$. O campo E incidente é ortogonal às fibras no primeiro painel [1].

A comparação com os resultados numéricos indica que o modelo não homogêneo é mais preciso na aproximação da SE do painel-múltiplo de fibra de compósito. Podemos ver que, como a condutividade se torna alta, o modelo não-homogêneo trabalha melhor do que o

modelo de 1 camada na captura de ressonâncias internas desta estrutura múltipla de painel de compósito, especialmente para frequências altas.

Conclusões similares às acima expostas podem ser feitas sobre uma estrutura de dois painéis. A figura 20 mostra a SE para uma estrutura de compósito de dois painéis onde, para cada painel $L = 0,75$ mm, $D = 0,05$ mm, $P = 0.10$ mm, $L = 0,75$ mm e $\epsilon_m = \epsilon_f = 2,0\epsilon_o$. Como no último exemplo, note que para o caso de baixa condutividade, o modelo não homogêneo e o modelo de 1-camada produzem uma boa correlação.

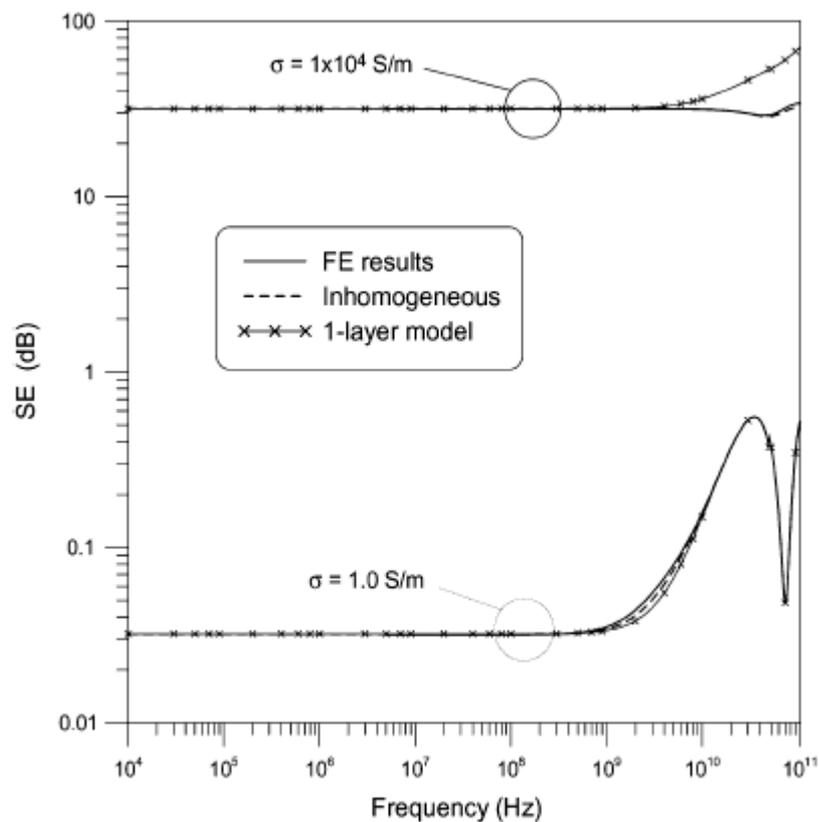


Figura 23 – SE para dois Painéis de Fibra de Compósito com cada painel tendo: $D = 0,05$ mm, $P = 0.10$ mm, $L = 0,75$ mm, $\epsilon_m = 2,0\epsilon_o$, $\epsilon_f = 2,0\epsilon_o$ para ambos $\sigma = 1$ S/m. e $\sigma = 1.10^4$ S/m. O campo E incidente é ortogonal às fibras no primeiro painel [1].

Em contrapartida, para o caso de alta condutividade, o modelo de 1-camada falha em aproximadamente 2 GHz, enquanto que os resultados do modelo não-homogêneo são indistinguíveis (mesmo capturando as ressonâncias) em relação aos resultados obtidos de

MEF para frequências tão altas quanto 100 GHz. Novamente, isto indica que o modelo não-homogêneo é mais preciso na aproximação da SE de painéis múltiplos de fibra de compósito

Cada painel individual para as três estruturas de compósito analisadas nas figuras 18, 19 e 20 é o mesmo. É interessante observar os resultados dessas três figuras; vemos que, como o número de painéis aumenta (i.e., um aumento na espessura total da estrutura), a localização da frequência da primeira ressonância na resposta do compósito diminui.

Os resultados aqui apresentados são para incidência normal somente. Entretanto, a representação do tensor ϵ e μ , como mostrado em (1) e (2) fazem com que os parâmetros efetivos trabalhem em um ângulo de incidência arbitrário. Note que, como o ângulo de incidência muda de 0° para 90° , o período máximo pelo qual os parâmetros efetivos trabalharão é diminuído, uma vez que os lóbulos (modos de primeira ordem) que tocam o ponto de incidência irão aparecer precocemente.

A formulação das propriedades do material equivalente ao caso homogêneo é também muito útil em códigos numérico para análise de penetração de campo (SE) dentro de estruturas, eliminando a necessidade de resolver espacialmente as fibras.

Com estes modelos de camada eficazes, é possível desenvolver as condições de limite eficientes da matriz de transferência (TMBC) para códigos computacionais grandes para analisar o acoplamento do EM para vários problemas, incluindo o acoplamento em estruturas compostas [1]. Neste caso, é usada uma técnica para tornar-se eficiente as matrizes de transformação de admitância e de impedância de transferência da camada de compostos. O uso do TMBC elimina a necessidade resolver espacialmente detalhes característicos do material composto, o que diminui o tempo de execução computacional do problema do acoplamento.

A aproximação de TMBC requer ainda uma solução de um meio mergulhado em sua execução.

4. MEDIDAS DE PERMISSIVIDADE RELATIVA COMPLEXA

O Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos da Divisão de Física Aplicada do Instituto de Estudos Avançados dispõe de instrumentação para a realização de ensaios de Permissividade e Permeabilidade Relativas Complexas ($\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$) na faixa de Radio Freqüência (RF) em materiais sólidos.

Uma vez tendo esta disponibilidade, foi evidenciada a necessidade de se medir permissividade relativa complexa do material para se obter um indicativo dos efeitos da anisotropia na fibra com relação às descargas elétricas,

A partir das medidas de permissividade poderão ser obtidas outras propriedades eletromagnéticas tais como: refletividade, condutividade, etc.

Os experimentos para realização dessas medidas foram delineados levando-se em conta uma configuração de montagem de RF que garantisse com objetividade as medidas em três eixos (X, Y e Z) com um número reduzido de amostras para a análise dos resultados com o menor erro experimental da medida da variável de resposta.

A técnica empregada para efetuar as medidas de caracterização de impedância foi a técnica de medida em uma linha coaxial com terminação em aberto.

Por se tratar de material rígido, pré-impregnado em resina epóxi, levando-se em conta que no início deste estudo não se detinha experiência anterior com o mesmo e considerando a forma como um painel de compósito de multicamadas pode ser atingido por uma descarga elétrica, optou-se por utilizar uma estrutura e uma tecnologia conhecida pelos colaboradores do laboratório. Desta forma, as amostras foram confeccionadas em função da disponibilidade dos recursos e equipamentos disponíveis.

O delineamento dos experimentos, considerando desde a concepção do modelo físico-matemático adotado até a análise dos resultados requereu o estabelecimento de uma metodologia aplicada aos ensaios realizados como descritos a seguir.

4.1 Metodologia Aplicada aos Ensaio de Permissividade.

A metodologia aplicada aos ensaios foi dividida em seis etapas, como segue:

- 1° - Modelo físico–matemático para caracterização da anisotropia na permissividade Complexa;
- 2° - Usinagem das amostras;
- 3° - Tratamento superficial
- 4° - Arranjo Experimental e Calibração da Instrumentação
- 5° - Medidas de Permissividade
- 6° - Análise dos resultados.

4.1.1 Modelo Físico-Matemático para Caracterização da Anisotropia na Permissividade Relativa Complexa.

O modelo Físico-Matemático para Caracterização da Anisotropia na Permissividade Complexa do Compósito de Fibra de Carbono foi definido a partir da escolha da técnica de medida em RF, que era a técnica disponível no LSE. Para a faixa de frequências desejada, optou-se por usar uma linha de transmissão terminada em aberto, compatível com a faixa dinâmica do equipamento e cujo equacionamento é apresentado como segue:

Considerando-se as impedâncias de entrada de uma linha de transmissão e que o material estudado é um dielétrico [37], podemos admitir que a permeabilidade complexa da amostra é igual a $1(\mu' = 1, \mu'' = 0)$, então:

$$\mu_r = \mu'_r - j \mu''_r \quad (4.1)$$

O valor da permissividade do material pode ser determinado a partir da equação da impedância para uma terminação aberta [37], como segue:

$$Z_{in}^{open} = -jZ_0 \cot(\gamma d) \quad (4.2)$$

Para uma amostra com comprimento d muito pequena é válida a aproximação:

$$\cot(\gamma d) \cong \frac{1}{\gamma d} \quad (4.3)$$

Então a impedância de entrada será:

$$Z_{in} = -jZ_0 \frac{1}{\gamma d} \quad (4.4)$$

onde a constante de propagação γ para a amostra no modo TEM pode ser escrita como segue:

$$\gamma = k_0 \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (4.5)$$

onde k é o número de onda no vácuo pode ser escrito como:

$$k_0 = \frac{\omega}{c} \quad (4.6)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo.

como $\mu_e = 1$

então,
$$\gamma = k_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (4.7)$$

E sua impedância característica pode ser obtida como segue:

$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r}} \log\left(\frac{a}{b}\right) \quad (4.8)$$

onde η é a impedância intrínseca do material no vácuo e pode ser escrita como:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (4.9)$$

fazendo, $\mu_0 = 1$,

temos que

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0}} \quad (4.10)$$

É conveniente expressarmos a impedância característica Z_0 em termos de impedância Z_0^{ar} característica da mesma linha exposta ao ar como segue:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r}} Z_0^{ar} \quad (4.11)$$

Substituindo as equações (6) e (7) em (4) temos:

$$Z_{in} = -j \frac{c}{\omega d \varepsilon_r} Z_0^{ar} \quad (4.12)$$

Para tornar explícita a permissividade escrevemos:

$$\varepsilon_r = -j \frac{c}{\omega d} \left(\frac{Z_0^{ar}}{Z_{in}} \right) \quad (4.13)$$

Sabendo-se que ε_r é uma grandeza complexa, esta pode ser representada por:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (4.14)$$

A parte real pode ser definida por:

$$\varepsilon_r'' = - \left[\frac{c}{\omega d} \frac{Z_0^{ar}}{|Z_{in}|^2} \right] X_{in} \quad (4.15)$$

E a parte imaginária por:

$$\varepsilon_r' = - \left[\frac{c}{\omega d} \frac{Z_0^{ar}}{|Z_{in}|^2} \right] R_{in} \quad (4.16)$$

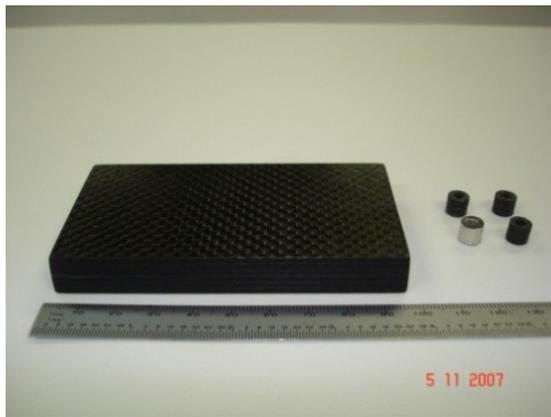
Os eixos das amostras cilíndricas são paralelos aos eixos cartesianos, proporcionando a avaliação qualitativa da anisotropia na permissividade complexa do material. Desta maneira, a permissividade efetiva da estrutura do CFC pode ser representada pelo tensor:

$$\varepsilon_{eft} = \begin{pmatrix} \alpha e_i & \beta e_j & 0 \\ 0 & \beta e_j & \gamma e_k \\ \alpha e_i & 0 & \gamma e_k \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

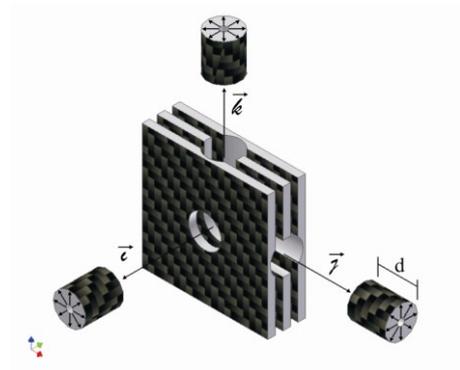
A avaliação da anisotropia elétrica é efetuada com a diagonalização do tensor de permissividade.

4.1.2 Usinagem das amostras

A partir de uma placa de Fibra de Carbono Composto de sessenta camadas foram fabricadas dez amostras, no mínimo, em cada um dos três eixos, como ilustrado na figura 22 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 24 - (a) Placa de CFC de 60 Camadas;

(b) Amostras Retiradas de 3 Eixos

As amostras foram usinadas obedecendo a uma geometria cilíndrica com um furo axial, conforme ilustrada na figura 25, para acondicioná-la adequadamente no conector de um porta-amostra acoplado ao medidor [38].

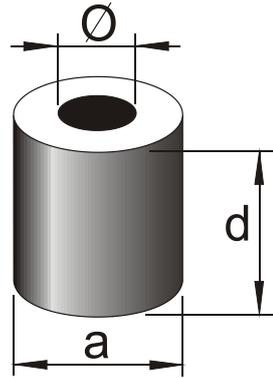


Figura 25 – Amostra de CFC usinada

Para oferecer um bom casamento de impedância, as amostras foram confeccionadas com certa precisão, de modo a diminuir o erro introduzido pela permissividade do ar, caso a mesma fique com folga dentro do conector. As medidas relacionadas a cada cota indicada na figura anterior constam na tabela 1.

Tabela 1-Medida das Cotas da Amostra

Cota	Medida (mm)
a	6,93±0,05
d	10,0 ±0,1
φ	2,93±0,05

Os eixos das amostras cilíndricas foram fresados paralelamente aos eixos cartesianos para proporcionarem a avaliação qualitativa da anisotropia na permissividade complexa do material em direções ortogonais.

Quanto aos procedimentos de medidas geométricas das amostras, o furo central foi medido nas dependências do IFI-CTA, utilizando o sistema SISMETRA, que fornece medidas com precisão de milésimos de milímetros para um refinamento na escolha das seis amostras em cada eixo.

Após uma seleção visual para identificar possíveis fissuras (trincas) e/ou assimetria através da medição da altura e do diâmetro externo, um teste PASSA/NÃO PASSA (GO-NO GO) foi realizado no pino central do conector porta-amostra para identificar a necessidade de ajuste no furo central da amostra como pode ser ilustrado nas figuras 26(a) e (b).

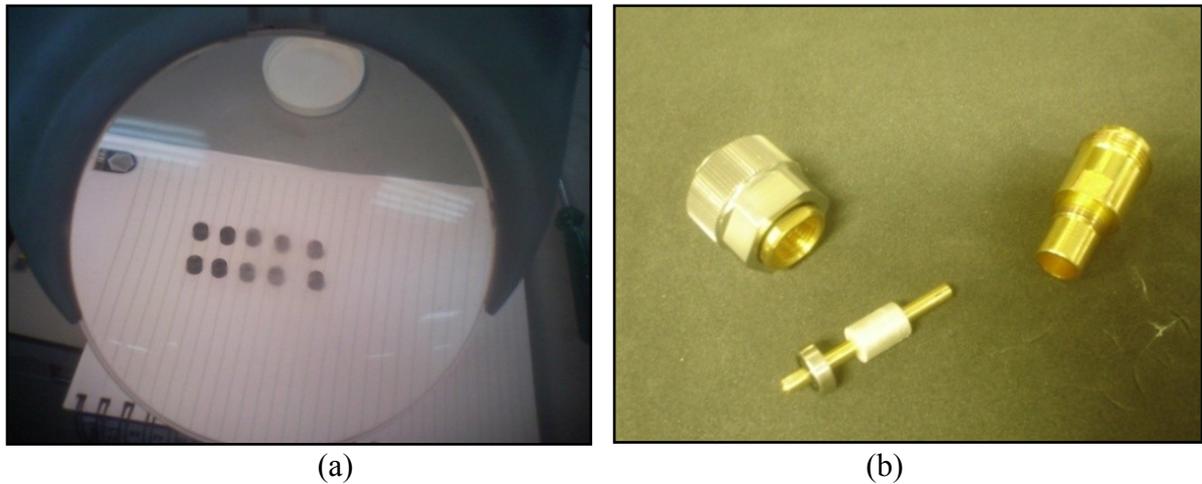


Figura 26 – (a) Seleção Visual das Amostras; (b) Teste Passa-Não Passa no Conector.

4.1.3 Tratamento Superficial das Amostras

A seguir, as extremidades das amostras sofreram uma leve abrasão para então serem limpas com álcool isopropílico até eliminar qualquer possibilidade de curto-circuito entre as faces de contato com o conector.

Para reduzir o erro de medida com a introdução da permissividade relativa complexa do ar, as faces das amostras que fazem contato com o conector foram recobertas com tinta a base de prata e qualificada para garantir um bom casamento de impedância na execução das medidas.

4.1.4 Arranjo Experimental e Calibração da Instrumentação

Para a execução das medidas de permissividade relativa das amostras foi definido um arranjo experimental conforme esquematizada pela figura 27.

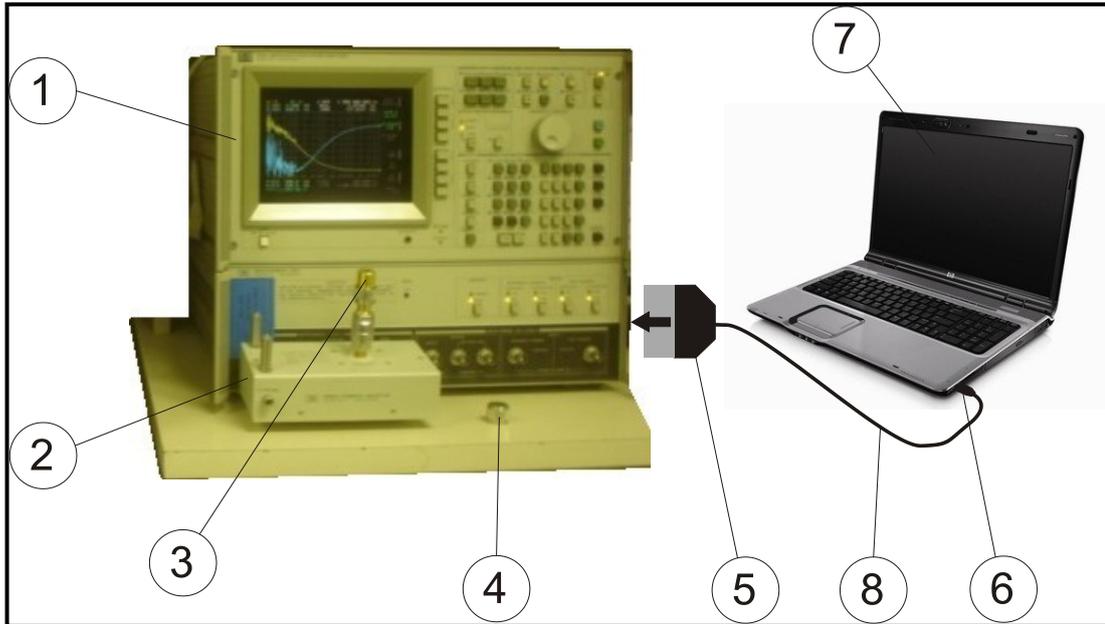


Figura 27 – Montagem da Ligação do Analisador de Impedância e Fase no PC.

- 1 – Analisador de Impedância e fase modelo HP 4194A;
- 2 – Acoplador
- 3 – Porta Amostra com Terminação Aberta;
- 4 – Terminação em curto-circuito;
- 5 – Conexão padrão GPIB;
- 6 – Conexão padrão USB;
- 7 – Notebook;
- 8 – Cabo para comunicação de dados;

Nos terminais do analisador de impedância e fase foi conectado um porta-amostra com terminação em aberto apropriada para acondicionar a amostra.

Um microcomputador compatível PC foi empregado para controlar o analisador via interface IEEE488. Uma rotina computacional que possibilita extrair os dados de impedância foi desenvolvida no ambiente Vee Pro 8.0. O algoritmo utilizado seguiu o equacionamento apresentado na seção 5.1.

O cabo utilizado para comunicação de dados possuía uma conexão GPIB na extremidade do medidor enquanto a extremidade conectada ao computador utilizava a entrada USB, conforme esquematizado.

O medidor de impedância e fase, o porta-amostra, com prazos de aferição dentro da validade, foram configurados em uma bancada de teste junto ao microcomputador, conforme ilustrado nas figuras 28(a) e (b), com todos os itens utilizados nesta configuração.

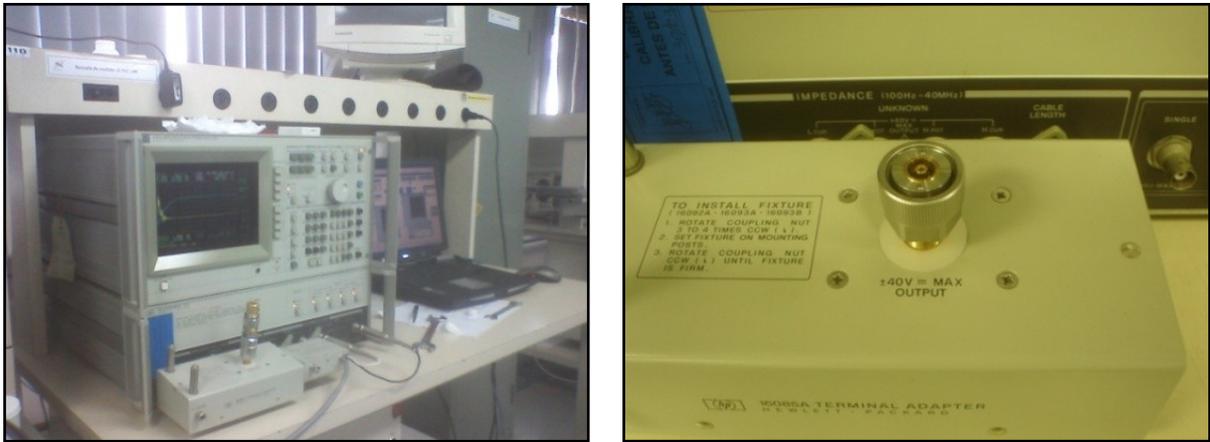


Figura 28 - (a) Configuração da bancada de teste; (b) Detalhe do Porta Amostras HP 1608A

Anteriormente à execução das medidas foi feita uma calibração do medidor inicialmente com uma terminação em curto, seguido de uma terminação em aberto, finalizando com uma carga padrão de 50Ω para a faixa de frequência dinâmica onde a linha de entrada do equipamento apresentou uma impedância $R=(50,0 \pm 0,1) \Omega$, considerada praticamente resistiva, pois a reatância X apresentou-se menor que $10 \text{ m} \Omega$.

4.1.5 Medidas de Permissividade Relativa

As medidas de permissividade relativa complexa do CFC, considerando o eixo de simetria da amostra o versor \vec{i} e suas partes real (ϵ') e imaginária ($j\epsilon''$), foram obtidas por meio de medidas de impedâncias (capacitância e fator de dissipação), na faixa de frequência de 100 Hz a 40 MHz. Para as condições sob as quais ocorreram os ensaios estabeleceu-se um ambiente com umidade e temperatura controlada.

O analisador de impedância mostrou em sua tela os gráficos que representam o comportamento do parâmetro analisado no domínio da frequência, conforme ilustrado na

figura 29, onde a medida de permissividade relativa real está representada pela curva azul e o a permissividade relativa imaginária pela curva amarela.



Figura 29 – Gráfico representando o comportamento da permissividade relativa-Real (curva azul) e Imaginária (curva amarela)

Após cada medida, os dados referentes à mesma foram salvos e agrupados em uma tabela EXCEL (ver APÊNDICE 2) para cada seis amostras de cada eixo.

Em seguida foram exportados para o software ORIGIN-PRO Versão 8.0®, possibilitando mostrar em um só gráfico as medidas das amostras de um mesmo eixo, como ilustrado nas figuras 30, 31, 32, 33, 34, 35, como segue:

A figura 30 representa a série de dados obtidos no eixo X para as medidas de permissividade relativa real, onde cada cor representa uma amostra, conforme indicada na legenda que acompanha o gráfico. A figura 31 representa a série de dados obtidos no eixo X para as medidas de permissividade relativa Imaginária.

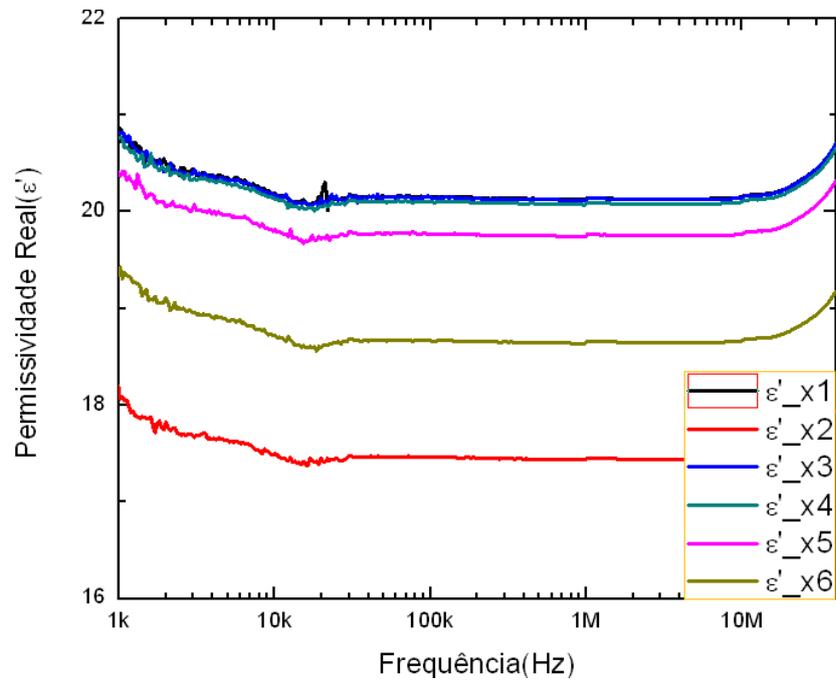


Figura 30 – Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo X. Componente Real.

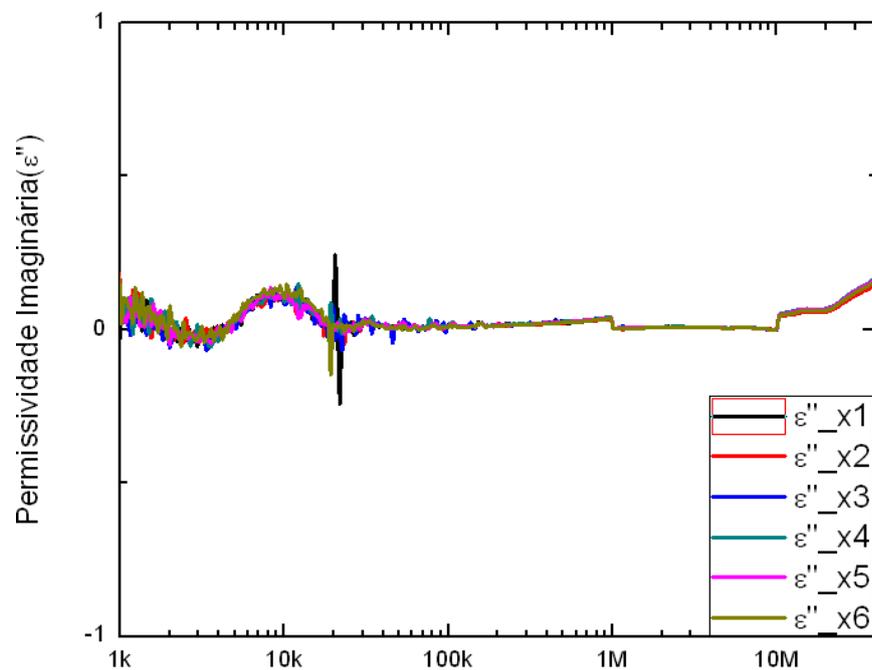


Figura 31 – Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo X. Componente Imaginária.

Analogamente, as figuras 32 e 33 representam a série de dados obtidos no eixo Y para as medidas de permissividade relativa real e imaginária, respectivamente.

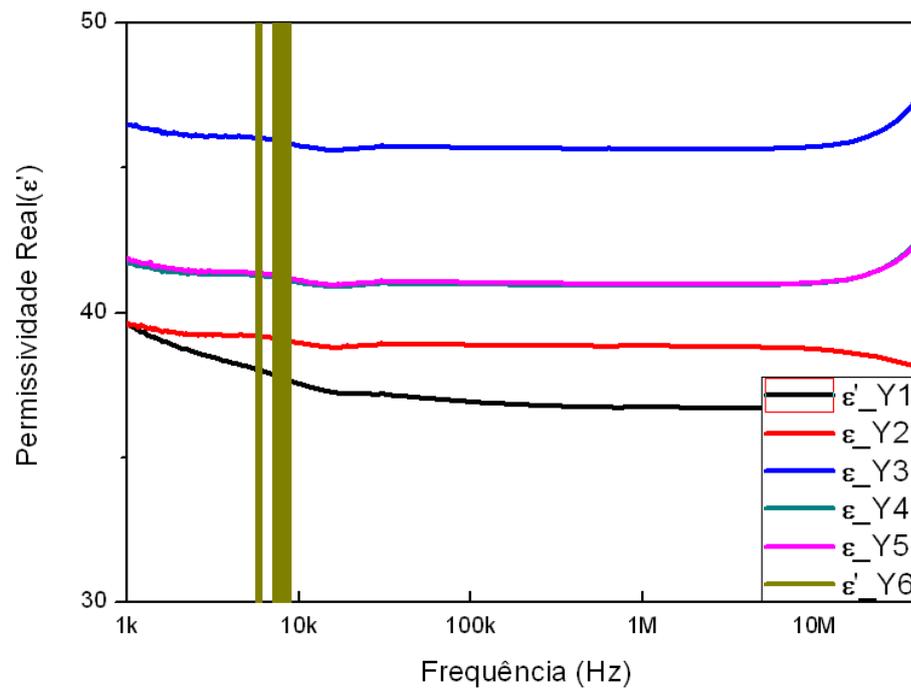


Figura 32 – Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo Y. Componente Real.

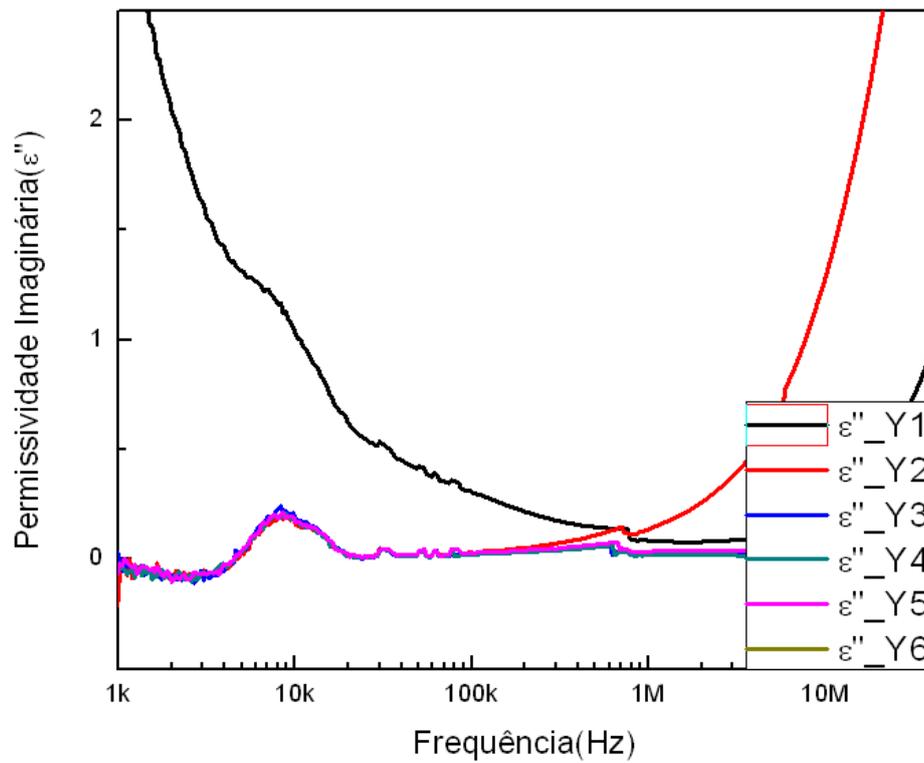


Figura 33 – Componente Imaginária

Idem para as figuras 34 e 35 quanto ao eixo Z.

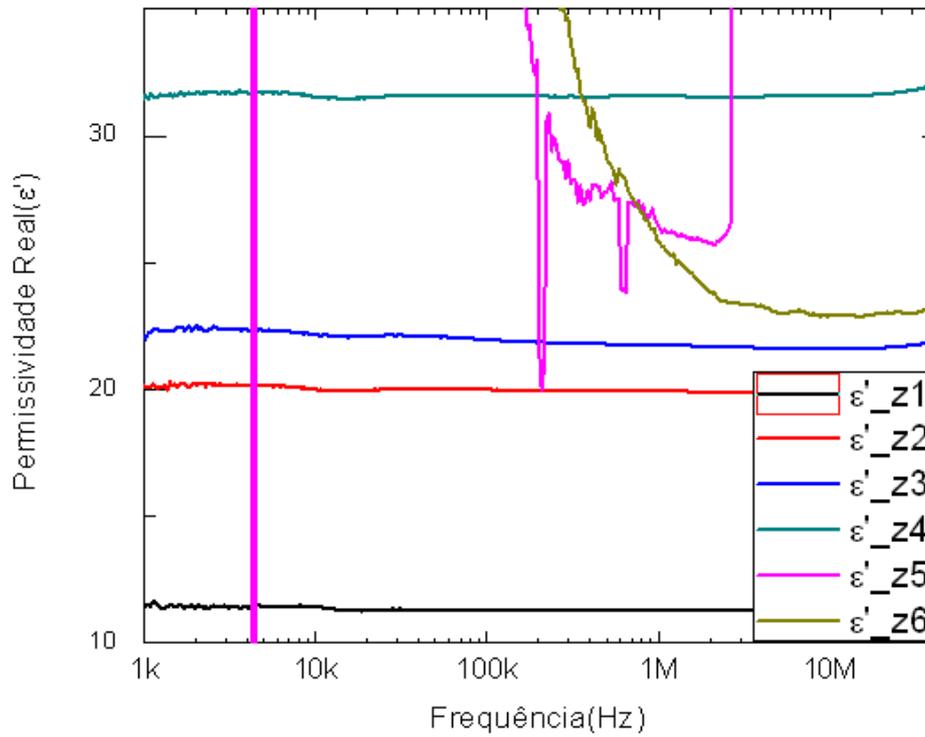


Figura 34 – Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo Z. Componente Real.

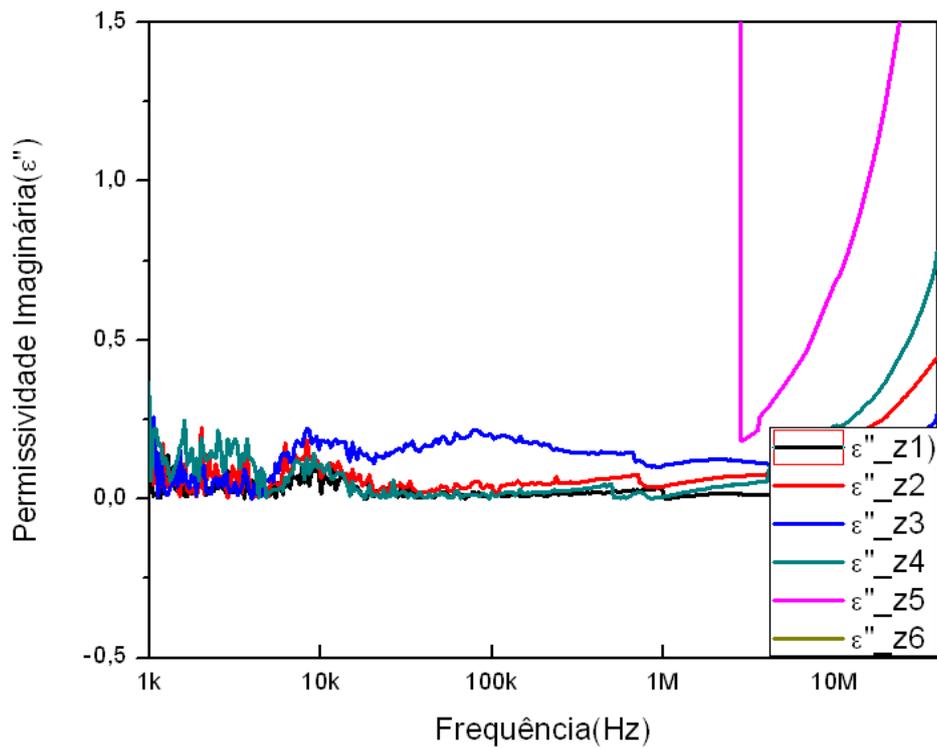


Figura 35 – Medidas da Permissividade Relativa Complexa no Eixo Z - Componente Imaginária

4.1.6 Análise dos Resultados.

Foram efetuadas diversas medidas de permissividade para os eixos X, Y e Z. Devido à problemas técnicos no equipamento de medida ou folga das amostras no conector, algumas séries de dados foram descartadas, sendo consideradas somente as curvas recorrentes. Desta forma, foram utilizadas seis séries de dados para o eixo X, cinco para o eixo Y, e quatro para o eixo Z. A partir da série de dados, foi obtida a média dos valores medidos para cada frequência. Sendo assim, por exemplo, para o eixo X, onde se considerou seis séries de dados, tomou-se o valor da permissividade real para uma frequência de 117,5 Hz. Como há seis séries de dados, existem seis valores de permissividade para esta frequência. Então, tomou-se simplesmente a média desses valores como o valor experimental da permissividade para esta frequência. A Tabela 2 mostra uma discrepância que justifica o procedimento adotado.

O valor adotado como válido encontra-se na tabela com o nome de PARTE REAL MÉDIA. Esse procedimento foi estendido para os outros valores de permissividade para diferentes permissividades gerando as diferentes linhas da tabela de dados.

Além do cálculo aqui descrito, a tabela também obtém a permissividade média imaginária e o desvio padrão das medidas.

Tabela 2 – Discrepância de Medidas entre Amostras

FREQÜÊNCIA	AMOSTRA 01		AMOSTRA 0		AMOSTRA 06	PARTE REAL MÉDIA	DESVIO PADRÃO	PARTE IMAG. MÉDIA	DESVIO PADRÃO	
	REAL	IMAGINÁRIA	REAL	IMAG						IMAGINÁRIA
100,00	21,92235535	-2,02196636	19,16474288	5,84	499	4,912069414	21,38	2,10	3,42	2,80
103,28	30,03792509	5,425065968	20,89513965	2,70	38	2,314755263	23,08	3,69	2,23	2,83
106,66	22,0673426	-1,04117304	24,46547958	-0,50	087	4,288474867	24,35	2,77	1,55	2,61
110,16	27,85294787	2,908440522	15,52047851	-0,29	761	2,197516987	23,34	5,24	2,25	1,33
113,77	20,73444518	2,627360847	21,44111727	1,80	493	3,193510939	23,19	1,75	0,53	2,93
117,50	24,10376646	3,054708312	22,43417724	0,39	273	1,496045135	23,76	1,42	1,98	1,11
121,35	25,84108839	2,355682525	21,78461795	2,14	289	2,929680479	23,91	2,48	2,42	0,90
125,33	21,65996907	0,63818361	21,11382985	3,33	039	2,634713017	22,22	1,70	1,39	1,50
129,43	24,61777291	1,067545323	18,19129612	1,876	31	2,153794674	23,04	2,76	1,24	1,43
133,67	24,48571796	1,944323994	21,91104794	2,185	228	1,913715157	23,88	1,41	2,07	0,68
138,06	25,53660996	1,392174937	19,41299603	3,376	341	1,116960166	22,34	2,30	0,81	1,65
142,58	20,58540939	-0,10764047	22,68143585	1,505	771	2,616186819	23,96	2,23	1,52	1,00
147,25	24,11713237	1,116996089	19,51084452	0,002	384	-0,03308312	22,92	2,31	0,32	0,82

A partir dos valores médios foi possível construir gráficos que mostrassem a variação da permissividade real (a) e imaginária (b) em função da frequência da onda incidente no material. Esse resultado é mostrado abaixo, nas Figuras 36, 37, 38, 39, 40 e 41 para os eixos X, Y e Z, respectivamente.

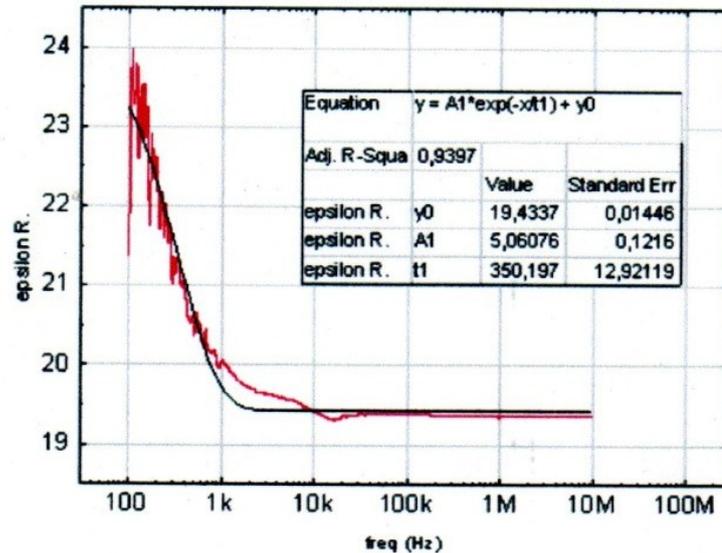


Figura 36 – Resultado final para o eixo X: Permissividade Real.

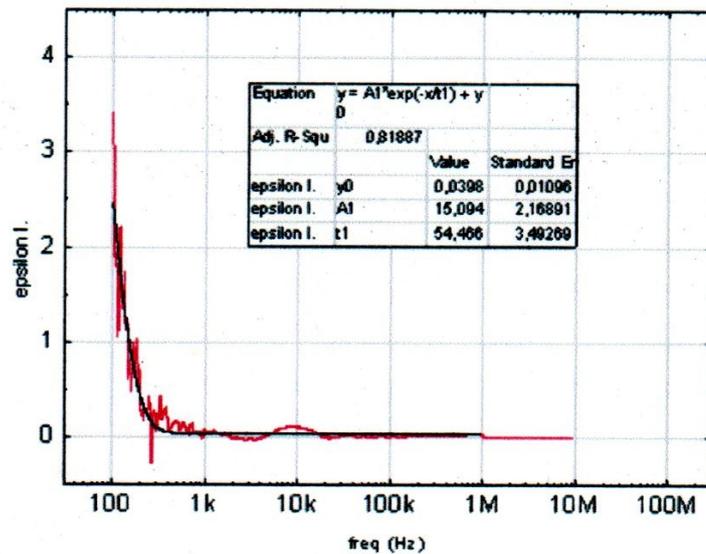


Figura 37 – Resultado final para o eixo X: Permissividade Imaginária.

Para cada um dos eixos foi suposta uma exponencial decrescente mais uma reta de inclinação nula como representativa do comportamento dos dados. O comportamento

exponencial foi tratado como ruído, pois sua existência deve a particularidades do funcionamento do equipamento de medida.

O valor tomado como resultado da medida foi a reta de inclinação nula. As curvas descritas acima, mostradas nos gráficos em cor preta em oposição aos dados medidos mostrados como uma curva vermelha foram obtidas por meio do método de mínimos quadrados a partir de processamento via software Origin®.

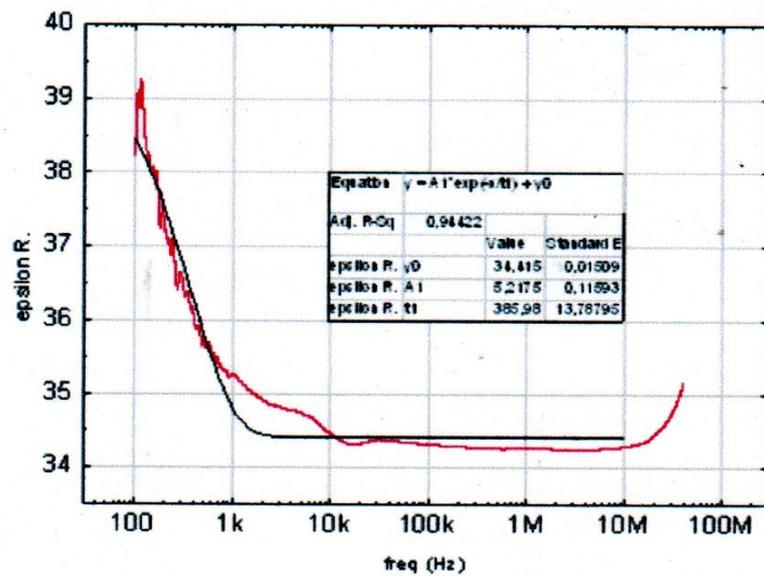


Figura 38 – Resultado final para o eixo Y: (a) Permissividade Real.

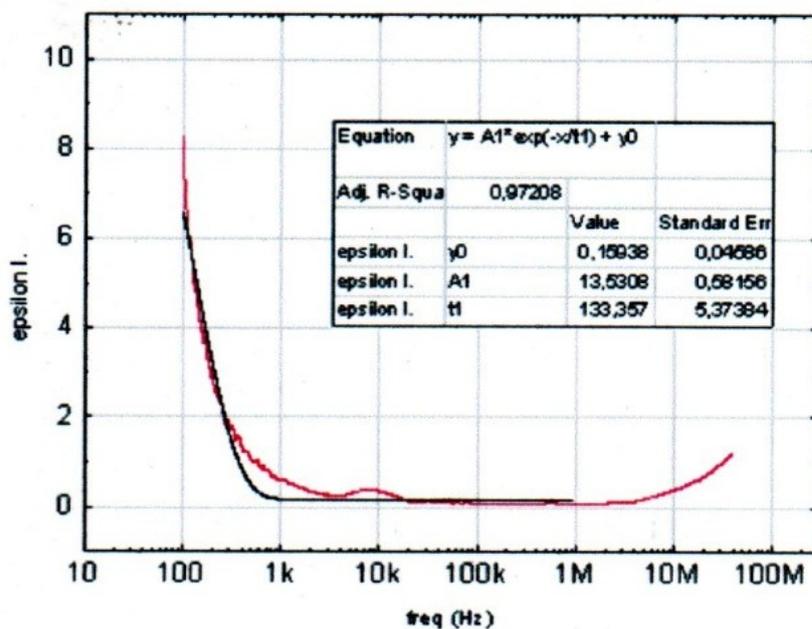


Figura 39 – Resultado final para o eixo Y: Permissividade Imaginária.

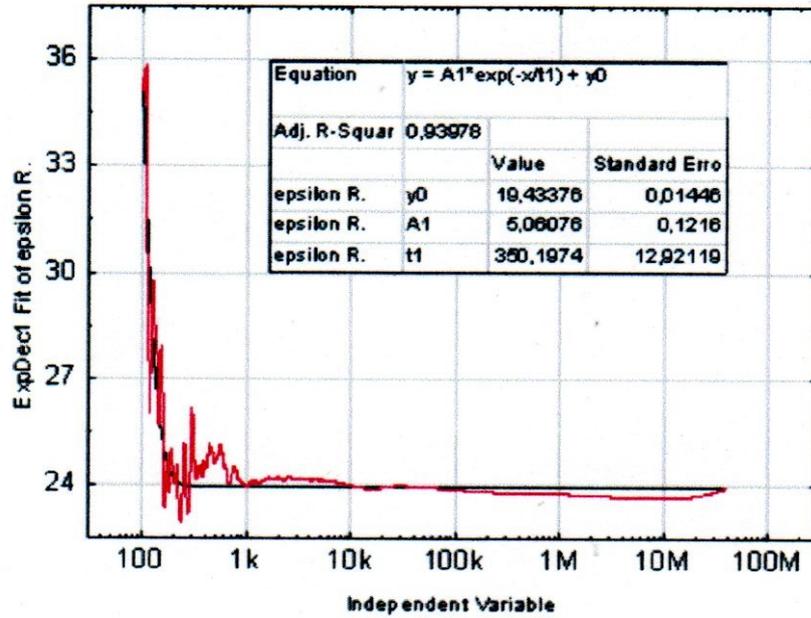


Figura 40 – Resultado final para o eixo Z: (a) Permissividade Real

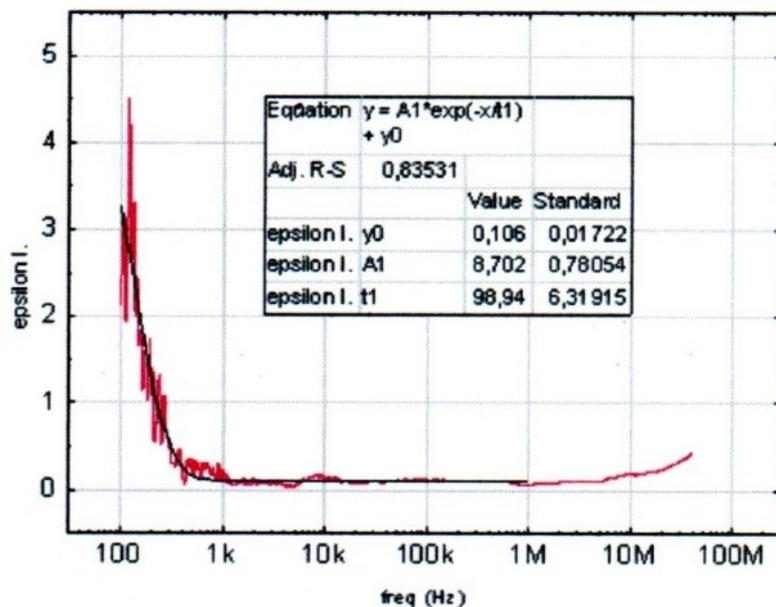


Figura 41 – Resultado final para o eixo Z: Permissividade Imaginária.

Como resultado final dessa redução de dados, obteve-se aproximadamente, o valor de permissividade real de 20, 40 e 20, para os eixos X, Y e Z, respectivamente. O valor da permissividade imaginária ficou, para os três eixos, por volta de 0,01. As variações destes valores observadas nos gráficos podem ser atribuídas a ruído no equipamento de medida.

O resultado obtido para o valor da permissividade real foi coerente com a orientação das fibras de carbono que compõem o material compósito. Isto é, como as fibras se orientam nas direções X e Z, a permissividade real nesses eixos foi idêntica. O valor de permissividade maior no eixo Y mostra que nesse eixo, a onda eletromagnética incide perpendicularmente ao plano da trama de fibras de carbono. O valor aproximadamente idêntico para a permissividade imaginária demonstra que as perdas no material se devem predominantemente ao epóxi que compõem o material compósito. O comportamento é bastante coerente, visto que o epóxi consiste de um material dielétrico enquanto que a fibra é um condutor, portanto as perdas devem ocorrer no primeiro. Os valores das constantes dielétricas (ϵ_r) das amostras mostraram terem sido influenciados pela direção das fibras em relação ao eixo em que cada uma foi usada, sendo determinada uma permissividade de aproximadamente 20 nas direções X e Z e 40 na direção Y. A figura 42 relaciona os dados da permissividade complexa nos três eixos e permite observar a maior anisotropia entre os planos YZ e YX estão mais afastados do eixo diagonal, apontando que a maior anisotropia é na direção Y.

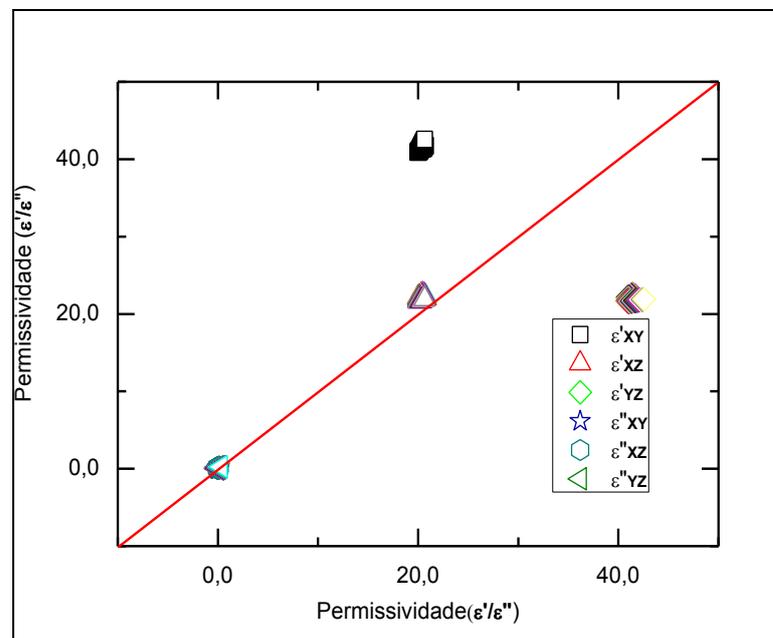


Figura 42 – Relação da permissividade entre eixos

4.2 Determinação da Condutividade Característica do Compósito de Fibra de Carbono.

Partindo da definição da Condutividade Elétrica vista no capítulo 2, pode-se determinar a Condutividade Característica (σ) do Compósito de Fibra de Carbono a partir de sua resistência elétrica em cada eixo (X, Y e Z), conforme descrito a seguir:

Sabendo-se que $\sigma = \frac{1}{\rho}$, ρ pode ser determinado pela equação 5.18, a seguir

$$\rho = \frac{R.S}{l} \quad (4.18)$$

Onde R é a resistência medida na direção considerada, S é a área do volume considerado na mesma direção, a exemplo de l que designa o seu comprimento.

Portanto σ pode ser expresso pela equação 5.19, como segue:

$$\sigma = \frac{1}{R.S} \quad (4.19)$$

Para um volume com cota de 15 mm na direção X, 35 mm na direção Y e 36 mm na direção Z, foram medidos os seguintes valores de resistência:

$$R_x = 9,3 \, \Omega$$

$$R_y = 281 \, \text{k} \, \Omega$$

$$R_z = 11,8 \, \Omega$$

Substituindo na equação 5.19, é possível determinar o valor da condutância característica em cada direção supracitada, conforme valores apresentados a seguir:

$$\sigma_x = 1,07 \, \text{S/m}$$

$$\sigma_y = 2,9 \cdot 10^{-6} \, \text{S/m}$$

$$\sigma_z = 11,8 \, \text{S/m}$$

Estes resultados foram requeridos para a execução da simulação e declarados no ambiente do software utilizado, como visto no capítulo seguinte.

5 . SIMULAÇÃO DE UMA PLACA DE COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO SUBMETIDA A UM PULSO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Este capítulo apresenta exemplo de simulação computacional, onde as equações de Maxwell são resolvidas numericamente utilizando o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), levando-se em conta a densidade superficial de energia eletromagnética que se propaga por unidade de tempo na direção e sentido da onda eletromagnética causados pelas componentes de uma descarga atmosférica, com valores estabelecidos por requisitos.

Para se estimar computacionalmente, os efeitos causados em uma placa de compósito de fibra de carbono com alto grau de complexidade, submetida a um pulso de corrente com forma de onda especificada pela SAE ARP 5412 (APÊNCICE C) e possibilitar a obtenção de resultados próximos da realidade, foi necessário um estudo em etapas como exposto a seguir:

5.1 . Introdução

A forma mais usual de utilização do método da diferenças finitas é no domínio tempo (FDTD). O método baseia-se na discretização das equações de Maxwell diretamente no tempo e espaço, dividindo o volume de interesse em células unitárias. Usualmente a malha gerada por tais células necessita ser uniforme, sendo assim a densidade da malha é determinada pelo menor detalhe de interesse do modelo. A idéia principal do algoritmo é aplicar o conceito de diferenças finitas na forma diferencial das equações de Maxwell [39].

O FDTD [40] é um método bastante apropriado para a análise da resposta de uma aeronave submetida a uma descarga atmosférica, possibilitando a avaliação de geometrias de malhas de terra irregulares, meios não lineares e com perdas. A malha de elementos do FDTD é composta por células retangulares onde cada aresta é associada a um campo elétrico. Foram

implementadas rotinas para construção de paralelepípedos discretizados em termos de células Yee cúbicas, cujas propriedades dielétricas são ajustáveis.

È possível especificar materiais diferentes para cada aresta da malha, conferindo ao método propriedade de anisotropia para a análise de conjunto ar / aeronave. O FDTD é um método iterativo, onde o campo elétrico e magnético é calculado a cada passo de tempo. Estes campos são posteriormente propagados através da malha de elementos, representando desta forma o fenômeno transitório [41].

A formulação de campo espalhado do FDTD foi inicialmente aplicada para uma aeronave F-111 para calcular cargas e correntes superficiais induzidas a partir de um campo gerado por um pulso eletromagnético (Electromagnetic pulse - EMP) simulado. Este procedimento reuniu todos os elementos representativos da modelagem FDTD, e por esta razão e por certo senso histórico o esforço na modelagem é discutido em detalhes [40].

O uso típico do FDTD para a simulação de problemas de aterramento impulsivo envolve a excitação do sistema modelado por um pulso de corrente sendo gravadas as totalidades dos campos ao longo das células da malha durante todo o período de transitório. Na seqüência, algoritmos da Transformada de Fourier permitem a extração do domínio da frequência e de parâmetros de dispersão.

O FDTD é um método explícito onde todo o domínio computacional é discretizado, não sendo necessário resolver um conjunto de equações lineares.

5.2 . Método das diferenças finitas no domínio do tempo

O Método do Domínio do Tempo por Diferenças Finitas (Finite Difference Time Domain Method) é um modo versátil de resolver problemas de eletromagnetismo pela integração das equações diferenciais de Maxwell,

$$\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (5.1)$$

$$\nabla \times E + \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

$$D(t) = \varepsilon \varepsilon_0 E(t) \quad (5.3)$$

O Método dos Elementos Finitos consiste em dividir o domínio de estudo em um número finito de pequenas regiões (elementos). Neste caso foram utilizados cubos como células básicas (Yee Cell), ilustrada pela figura 43, que permitem a determinação dos valores de campo nos pontos de interesse (vértices ou arestas destes elementos).

Cada um dos elementos gera uma matriz chamada Matriz de Contribuições, cuja forma depende da célula. Estas matrizes levam em conta a geometria do problema, os materiais envolvidos e as fontes de excitação.

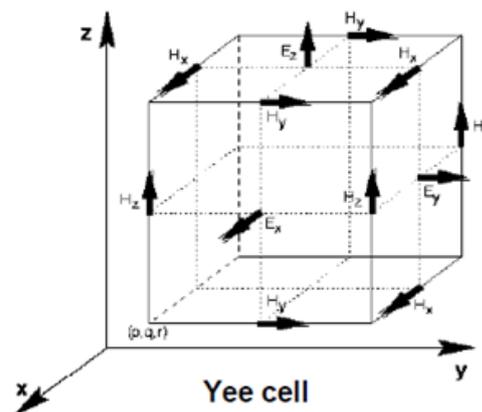


Figura 43 – Célula básica do Método FDTD

O método de FDTD calcula o campo elétrico e o campo magnético em cada célula integrando as equações de Maxwell de forma iterativa até que o de estado estacionário seja alcançado.

No caso de uma fonte de excitação senoidal, o regime estacionário é alcançado quando todos os campos dispersos variarem senoidalmente no tempo. Entretanto, as relações constitutivas para um meio material com características de anisotropia são escritas como:

$$D = [\varepsilon]E; \quad (5.4)$$

$$B = [\mu]H, \quad (5.5)$$

sendo que $[\varepsilon]$ e $[\mu]$ são, respectivamente, os tensores permissividade elétrica e permeabilidade magnética do meio anisotrópico.

Com esta notação as equações de Maxwell, assumindo os campos com dependência harmônica no tempo na forma $e^{j\omega t}$, tornam-se:

$$\nabla \times E = -j\omega[\mu]H; \quad (5.6)$$

$$\nabla \times H = j\omega[\varepsilon]E. \quad (5.7)$$

Considerando-se um meio anisotrópico uniaxial podemos escrever:

$$[\varepsilon] = \varepsilon (\text{diag} \{a, b, c\}) = \varepsilon[\Lambda]; \quad (5.8)$$

$$[\mu] = \mu (\text{diag} \{a, b, c\}) = \mu[\Lambda], \quad (5.9)$$

sendo que a, b e c são os elementos pertencentes a diagonal da matriz $[\Lambda]$, ou seja:

$$[\Lambda] = (\text{diag}\{a, b, c\}) \quad (5.10)$$

que em geral são também complexos, adimensionais e constantes. Para este caso as equações de Maxwell (6.6) e (6.7), expressas em termos do vetor propagação β^{an} em que o índice an indica a região anisotrópica na qual a onda é transmitida), ficarão escritas como:

$$\beta^{an} \times E = \omega\mu[\Lambda]H \quad (5.11)$$

$$\beta^{an} \times H = \omega\varepsilon[\Lambda]E \quad (5.12)$$

sendo ε e μ ., respectivamente, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética absoluta do meio analisado.

5.3. Algoritmo FDTD para as equações eletromagnéticas

A formulação apresentada anteriormente é válida para uma região elétrica qualquer. Este mesmo problema pode ser aplicado na geometria do método FDTD da figura 44. Além disso, a energia transmitida através dos contornos deve ser dissipada em níveis que não permitam reflexões capazes de interferir na região central tomada para análises efetivas. Assim, é necessário generalizar estes conceitos a uma forma adequada às necessidades deste problema [33].

Os parâmetros constitutivos serão nesta Sessão determinados em função da escolha adequada dos valores de a , b e c , pertencentes a matriz $[\Lambda]$ e representada em (5.10).

Tomando-se inicialmente o tensor $[\Lambda]$, neste trabalho o valor escolhido para a é dado por $a=1+\sigma/j\omega\varepsilon$.

Com isso, as perdas no meio, para a direção z , são incluídas através deste tensor, fazendo-se:

$$[\Lambda_Z] = \begin{vmatrix} 1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon} \end{vmatrix} \quad (5.13)$$

Para esta equação tem-se:

$$\beta_z^{an} = (1 - j\varepsilon/\omega\varepsilon)\beta_z^i \quad (5.14)$$

sendo que a parte real é idêntica ao caso isotrópico e o fator de atenuação complexo é mantido devido ao perfeito casamento de impedâncias entre os meios.

Portanto, esta formulação garante uma onda plana incidente na fronteira entre dois meios, com

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (5.15)$$

$$\mu_1 = \mu_2 \quad (5.16)$$

$$\sigma\varepsilon/\varepsilon = \sigma m/\mu, \quad (5.17)$$

seja totalmente transmitida independentemente do ângulo de incidência, polarização e frequência da onda incidente e pode ser verificado em uma região plana.

Para estender esta idéia à geometria FDTD, para um espaço tridimensional, com perdas nas direções x , y e z , um grupo similar de parâmetros constitutivos deve ser definido.

Matematicamente, isso pode ser feito como segue:

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{1 + \frac{\sigma_x}{j\omega\varepsilon}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{\sigma_x}{j\omega\varepsilon} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \frac{\sigma_x}{j\omega\varepsilon} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 + \frac{\sigma_y}{j\omega\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + \frac{\sigma_y}{j\omega\varepsilon}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \frac{\sigma_y}{j\omega\varepsilon} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 + \frac{\sigma_z}{j\omega\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{\sigma_z}{j\omega\varepsilon} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 + \frac{\sigma_z}{j\omega\varepsilon}} \end{vmatrix} \quad (5.18)$$

O produto destes três tensores é a forma mais geral de um tensor uniaxial e sua aplicação é válida tanto para regiões planas que representam as paredes do cubo FDTD quanto para seus cantos, restando apenas levá-lo às equações de Maxwell.

5.4 Procedimentos para aplicação do método FDTD

Após a caracterização da permissividade elétrica das amostras de fibra de carbono, obtida por meio de ensaios práticos em laboratório, aplicou-se a técnica FDTD para simulação do caso real descrito anteriormente usando o software comercial XFDTD, que se constitui no estado da arte e oferece algumas vantagens tais como modelamento, simulação e ferramenta de análise. Neste caso, é permitido visualizar o fluxo de energia associado a onda eletromagnética e as atenuações que a mesma sofre ao atravessar uma região plana de uma placa de compósito. Primeiramente, é feita uma breve descrição do modelo geométrico que representa a estrutura de um painel de compósito. A seguir, os resultados obtidos para os eixos X, Y e Z são comparados quanto ao fluxo de energia contida em cada eixo.

5.5 Definição do modelo geométrico adotado

Antes de realizar a simulação, foi necessário, primeiramente, delimitar o espaço computacional, a partir do modelo do problema. Após a análise, verificou-se que o problema apresenta simetria magnética e, portanto, não é necessário simular toda a estrutura de uma aeronave, mas apenas uma parte, desde que a mesma fosse maior que o comprimento de onda (λ) do sinal considerado e que englobasse três volumes: ar, parte plana da placa e ar. Usualmente este material é fixo a uma estrutura metálica de aeronave, que possui condutividade característica da ordem de 1000 vezes maior que o material estudado.

O volume definido para representar o material analisado tem dimensões de 10 m x 10 m x 10 m e pode ser visualizado através de uma malha composta pelos elementos que contém as propriedades do material, conforme ilustrado pela figura 44.

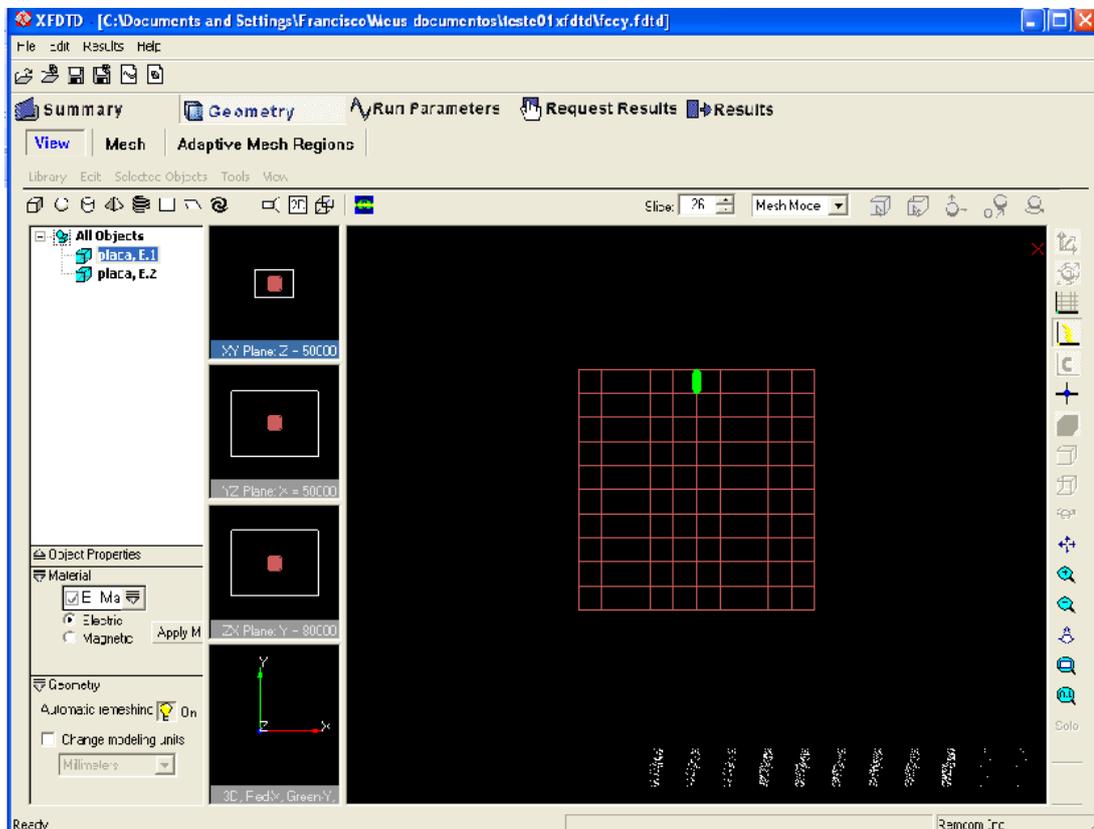


Figura 44 – Volume representativo do material visualizado através de malha.

5.6 Ambientes para simulação

Para a simulação física da placa com características do compósito estudado foi disponibilizada uma página de parâmetros, dentro do qual foi possível declarar a forma de onda desejada para ser aplicada, conforme ilustra a figura 45.

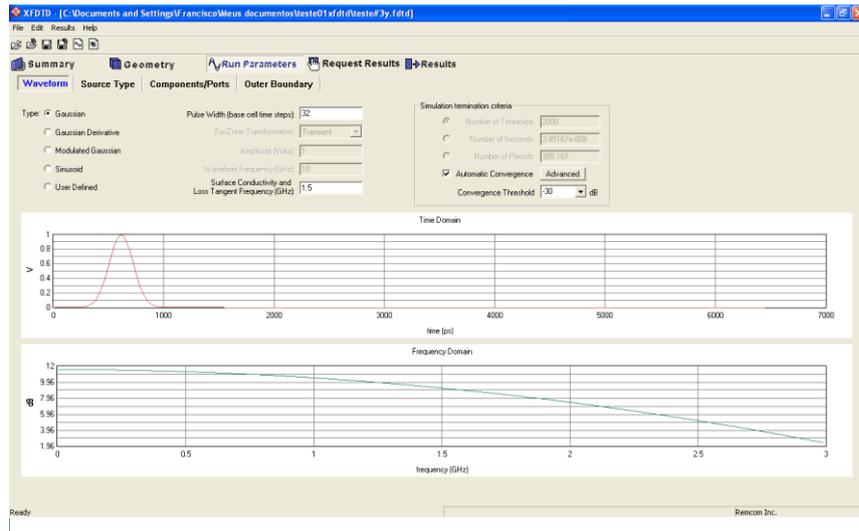


Figura 45 – Página de parâmetros do XFDTD

5.7 Resultados obtidos

A figura 46 ilustra um exemplo de simulação computacional utilizando o Método do Domínio do Tempo por Diferenças Finitas para representar a intensidade instantânea da energia eletromagnética a que fica submetida uma estrutura de CFC com geometria arbitrária no espaço tridimensional.

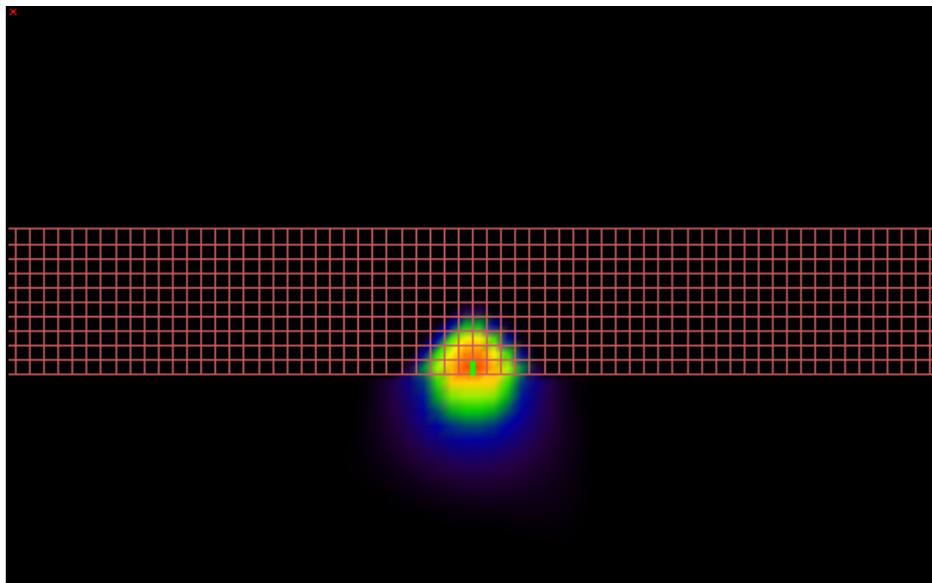


Figura 46 – Representação da Intensidade de energia eletromagnética instantânea através do Método FDTD

A influência da anisotropia pode ser ilustrada pela componente z do Vetor de Poynting (S_z), considerando a maior anisotropia nos eixos X(a), Y(b) e Z(b) ilustrada na figura 47.

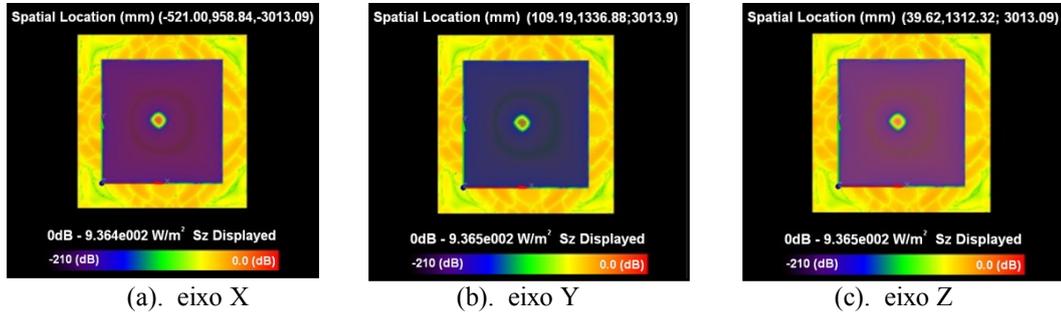


Fig. 47. Componentes z do Vetor de Poynting (S_z), considerando a maior anisotropia nos eixos.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Esse trabalho contribui com o estudo do comportamento elétrico do Compósito de Fibra de Carbono submetido a um campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica dado que a caracterização da anisotropia na permissividade complexa do CFC permite uma aproximação da configuração mais adequada, minimizando o número de amostras necessárias para ensaios de certificação. Para reproduzir uma descarga atmosférica em laboratório em atendimento aos requisitos aeronáuticos são necessários recursos de custo elevado e os resultados obtidos podem ser binários[2], [8].

Através da caracterização da permissividade realizada neste trabalho pode-se deduzir outros parâmetros tais como campo eletromagnético e potencial elétrico a que fica submetido esse compósito para uma avaliação do risco e monitoramento em tempo real da tolerância ao dano da estrutura de uma aeronave. Pelos resultados obtidos pode concluir que esse material apresenta baixas perdas, com a parte imaginária tendendo assintoticamente a zero.

Apresenta-se aqui um exemplo de simulação baseado no método das diferenças finitas que permite a visualização da energia através de uma placa, de onde podem ser observados os níveis elevados de energia no instante em que ocorre a descarga, e nos instantes subsequentes, onde a mesma difunde-se pela placa.

Verifica-se portanto que os resultados obtidos numericamente concordam com a solução analítica no limite em que a permissividade complexa tem apenas sua parte real.

As simulações foram executadas num computador pessoal baseado em processador de 2 GHz e memória RAM de 3 Gbytes. Nesta configuração os tempos de simulação ficaram em torno de 30 minutos para a menor malha.

7. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

No trabalho aqui apresentado, utilizou-se a formulação das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo [31] para solução das equações de Maxwell em sua forma rotacional considerando o meio como sendo anisotrópico e sem perdas.

Tal técnica tem como principal vantagem a obtenção de uma solução do tipo onda completa para os campos calculados durante todo o processo de simulação, calculando-se assim de forma automática reflexões, refrações e difrações nas estruturas envolvidas no processo de propagação, tornando assim os resultados obtidos bastante realistas.

Deve-se agora investigar as várias soluções possíveis para os diferentes tipos de argumentos complexos em ambientes que variam com a pressão temperatura e umidade, bem como pesquisar possíveis funções complexas que descrevam precisamente a permissividade de determinados materiais associados a este compósito, tais como malhas metálicas para dispersão de corrente de alta magnitude. Uma vez embasadas as teorias que justifiquem essas soluções, devem ser realizados outros experimentos como sugerido a seguir:

- o monitoramento em tempo real da integridade física de estruturas de aeronaves;
- os efeitos indiretos causados por irradiação de alta intensidade (HIRF – High Intensity Radiated Fields) e/ou análise de risco quanto à ocorrência deste fenômeno.
- métodos numéricos diferentes para simulação de casos semelhantes, com a construção de estruturas representativas no modelo analisado.

8. REFERÊNCIAS

- [1] HOLLOWAY, C.L.; Senior Member, IEEE, SARTO, M. S., Senior Member, IEEE, and MARTIN JOHANSSON, Member, IEEE. **Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models**. Received October 29, 2003; revised May 17, 2005.
- [2] HEIDLEBAUGH, D. L. **Statistical Method in Estimation Sparking Threshold for Fastened Composite Joints, Electromagnetic Effects Technology**. Boeing Phantom Works, 2003
- [3] EVANS, R. W. **Design guidelines for shielding effectiveness**. NASA contractor Report 4784, prepared for Marshall Space Flight Center. ag. 1997
- [4] CASEY, K. F. **Advanced composite materials and electromagnetic shielding**. In: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY SYMPOSIUM, IEEE. New York, 1978.
- [5] D'AMORE, M. and SARTO, M. S. **Theoretical and experimental characterization of the EMP-interaction with composite-metallic enclosures**. IEEE, Trans. Electromag. Compat., vol. 42, pp. 152–163, May 2000.
- [6] HIPPEL, A. R. V. **Dielectric Materials and Applications**. New York, USA: Massachusetts Institute of Technology, John Wiley, 1954.
- [7] LIBRANTZ, H.; LIBRANTZ, A. F. L. **Descargas elétricas atmosféricas e suas interações com aeronaves**. São Paulo: Exacta, v. 4, n. 2, p. 247-258, jul./dez. 2006.
- [8] AEROSPACE RECOMMENDED GROUP. **ARP 5412 - Rev. A**, SAE Aerospace, publicada em Nov 1999 e revisada em Fev. 2005
- [9] CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: an introduction**. Department of Metallurgical Engineering, 1940, 7th ed.
- [10] EDMINISTER, J.A. **Eletromagnetismo**. São Paulo: Mac-Graw-Hill do Brasil, 1980
- [11] KONG, J.A. **Theory of electromagnetic Waves**. John Wiley & Sons, United States of America, 1975.
- [12] DINIZ, A.B.; FREIRE, G.F.O. **Ondas Eletromagnéticas**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1973
- [13] REINHART T. J. **Engineered Materials Handbook - Composites, Vol 1; 2th ed**, May 1988, prepared under direction of the ASM International Handbook Committee;
- [14] PILATO, L. A. and MICHINO, M. J. **Advanced Composite Materials**. 1th ed. Berlin, Spring-Verlag, 1994.
- [15] FLOWER, H.M. **High Performance Materials in Aerospace**. Chapman&Hall, vol 29, 3th ed, set 1999.

- [16] DIXON, D. S. and MASI, J. **Thin coatings can provide significant shielding against low frequency EMF/magnetic fields.** In: Proc. 1998 IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility, Denver, CO, Aug. 24–28, 1998, pp. 1035–1040.
- [17] GAIER, J. R. et al. **Effect of intercalation in graphite epoxy composites on the shielding of high energy radiation.** J. Mater. Res., vol. 13, no. 8, pp. 2297–301, Aug. 1998
- [18] CANEVA, C.; NANNI, F. and SARTO, M. S. **Electromagnetic and mechanical properties of a new composite material.** In: Proc. Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, EMC'98 ROMA, Rome, Italy, Sep. 14–18, 1998.
- [19] FISHER, F.A. et al. **Aircraft Lightning Protection Handbook.** DOT/FAA/CT-89/22, Pittsfield, MA, USA, September 1989.
- [20] KUESTER, E. F. and HOLLOWAY, C. L. **A low-frequency model for wedge and pyramidal absorbers-I: Theory.** IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 36, no. 4, pp. 300–306, Nov. 1994.
- [21] JOHANSSON, M.; HOLLOWAY, C. L. and KUESTER, E. F. **Effective electromagnetic properties of honeycomb composite, and hollow pyramidal and alternating wedge absorbers.** IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 53, no. 2, pp. 728–736, Feb. 2005.
- [22] HOLLOWAY, C. L. et al. **Comparison of electromagnetic absorber used in, anechoic and semianechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices.** IEEE Trans. Electromagn. Compat. vol. 39, no. 1, pp. 33–47, Feb. 1997.
- [23] KUESTER, E. F. and HOLLOWAY, C. L. **A low-frequency model for wedge and pyramidal absorbers-I: Theory.** IEEE Trans. Electromagn. Compat. vol. 36, no. 4, pp. 300–306, Nov. 1994.
- [24] NEELAKANTA, P. S. **Handbook of Electromagnetic Materials: Monolithic and Composite Versions and Their Applications.** CRC Press, Boca Raton, FL, 1995.
- [25] SIHVOLA, A. H. **Electromagnetic Mixing Formulas and Application.** London, U.K.: IEE, 1999.
- [26] KUESTER, E. F. and HOLLOWAY, C. L. **Comparison of approximations for effective parameters of artificial dielectrics.** IEEE Trans. Microw. Theory Tech. vol. 38, no. 11, pp. 1752–1755, Nov. 1990.
- [27] CASEY, K. F. **EMP Penetration Through Advanced Composite Skin Panels.** Interaction Notes 315, Dec. 1976.
- [28] **Advanced composite materials and electromagnetic shielding.** In: Proc. 1978 IEEE Int. Symp. EMC, Atlanta, GA, Jun. 20–22, 1978, pp. 228–232.

- [29] KUESTER, E. F. and HOLLOWAY, C. L. **A low-frequency model for wedge and pyramidal absorbers-I: Theory.** IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 36, no. 4, pp. 300–306, Nov. 1994.
- [30] HOLLOWAY, C. L. and KUESTER, E. F. **A low-frequency model for wedge and pyramidal absorbers - II: Computer and measured results.** IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 36, no. 4, pp. 307–313, Nov. 1994.
- [31] BREKHOVSKIKH, L. M. **Wave in Layered Media.** New York: Academic, 1960, pp. 79–86, 215–233.
- [32] PARISE, M. and SARTO, M. S. **Efficient formulation of high-order boundary conditions for the high-frequency modeling of multilayer composite slabs.** in Proc. 2003 IEEE Symp. Electromagnetic Compatibility, Boston, MA, Aug. 11–22, 2003, pp. 753–758.
- [33] LARSEN, T. **A survey of the theory of wire grids.** IRE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 10, no. 3, pp. 191–201, May 1962.
- [34] WAINSHTIEN, L. A. **On the electrodynamic theory of grids.** In: High-Power Electronics. Oxford: Pergamon Press, 1966, pp. 14–48.
- [35] JOHANSSON, M.; HOLLOWAY C. L. and KUESTER, E. F. **Effective electromagnetic properties of honeycomb composite, and hollow pyramidal and alternating wedge absorbers,** IEEE Trans. Antennas Propagations, vol. 53, no. 2, pp. 728–736, Feb. 2005.
- [36] NEVARD, J., KELLER, J. **Reciprocal relations for effective conductivities of anisotropic media,** J. Math. Phys., vol. 26, no. 11, pp. 2761–2765, 1985.
- [37] CORTEZ, A. et al , **Practical Aspects of the Characterization of Ferrite Absorber Using One-port Device at RF Frequencies.** Proceedings of The Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2007), v. 1, p. 683-687, 2007. Beijing, China, pp 6883-6, march, 2007.
- [38] CARVALHO, F.E et al , **Caracterização da Anisotropia na Permissividade Complexa em Compósito de Fibra de Carbono,** SIGE - Simpósio Internacional de Guerra Eletrônica, Set. 2009, www.sige.ita.br.
- [39] KUNZ, K.S.; LUEBBERS, R.J. **Finite Difference Time Domain Method for Eletromagnetics,** United States, FL, CRC Press, 1993, 448 p.
- [40] GAZZANA, D. S. et al. **Metodologias Aplicadas para a Modelagem e Análise de Sistemas de Aterramento Impulsivo – Revisão do Estado da Arte,** 11th Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering, Nov. 2009.
- [41] ALMEIDA, J. F. et al. **Algoritmo FDTD para Implementação da Técnica de Condições de Fronteiras Absorventes UPML,** www.lane.ufpa.br/publicacoes/sbc_2004.pdf último acesso em 07/08/2009.

APÊNDICE A - MATERIAIS COMPOSTOS

MATERIAIS COMPOSTOS

Definição

Um material composto é um material estrutural que consiste na combinação de dois ou mais constituintes de natureza diferentes, resultando em um material de desempenho superior àquele de seus componentes tomados separadamente[27]. Um dos constituintes é denominado de fase de reforço (no caso constituído por fibras) e o outro é responsável pela impregnação do reforço, conhecido como matriz, sendo um material geralmente contínuo (resina).

As fibras conferem ao material composto suas características mecânicas, como resistência à ruptura, rigidez, etc, pois a resina não tem função estrutural, sendo apenas um elemento de ligação. As fibras atualmente mais utilizadas no setor aeronáutico são: fibra de vidro (fiberglass), fibra de carbono e fibra de aramida (Kevlar).

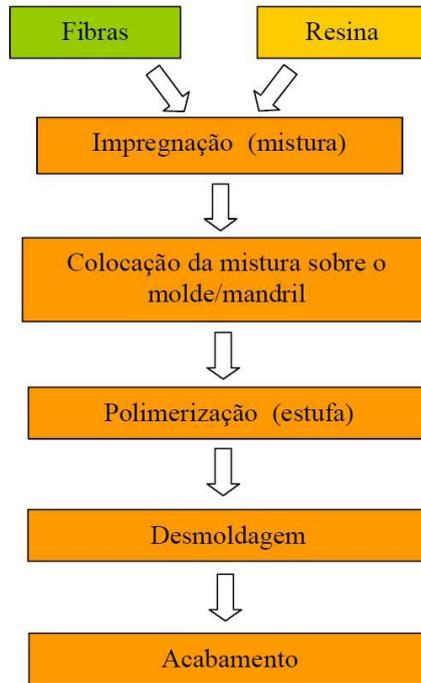
Já as matrizes (resinas) possuem funções de transmitir esforços (solicitações mecânicas) entre as fibras e de protegê-las do ambiente externo. As resinas mais utilizadas no setor aeronáutico são: resina epoxy, resina fenólica e resina polimida.



Figura 1 – Composição dos Materiais Compostos

Fabricação

As operações básicas para obtenção da peça final têm a seguinte seqüência:



Seguem as etapas do processo de fabricação de peças em material composto:

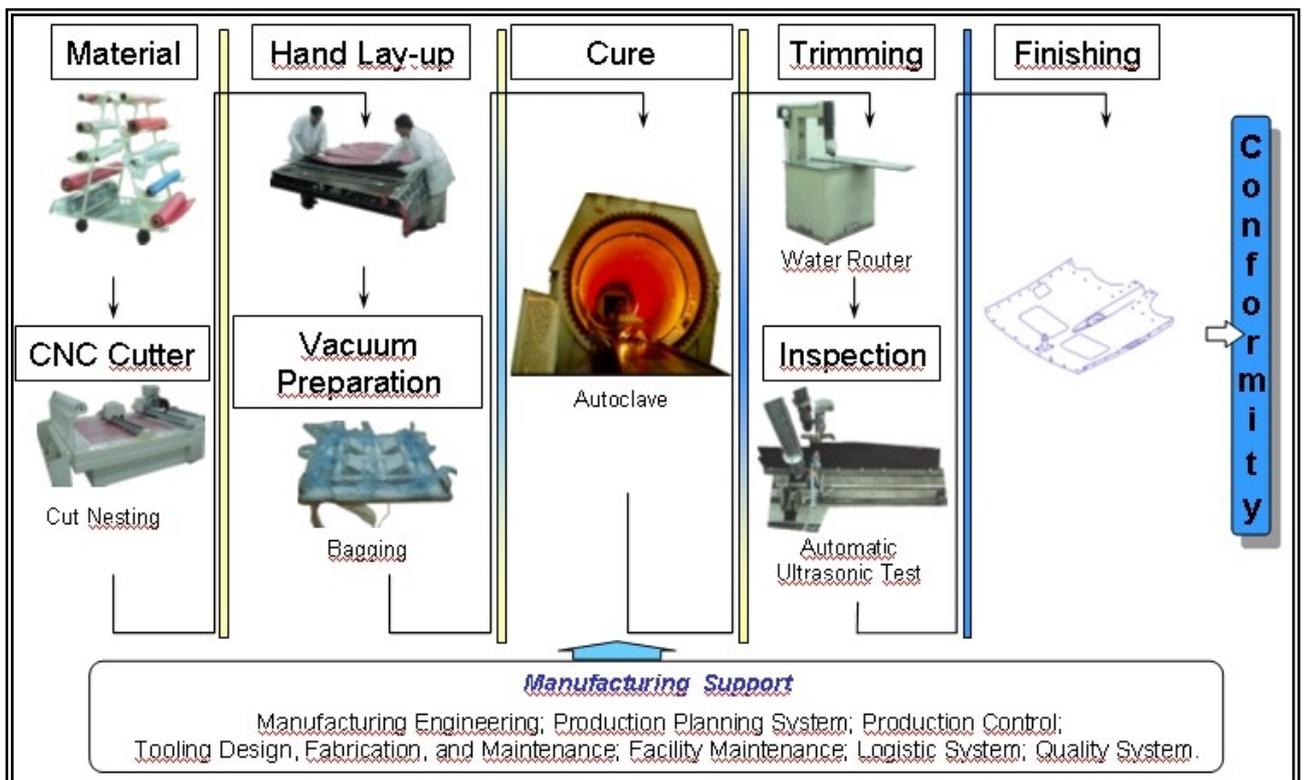


Figura 2 – Processo de Fabricação

A seqüência obtida neste processo de fabricação é:

- Inicialmente, os materiais compostos são corretamente estocados, em local climatizado e propício.
- Após a liberação do desenho da peça pelo Projeto, inicia-se a processo de fabricação, com o corte dos materiais através de uma máquina programada via CNC que estará encarregada além de fazer a tarefa do corte, em otimizar o consumo dos materiais.
- A seguir, é feita a distribuição sobre o gabarito (laminação), contendo as camadas da matriz, do reforço e demais componentes que irão formar o material composto, orientadas de forma a resultar em uma peça com excelentes características de resistência mecânica. De acordo com as inovações deste processo, é possível obter materiais pré-impregnados, como a Fibra de Carbono já com a resina epoxy, ou então a tela de metalização também impregnada com o filme adesivo.
- Ocorre então a Preparação à Vácuo, onde uma “bolsa” evitará descontinuidades, garantindo a confecção correta do material composto na próxima etapa.
- Com o material disposto sobre o molde (gabarito) e com a “bolsa de vácuo” instalada, o conjunto é levado para cura em “Autoclave”, uma estufa que o submeterá à polimerização, ocorrendo processos térmicos que se encarregarão de solidificar a montagem, constituindo o material composto.
- Quando sai da Autoclave, a moldagem da peça é desfeita para que possa ser feito o acabamento, retirando sobras e pequenos defeitos gerados na fabricação.
- Com o processo produtivo encerrado a peça é inspecionada, conferindo as medidas estabelecidas no desenho do Projeto, recebendo a “conformidade” e disponibilizada para montagem na aeronave.

O Material Composto possui vantagens e desvantagens, como segue:

Vantagens:

- Combinação de alta rigidez e resistência específica com baixa densidade;
- Aumento da vida em serviço;
- Ausência de corrosão;
- Maior resistência à fadiga;
- Obtenção de geometrias complexas com menor custo.

Desvantagens:

- Maior custo de matéria prima;
- Usinabilidade limitada;
- Absorção de umidade acentuada;
- Inspeções rigorosas;
- Ensaio necessários;
- Armazenamento de matéria-prima (produto perecível);
- Processo de manufatura com diversas variáveis.

As boas características os tornam atrativos como alternativas para ligas de alumínio em aplicações aeronáuticas.

Exemplo: Alteração de peça de Liga de Alumínio para Estrutura Integrada de Fibra de Carbono.

Dimensão aproximada da peça: 1,6 x 0,8 m

Ganhos:

- Redução de peso: 16 para 12 kg
- Fabricação: de 100 para 33 componentes.



Figura 3 - Exemplo de utilização de Materiais Compostos

Laminados

Os laminados ou estruturas laminadas são constituídos de sucessivas camadas de fibras impregnadas em resina segundo uma orientação conforme a figura 21.

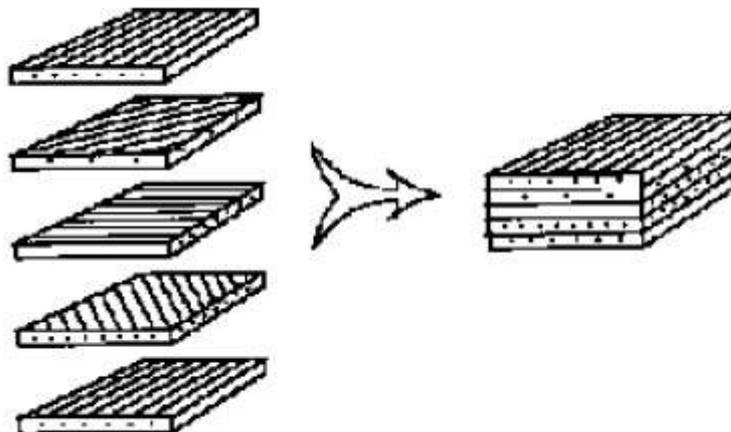


Figura 4 – Constituição de um Laminado

A designação dos laminados é efetuada segundo a disposição das camadas e a orientação da camada com relação ao eixo de referência, conforme mostrado na figura 22.

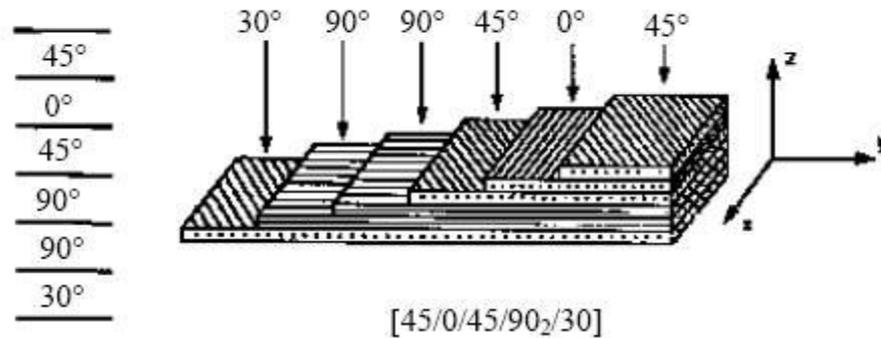


Figura 5 – Designação de um Laminado

Apesar destas excelentes características, os materiais compostos possuem uma grande desvantagem: não são bons condutores de eletricidade, provocando, assim, a descontinuidade elétrica na fuselagem.

Tendo como base que esta alta sensibilidade dos materiais compostos à exposição dos raios existe em virtude de apresentarem pouca ou nenhuma condutância, estas estruturas devem então sempre receber proteção a fim de garantir a continuidade da corrente elétrica gerada pelo raio, pois quanto melhor a corrente elétrica fluir, menores serão os danos causados.

No que se refere aos efeitos diretos do raio, a preocupação está no material que compõe a estrutura. Como os materiais compostos estão sendo cada vez mais utilizados na estrutura das fuselagens dos aviões, cresce a busca pela proteção dos mesmos contra os raios.

No projeto de uma aeronave, o que determina se uma estrutura precisa ou não ser protegida, é a função que a mesma está exercendo no conjunto que constitui a fuselagem; e também, as conseqüências frente aos danos que poderão ser causados. Se a perda de parte da estrutura não comprometer a segurança de vôo, a proteção pode não ser requerida e a substituição da peça após o dano já estará prevista pelo fabricante, tendo em vista que a troca se dará rapidamente, visando o menor impacto para o operador da aeronave.

Classificação dos Materiais Compostos

Os materiais compostos podem ser classificados de acordo com as fibras utilizadas, em:

- Materiais compostos condutivos (Fibra de Carbono, ou CFC).



Figura 6 – Tecido de Fibra de Carbono

- Materiais compostos não condutivos. (Fibras de Vidro ou de Aramida).

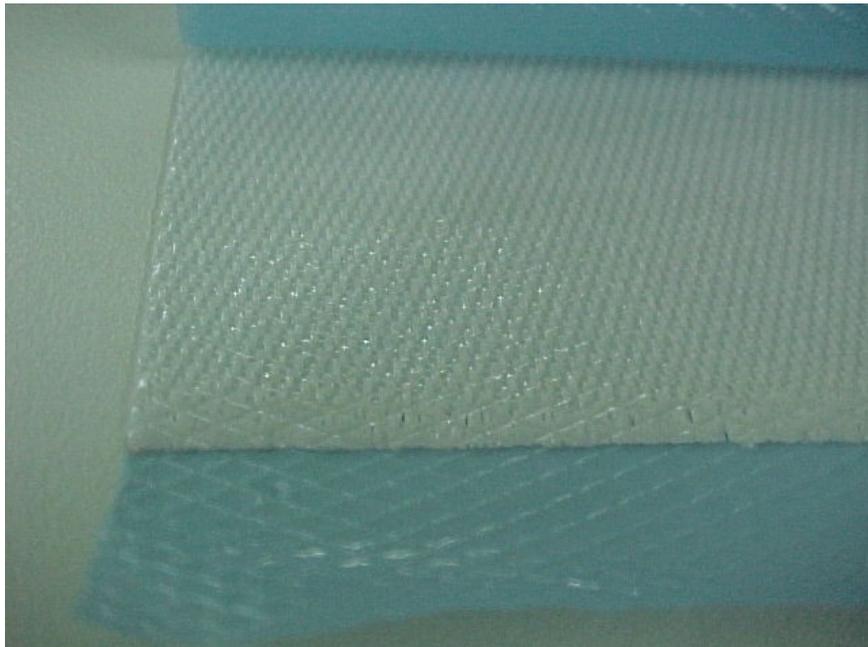


Figura 7 –Fibra de Vidro

Material Placa CDP.

Fibra de carbono com Resina Epóxi: Hexcel P1142

Fornecedor: Hexcel Composites SA.

APÊNDICE B

EXEMPLO DE TABELA DE MEDIDAS DE PERMISSIVIDADE COMPLEXA (REAL E IMAGINÁRIA)

FREQ.	AMOSTRA 01		AMOSTRA 02		AMOSTRA 03		AMOSTRA 04		AMOSTRA 05		AMOSTRA 06		PARTE REAL MÉDIA	DESVIO PADRÃO	PARTE IMAG. MÉDIA	DESVIO PADRÃO
	REAL	IMAGINÁRIA														
100,00	21,9223553 5	- 2,021966364	19,1647428 8	5,843100928	24,4397295 6	3,610824401	20,5833300 7	4,627829068	22,9155050 4	3,547258445	19,2421849 9	4,912069414	21,38	2,10	3,42	2,80
103,28	30,0379250 9	5,425065968	20,8951396 5	2,706111132	20,8443245 7	- 3,091123217	22,2091629 9	3,025286792	24,2153148 4	2,971657998	20,2561138 4	2,314755263	23,08	3,69	2,23	2,83
106,66	22,0673426 7	1,041173036	24,4654795 8	- 0,500435641	29,1259383 5	4,655848341	21,5574866 5	2,580453308	23,3383444 4	- 0,688338882	25,5272308 7	4,288474867	24,35	2,77	1,55	2,61
110,16	27,8529478 7	2,908440522	15,5204785 1	- 0,294220785	18,1615765 1	2,901771689	26,8596107 1	3,464067669	27,2625711 3	2,346503969	24,3655716 1	2,197516987	23,34	5,24	2,25	1,33
113,77	20,7344451 8	2,627360847	21,4411172 7	1,80498556	23,1549626 9	- 0,372258046	24,2813257 9	- 4,583219297	24,5497967 4	0,508312037	24,9595349 3	3,193510939	23,19	1,75	0,53	2,83
117,50	24,1037664 6	3,054708312	22,4341772 4	0,398654591	24,4077396 2	3,080480115	22,3855949 5	1,216379708	26,1126816 1	2,634835701	23,1082327 3	1,496045135	23,76	1,42	1,98	1,11
121,35	25,8410883 9	2,355682525	21,7846179 5	2,147912126	23,1690499 6	0,969887083	27,3331165 5	3,687062477	24,5594139 6	2,43474231	20,7678128 9	2,929680479	23,91	2,48	2,42	0,90
125,33	21,6599690 7	0,63818361	21,1138298 5	3,336742188	24,9214159 8	- 0,008252859	22,9964465 4	- 0,322648065	19,9962363 4	2,054910835	22,6046203 9	2,634713017	22,22	1,70	1,39	1,50
129,43	24,6177729 1	1,067545323	18,1912961 2	1,876284635	23,4896725 3	- 1,463766555	25,0734911 6	2,530787748	25,3421231 6	1,288818822	21,5101331 1	2,153794674	23,04	2,76	1,24	1,43
133,67	24,4857179 6	1,944323994	21,9110479 4	2,185729836	24,7776602 1	3,333097206	25,7936491 1	1,720619833	22,8053288 6	1,314305268	23,5347322 8	1,913715157	23,88	1,41	2,07	0,68
138,06	25,5366099 6	1,392174937	19,4129960 3	3,376549652	22,7760199 8	- 1,605242809	24,2532062 1	- 0,011771541	20,6179897 4	0,608640952	21,4187034 1	1,115860166	22,34	2,30	0,81	1,65
142,58	20,5854093 9	0,107640467	22,6814358 5	1,505923027	26,9618383 1	1,58565	25,4745299 4	2,467852269	23,5460184 4	1,071011027	24,4992677 1	2,616186819	23,96	2,23	1,52	1,00
147,25	24,1171323 7	1,116996089	19,5108445 2	0,002370035	26,1321355 6	1,521502863	22,7008131 4	- 0,633413084	21,3295858 9	- 0,024769641	23,7261038 4	- 0,033083116	22,92	2,31	0,32	0,82
152,08	25,8224301 8	1,048540911	22,5173796 6	2,963098006	23,4412641 2	0,233031964	20,7403303 2	0,470195172	26,2485513 8	0,812938586	17,7284612 7	0,278382557	22,75	3,21	0,97	1,03
157,06	25,3675780 6	0,422738481	20,6965098 2	- 0,038815328	22,3950160 8	1,093136017	22,4048138 9	- 1,286298868	24,4571137 2	0,943041489	26,2580953 4	2,039890927	23,60	2,11	0,53	1,13
162,21	22,0054855 9	0,988764658	20,2616757 3	0,385225794	23,3564759 6	- 0,342115345	24,7843883 2	0,548944573	23,9435438 7	- 0,527553268	19,1787675 1	1,190318409	22,26	2,19	0,37	0,69
167,53	22,9375467 9	2,102536362	20,3568943 5	1,05330631	22,1191254 1	1,165358956	22,4215424 6	0,543346094	19,2240926 6	2,923317368	20,9643146 2	0,038992686	21,34	1,41	1,30	1,05
173,02	24,4832858 1	0,495961266	20,1409926 1	0,405620942	26,4379036 3	0,133799485	23,7813568 2	0,260039482	21,1867711 8	-0,24067547	23,1410732 8	1,395119231	23,20	2,28	0,41	0,55
178,69	23,4822574 5	0,464106225	21,7670053 7	1,978124867	20,2250737 3	1,791358927	22,5027829 2	0,46964194	26,1201908 7	0,018054477	21,9813946 7	2,502631848	22,68	1,99	1,05	1,20
184,54	20,4146232 8	0,519438232	21,2662924 7	1,406660744	24,1758625 8	0,785089928	22,2119441 8	1,005676033	22,3916819 1	2,077651247	22,6338846 4	0,672645232	22,18	1,28	1,08	0,58
190,59	22,9642585 7	0,495800843	18,5717561 7	0,106293355	24,4965330 2	0,29256221	23,5543581 2	1,016613119	24,0261106 3	-0,08483844	22,5444854 9	0,191868795	22,69	2,14	0,34	0,39
196,84	24,1364793 8	2,18266939	22,3966373 1	0,288345509	21,5125702 8	0,70244184	24,2132201 3	0,37573406	22,3971964 9	1,674817188	20,5820272 2	0,38036297	22,54	1,43	0,93	0,80
203,29	22,7310169 5	0,316507164	19,7999332 -	- 0,068913387	23,6872767 1	0,465698369	21,9079519 -	- 0,996491474	23,5422211 3	0,887900633	21,8017219 2	0,159901294	22,25	1,43	0,13	0,64
209,95	21,9691379 1	0,028312941	20,8638541 2	0,660916646	21,5698999 1	- 0,084796651	22,7964811 9	1,31994289	21,1280975 3	- 0,543217289	21,6632051 9	0,393609983	21,67	0,68	0,30	0,65

216,83	22,5869979	17,6569748	-	22,3499820	-	22,8370044	-	24,2155116	1,093605014	20,6024553	0,238772757	21,71	2,30	0,09	0,60
	4	9	0,179093005	5	0,571321627	6	0,367212873	3		2					
	23,8556134	18,9496605	0,53077482	23,9281449	0,397922702	21,9043925	0,241149211	22,6714572	0,544549362	22,4031852	0,968017721	22,29	1,82	0,34	0,54
223,94	1	1	-0,65053681	3		4		5		7					
	21,3284605	21,0532962	0,400256956	22,3093972	0,631146908	23,4575415	0,580534714	23,2080176	0,210552875	20,8088707	-	22,03	1,13	0,26	0,38
231,28	1	9		6		2				5	0,407703472				
	23,2875216	19,7126643	0,731321969	22,5775452	0,605789294	20,9766058	1,182618991	19,7784070	-	21,7989281	-	21,36	1,47	0,22	0,84
238,86	3	4		5		6		4	0,761387624	3	0,859264604				
	24,6097101	19,3985695	-	22,0963582	0,727123438	23,7710924	0,154893419	22,1213135	0,603296111	21,3923001	1,237134051	22,23	1,83	0,40	0,55
246,69	6	8	0,210967216	5		5		2		8					
	21,6466194	20,3253073	0,183416624	23,7976258		22,4834456	0,460199843	21,9494420	1,087704364	20,3388577	1,371590237	21,76	1,33	0,51	0,63
254,77	4	8		7		5		2		8					
	20,9314840	19,3798935	-	22,8321668	-	21,6732721	-	21,9391190	-	21,9611894	-	21,45	1,18	-0,57	0,41
263,12	5	2	0,194951959	2	0,659861144	7	0,337499061	9	1,220829446	8	0,824963089				
	23,0419988	19,4340559	0,294954367	20,9373790	0,355926022	23,3803280	-	22,6331801	-	20,5556334	0,144986351	21,66	1,58	0,18	0,28
271,74	4	9		2		4	0,127472751	7	0,135615095	1					
	22,1677081	20,7271310	-	23,0606565	0,136761402	21,4376619	0,147566314	22,4646844	0,793115472	21,2421865	0,770449967	21,85	0,87	0,30	0,42
280,65	6	7	0,293642098	8		9		1		3					
	21,6771661	17,5650630	0,595373355	21,9263088	-	21,5914590	-	20,9327025	0,70956065	20,4352606	-	20,69	1,63	0,27	0,64
289,85	5	5		1	0,218679259	9	0,368386096	6		5	0,281151534				
	23,0262533	19,4973982	-	21,7214749	0,692651753	21,4941949	0,424629605	22,381048	0,355281352	21,3370878	0,228870295	21,58	1,20	-0,07	0,65
299,35	3	3	0,311157111	3		4		1		1					
	21,3936312	18,9048273	0,122901972	20,9549430	0,031761321	21,8151114	0,22176996	21,8257758	0,516906407	21,4033904	0,527056231	21,05	1,10	0,35	0,27
309,16	3	4		3		8				6					
	22,1031455	19,7279636	0,142231425	22,1845728	0,202143106	21,9477434	-	21,1815706	0,158841683	20,0600952	0,076258657	21,20	1,08	0,09	0,16
319,29	6	5		8		6	0,012260548	21,4407807	0,674825964	21,2243517	0,525717083	21,37	1,33	0,59	0,05
329,75	7	8	0,59849295	22,9171651	0,623001207	22,1348457	0,572641208	6		2					
	21,5395276	19,5444338	0,023708207	21,8331002	-	21,7705757	0,486866282	22,3894421	-	21,0936787	0,223006613	21,36	0,99	0,09	0,26
340,56	7	2		3	0,138461295	1		3	0,244576823	4					
	22,5102497	18,5903995	0,103503219	21,9438484	0,134249931	21,4579448	0,746173435	22,1919840	0,261894366	20,6583675	0,698537699	21,23	1,44	0,30	0,36
351,72	7	3		9		9		4		8					
	21,7920639	18,6725495	-	21,7306894	0,174789425	21,9417158	0,025867572	21,5158223	0,34241977	19,7134901	0,4007039	20,89	1,37	0,20	0,17
363,25	7	2	0,017578606	2		4		9		9					
	22,5949652	18,6733611	0,452121062	21,5839663	0,495254374	21,5756662	0,168380799	21,4537645	0,39297961	20,7382984	0,366475017	21,10	1,33	0,31	0,19
375,16	9	3		3		2		4		7					
	21,3022343	19,1650438	0,047534128	21,8878688	0,22833352	21,8931576	0,401842782	20,6754900	0,478331031	20,7910649	0,241544412	20,95	1,02	0,31	0,17
387,45	8	3		4		4		2		6					
	21,6319554	18,7131358	0,162775127	21,4967069	0,084247851	22,0343354	0,015548818	20,7889499	0,004375223	21,0435448	0,072743276	20,95	1,18	0,07	0,06
400,15	6	8		7		3		4		1					
	21,2176623	18,9905190	0,106535732	21,3264399	-	21,8876381	0,231246094	21,2637483	0,133730136	19,9849529	0,030107326	20,78	1,08	0,03	0,18
413,26	8	6		9	0,015778353	1		1		5					
	21,5256402	19,0635667	-	20,6384556	0,078382753	21,2125432	0,362451514	20,8818366	-	20,1089136	0,257571773	20,57	0,88	0,12	0,18
426,81	4	6	0,010376487	4		5		6	0,140725189	4					
	21,6049666	18,5418794	0,209684485	21,9981907	-	20,4562073	-	21,5851624	0,422492166	19,5913343	-	20,63	1,36	0,08	0,29
440,80	7	2		3	0,178370747	4	0,129937977	8		2	0,222013185				
	21,0772266	18,3252783	0,203878395	21,1567118	0,155278378	21,3596069	-	20,8948237	0,317601406	20,0420888	0,273080415	20,48	1,15	0,16	0,20
455,24	5	2		6		5	0,243826187	6		8					
	21,7570173	18,0365938	0,115668866	21,2141067	0,228682601	21,3079175	-	21,2434929	0,096027493	20,1080290	0,425361088	20,61	1,37	0,14	0,18
470,16	4	4	0,109329113	8		9	0,109236377	4		7					
	20,8396705	18,8491041	0,152329379	21,4347918	0,383553859	21,7849727	0,265573492	21,0258017	0,071782474	19,8567811	0,225250408	20,63	1,09	0,18	0,14
485,57	1	5		8		9		1		3					

501,48	21,1970325 9	-0,16988435	17,9934117	0,336527594	21,0476752 2	0,042407402	20,7896009 4	0,304005213	20,9430930 2	-	19,8440241 3	0,300082507	20,30	1,23	0,13	0,21
517,92	21,7372242 9	0,287278224	18,3515052 2	0,203181786	21,0927632 5	-	21,1323877 5	-	20,8614837 8	0,235540236	19,4350418 9	0,397705234	20,44	1,28	0,18	0,18
534,89	21,1465141 7	0,245846377	18,9713243 7	-	21,5512614 5	0,123156555	21,3117939 5	0,079030773	21,3130691 6	0,18135254	20,3331059 1	0,231957226	20,77	0,98	0,04	0,18
552,43	21,0904060 5	0,032945032	18,1398768 9	0,010458542	20,9186898 3	0,2169622	21,2638624 6	0,308620492	21,1444312 1	-	19,7492415 3	0,168533555	20,38	1,23	0,10	0,15
570,53	21,5752908 21,0222198	0,079062592	18,7056914 6	0,135624786	21,5971720 4	0,118812027	21,2491107 1	0,014399812	20,7953606 1	0,593784686	19,7433075 6	-	20,61	1,16	0,15	0,23
589,23	21,0222198 7	0,387310751	18,0401145 9	-	21,033879 9	0,33570792	21,3085138 6	0,209655003	20,9016596 1	-	20,1589362 6	0,134099436	20,41	1,22	0,16	0,18
608,54	21,2097933 6	0,009932836	18,6347874 3	0,025027196	21,1385999 9	0,026627152	21,1287757 7	0,1898886	20,4762299 3	-	19,1962553 3	0,5048823	20,30	1,12	0,11	0,22
628,48	20,9552146 20,9386087	0,159420297	18,4051969 4	0,005800634	20,8752160 1	-	21,1958400 5	-	20,4216497 2	-	19,5899095 6	0,220519355	20,24	1,06	0,04	0,16
649,08	20,9386087 9	0,103268085	18,4624538 2	0,418105344	20,9420191 4	0,105627851	20,6688405 5	0,07622204	20,4437765 2	-	20,1179725 2	0,210155719	20,26	0,94	0,14	0,17
670,35	21,2383842 3	0,103277377	18,4412133 8	0,075305795	21,2435279 5	-	21,3429645 4	-	20,7413652 1	-	19,6964838 3	-	20,45	1,16	0,01	0,10
670,35	21,2383842 3	0,103277377	18,4412133 8	0,075305795	21,2435279 5	0,012407729	21,3429645 4	0,056813314	20,7413652 1	0,10788243	19,6964838 3	0,151420928	20,45	1,16	0,01	0,10
692,32	21,0023402 9	0,208124263	18,2044019 9	0,327409067	20,8976314 2	0,183360012	20,6466287 2	0,147418554	20,3680564 6	0,228589972	20,1112304 3	-	20,21	1,03	0,18	0,12
715,01	20,7823342 9	0,075487806	18,5179393 1	-	20,9355233 1	-	20,8685300 8	0,147140157	20,5795273 5	0,491360021	19,3664789 8	0,079917432	20,18	1,00	0,07	0,23
738,45	21,0043513 1	0,321581537	18,1462284 2	0,013979789	20,8697585 7	0,32793805	20,9016375 5	0,006665875	20,7596558 4	-	19,5411999 4	0,50240159	20,20	1,14	0,19	0,23
762,65	21,3203761 8	0,285835697	17,7598787 8	0,027748564	20,8379391 2	0,254249855	20,6016454 2	0,134261	20,7938140 2	0,014655739	19,4669623 8	-	20,13	1,31	0,01	0,18
787,64	21,3263097 1	0,267360825	18,0230721 2	0,288559995	20,7968140 9	0,110676841	20,9260639 3	0,149565037	20,6502834 3	-	19,4147488 4	-	20,19	1,24	0,09	0,19
813,46	21,1636590 2	0,258493032	18,2158674 7	0,125729911	21,0408644 3	-	20,8202166 3	0,099308025	20,3401810 5	0,134890692	19,2723314 4	-	20,14	1,17	0,02	0,17
840,12	21,1166022 3	0,134490988	18,2894406 2	0,064236807	20,9316895 7	-	20,6723278 8	-	20,6289449 6	0,12923378	19,5752449 7	0,190690444	20,20	1,08	0,05	0,11
867,65	20,6088267 5	0,037051573	18,3237797 9	0,127996301	20,7042007 9	-	21,0820457 1	0,067617184	20,4125966 8	0,09612809	19,4736507 7	0,01397951	20,10	1,02	0,06	0,05
896,09	20,9143973 4	0,141908017	18,012646 9	0,106838164	20,5086591 9	-	20,6066663 7	0,021806475	20,4793547 4	-	19,2887586 8	-	19,97	1,11	0,03	0,08
925,46	20,8749997 5	0,048756921	17,800279 2	0,082888126	20,9172845 2	-	20,8210764 1	0,075660677	20,1938988 9	0,009393501	19,3175002 1	0,005734701	19,99	1,23	-0,03	0,07
955,79	20,6201152 4	0,002246103	17,8664884 9	0,05192023	20,6712926 8	-	20,5882848 8	0,247445429	20,4477656 9	0,082414818	19,4331369 8	-0,08984147	19,94	1,12	0,03	0,12
987,11	20,693604 20,8584973	0,046739297	18,2074449 6	0,180549627	20,8208589 7	0,109151115	20,7593856 5	0,094633998	20,4016658 1	0,001723664	19,3420955 2	0,171661666	20,04	1,05	0,09	0,09
1019,46	20,8156595 9	0,075694804	18,0624319 7	0,064826285	20,8154152 3	0,095063064	20,7607923 3	0,035818897	20,3657544 8	0,057499336	19,4254498 8	0,018123993	20,05	1,11	0,06	0,03
1052,87	20,8156595 3	0,052461246	18,0874465 7	0,022867433	20,8222926 9	0,045055863	20,7515494 9	0,051319968	20,4177901 8	0,039784934	19,3086713 8	0,1025485	20,03	1,11	0,05	0,03
1087,38	20,7681371 9	0,067981764	18,0536947 4	0,086325784	20,7943570 9	0,061503056	20,6582445 2	0,068607162	20,4185693 7	0,024620367	19,3671977 6	0,098921161	20,01	1,10	0,07	0,03

1123,02	20,7558732	18,0488287	0,100884609	20,7287741	0,012583088	20,6631211	0,103162985	20,3242851	0,047276674	19,3493542	0,074474595	19,98	1,08	0,06	0,04
	1	4		8		8		2		8					
	20,7403848	17,9892302	0,055685304	20,7869006	-	20,6421289	0,058194196	20,3663236	0,103233916	19,3291970	0,068371524	19,98	1,11	0,05	0,04
1159,82	3	6		9	0,020142412	5		9		8					
	20,6442100	17,9216028	0,127330611	20,7105777	0,038336227	20,6098397	-	20,3239875	0,07519863	19,3133237	0,019569842	19,92	1,11	0,05	0,05
1197,83	6	5		8		6	0,015629483	9		2					
	20,7109649	17,9372661	0,030480726	20,6739360	0,020184281	20,6326619	0,056057807	20,3040652	0,040709988	19,2660874	0,134463227	19,92	1,11	0,06	0,04
1237,09	2	6		1		5		7		1					
	20,7147457	17,8856397	0,117955417	20,6544527	0,035628216	20,5864475	0,100424998	20,2457160	0,075321327	19,2653695	0,080798482	19,89	1,12	0,08	0,03
1277,64	6	9		8		4		9		1					
	20,6622852	17,8801412	0,025226519	20,6297933	0,027309702	20,5281678	0,082065814	20,3871427	0,01079867	19,2581990	0,036524552	19,89	1,12	0,04	0,03
1319,51	3			9		4		7		3					
	20,6703945	17,8641344	0,058433431	20,6134644	0,01370121	20,5506033	0,015694002	20,2786429	0,010852752	19,2337637	0,119603302	19,87	1,12	0,04	0,05
1362,75	5	2		2		1		4		1					
	20,6005567	17,8802675	0,043858436	20,6182165	0,008546012	20,6016285	0,019727383	20,2558047	0,008388376	19,1286785	0,01624914	19,85	1,12	0,03	0,03
1407,42	2	6		6		2		7		4					
	20,5081303	17,8780198	0,007816162	20,5860540	-	20,4629826	0,04483616	20,1945878	0,032683544	19,1795524	0,07184835	19,80	1,08	0,04	0,04
1453,54	8	5		2	0,017879654	7		9		4					
	20,6010342	17,8617903	0,002815177	20,6284137	0,051753236	20,4784993	-	20,1396061	0,049603622	19,1908089	0,075168926	19,82	1,10	0,03	0,04
1501,18	2	5		7		6	0,013201939	9		7					
	20,5605229	-	0,028023659	20,5243381	0,030887411	20,4848162	0,099700266	20,1756097	0,011120971	19,0797396	0,028814897	19,78	1,09	0,02	0,04
1550,38	6	17,8612198		5		4		6		4					
	20,5255546	17,8764677	0,027952603	20,5434311	0,003085667	20,6031960	0,055408348	20,1856058	0,083080711	19,0999063	0,054038137	19,81	1,10	0,04	0,03
1601,19	3	6		5		6		9		8					
	20,5457429	17,7885164	0,006554699	20,5442446	0,042264345	20,4942139	0,044017507	20,1777575	0,012686467	19,0888184	0,033358506	19,77	1,12	0,03	0,02
1653,67	1	4		4		5		1		8					
	20,5321553	17,7158869	0,036215121	20,4955146	0,041606717	20,4645058	0,013826266	20,1259946	0,053996652	19,1250483	-	19,74	1,13	0,03	0,02
1707,86	6	6		2		5		9		9	0,009388327				
	20,4860228	17,8159092	-	20,4884073	0,000318408	20,4542402	0,010053602	20,0948611	0,059126456	19,0558476	0,045003659	19,73	1,09	0,02	0,03
1763,84	7	6	0,015225739	2		6		7		9					
	20,5424408	17,8337545	0,04227081	20,5248755	-	20,4237719	0,007067364	20,1031894	0,003368424	19,0596396	0,042153085	19,75	1,09	0,01	0,03
1821,64	7	-		5	0,033811197	3		9		1					
	20,4960776	17,7648831	0,005654557	20,4752411	-	20,4658546	0,058904856	20,0997367	0,015035193	19,0528733	0,00597883	19,73	1,11	0,01	0,03
1881,35	4	7		1	0,014514698	3		6		3					
	20,5481819	17,7463571	0,026185579	20,4166777	0,009288953	20,4550537	0,007330011	20,1029205	-	19,0638921	-	19,72	1,11	0,00	0,02
1943,00	5	3		5		1		2	0,002604601	1	0,029791945				
	20,4929290	17,8217159	0,001869843	20,4352362	-	20,4196258	-	20,0491747	-	19,1107828	0,07540046	19,72	1,07	-0,02	0,05
2006,68	1	3		7	0,059206546	6	0,042393449	5	0,049611452	9					
	20,4632734	17,7590645	-	20,4383295	-	20,4696410	-	20,0697772	0,004716858	19,0581023	0,029172373	19,71	1,10	-0,01	0,02
2072,45	3	3	0,028387473	7	0,031227367	6	0,021838485	7		6					
	20,4240937	17,7405869	-	20,5006142	-	20,3731050	0,005288234	20,0664028	-	18,9788301	-	19,68	1,11	-0,01	0,02
2140,37	1	8	0,033701449	2	0,020400218	8		1	0,023660502	5	0,000169628				
	20,4840156	17,7633463	0,010256064	20,4517142	0,005742524	20,4081121	0,024784851	20,1061033	-	19,0159117	0,002749238	19,70	1,10	0,00	0,02
2210,52	6	8		4		4		9	0,022679236	9					
	20,4199135	17,7677522	-	20,4265964	-	20,4012734	-	20,0564072	-	19,0610954	-	19,69	1,08	-0,02	0,01
2282,97	2	9	0,020208293	3	0,004765728	6	0,023657284	3	0,031129616	1	0,023572857				
	20,4061685	-		20,4092598	-	20,4017239	-	-	-	18,9910631	-	19,66	1,10	-0,02	0,02
2357,79	9	17,7127996	0,005443955	4	0,011199633	2	0,014284882	20,0544056	0,009861737	4	0,054865639				
	20,3817528	17,7005291	-	20,4311477	-	20,3872932	-0,01204741	20,0610658	0,020246628	19,0026477	0,02422349	19,66	1,10	-0,02	0,02
2435,06	7	5	0,045047148	8	0,021693551	3		1		1					
	20,4579755	17,6890850	0,035333186	20,4034545	-0,01020448	20,3861142	-	20,0564658	-	-	-	19,66	1,11	-0,01	0,03
2514,87	7	5		4		7	0,022591817	5	0,026840994	18,9906796	0,028226272				

2597,29	20,4565638	0,008313195	17,7059810	-	20,4010725	-	20,3426495	-	20,0392121	-	19,0020484	-	19,66	1,10	-0,02	0,02
	20,4148063	-	7	0,008624543	1	0,032238298	1	0,023425183	8	0,030948929	5	0,012336264				
2682,41	8	0,012857096	-	17,6878133	-	20,3978860	-	20,3652684	-	20,0493417	-	18,9751923	19,65	1,11	-0,03	0,02
	20,4087594	-	7	0,025691113	7	0,039125556	6	0,054530411	5	0,022454008	9	0,011316883				
2770,32	7	0,042601257	-	17,7027183	-	20,3874329	-	20,3956509	-	20,0336767	-	18,9775257	19,65	1,10	-0,03	0,01
	20,4133334	-	8	0,035234492	4	0,031549557	1	0,031104855	9	0,024354925	6	0,016617257				
2861,12	1	0,026691344	-	17,7051802	-	20,3942309	-	20,3244656	-	20,0019806	-	18,9837186	19,64	1,09	-0,02	0,01
	20,4421341	-	2	0,007199731	8	0,029084241	2	-0,03152619	9	0,017005522	4	0,035613208				
2954,89	9	0,055196115	-	17,6941090	-	20,3921567	-	20,3324271	-	20,0184795	-	18,9560535	19,64	1,10	-0,03	0,02
	20,4171630	-	1	0,013887479	5	0,031401158	6	0,015023477	4	0,040963608	2	0,033989724				
3051,73	2	0,020214078	-	17,6683425	-	20,4360614	-	20,3402958	-	20,0734104	-	18,9581491	19,65	1,12	-0,03	0,01
	20,3759688	-	8	0,041217758	1	0,034075367	1	0,024991936	9	0,038331534	6	0,015327679				
3151,75	8	0,033982309	-	17,6906379	-	20,3870664	-	20,3250021	-	20,0136700	-	18,9370399	19,62	1,10	-0,02	0,02
		-	8	0,015697547	8	0,027708263	7	0,016007541	6	0,026722929	9	0,010115437				
3255,04	20,3736031	0,020947743	-	17,6897662	-	20,3983677	-	20,3414012	-	20,0127536	-	18,9447687	19,63	1,10	-0,03	0,01
	20,3852159	-	1	-0,02928251	1	0,040377775	6	0,017538736	8	0,043309782	-	0,043572622				
3361,72	8	-0,06078924	-	17,6967897	-	20,3772929	-	20,3484798	-	20,0129906	-	18,9309499	19,63	1,10	-0,03	0,03
	20,4068728	-	1	0,004369428	2	0,067199692	2	0,027508947	9	0,030337172	9	0,024025501				
3471,89	3	0,059481363	-	17,7113815	-	20,3678205	-	20,3446953	-	20,0006426	-	18,9415189	19,63	1,09	-0,04	0,02
	20,3634000	-	6	0,022725467	7	0,023211552	4	0,054251335	1	0,036535793	6	0,021154061				
3585,68	5	-0,04657064	-	17,7083607	-	20,3976031	-	20,3490103	-	20,0101892	-	18,9335962	19,63	1,09	-0,03	0,02
	20,3569567	-	4	0,020442883	4	0,017798635	9	0,056195736	6	0,045720552	2	0,002711834				
3703,20	1	0,005441993	-	17,6538663	-	20,3763631	-	20,3260334	-	19,9938129	-	18,9366561	19,61	1,10	-0,02	0,02
	20,3827318	-	7	0,007704925	4	0,042219516	4	0,030692624	9	0,029704098	9	0,037184398				
3824,56	9	0,021438693	-	17,6587616	-	20,3439980	-	20,3169552	-	20,0174253	-	18,9357589	19,61	1,10	-0,02	0,01
	20,3745847	-	6	0,002449076	4	0,017287656	2	0,016437144	9	0,019086036	5	-0,01468979				
3949,91	9	0,008918457	-	17,6526277	-	20,3651023	-	20,3293243	-	19,9826794	-	18,9128894	19,60	1,11	-0,01	0,02
	20,3719370	-	5	0,039470706	5	0,000998075	5	0,038229069	4	0,008356467	1	0,010807432				
4079,36	9	0,012439577	-	17,6574686	-	20,3743182	-	20,3121429	-	20,0066087	-	18,8945191	19,60	1,11	-0,01	0,01
	20,3641128	-	6	0,009934044	2	0,020693392	8	-0,02340352	6	0,020337388	2	0,007031383				
4213,06	4	0,013493182	-	17,6419866	-	20,3277931	-	20,3051921	-	19,9693218	-	18,9248702	19,59	1,10	-0,01	0,01
	20,3782987	-	8	0,009629003	6	0,003894706	2	0,014404923	3	0,008064362	-	0,032634931				
4351,14	9	0,005508418	-	17,6586263	-	20,3271651	-	20,3150554	-	20,0006964	-	18,9034644	19,60	1,10	0,00	0,01
	20,3730271	-	7	0,006563731	6	0,01123036	9	0,00131257	2	0,000757844	-	18,9119577				
4493,74	5	0,002923677	-	17,6540110	-	20,3593999	-	20,3280768	-	19,9831900	-	18,9119577	19,60	1,11	0,01	0,01
	20,3653992	-	5	0,019199263	1	0,002746466	8	0,01543471	5	0,016377121	9	0,009665393				
4641,01	5	0,015459523	-	17,6461397	-	20,3549601	-	20,3066891	-	19,9703445	-	18,8973631	19,59	1,10	0,02	0,01
	20,3424339	-	7	0,024349565	1	0,002799721	1	0,01198003	1	0,026480103	4	0,027849122				
4793,12	1	0,018502199	-	17,6392503	-	20,3392640	-	20,3082821	-	19,9664169	-	18,8972587	19,58	1,10	0,01	0,01
	20,3563701	-	7	0,009578255	2	0,019128083	8	0,023308797	8	0,008466017	9	0,021307029				
4950,21	8	0,042765591	-	17,6356502	-	20,3325047	-	20,2839615	-	19,9648149	-	18,8785764	19,58	1,10	0,04	0,01
	20,3352588	-	2	0,035771554	2	0,033659523	4	0,02100031	8	0,045636821	1	0,046823909				
5112,44	8	0,018497661	-	17,6185108	-	20,3307369	-	20,2944644	-	19,9680713	-	18,8658175	19,57	1,11	0,03	0,01
		-	9	0,038163051	7	0,002392983	7	0,041936743	9	0,029131934	4	0,028250482				
5279,99	20,3235057	0,049853749	-	17,6217387	-	20,3274218	-	20,2711471	-	19,9478868	-	18,8844463	19,56	1,10	0,04	0,01
	20,3345487	-	7	0,052672321	7	0,037014414	7	0,041640521	1	0,036555533	7	0,05216725				
5453,04	4	0,016327725	-	17,6183473	-	20,3326709	-	20,2778462	-	19,9494016	-	18,8791966	19,57	1,10	0,04	0,02
	20,3567071	-	8	0,045385179	8	0,029570036	6	0,043227325	8	0,026320916	6	0,05930757				
5631,76	3	0,067933626	-	17,6231208	-	20,3113343	-	20,2883540	-	19,9385374	-	18,8627850	19,56	1,11	0,06	0,01
	20,3472612	-	1	0,06277995	5	0,062184873	9	0,060349915	4	0,04112268	4	0,083405766				
5816,33	4	0,059028681	-	17,6224191	-	20,3369091	-	20,2661268	-	19,9431626	-	18,8673928	19,56	1,10	0,06	0,01
		-	5	0,059613073	9	0,053418866	8	0,068175476	4	0,063823135	2	0,069043176				

6006,95	20,3306411 9	0,075196855	17,6056486 2	0,084792076	20,3147009 4	0,063385703	20,2541398 4	0,068524557	19,9439578 0,070270721	18,8824637 1	0,093859199	19,56	1,10	0,08	0,01
6203,82	20,3140273 4	0,06714014	17,6083365 1	0,076913871	20,3006373 8	0,064779677	20,2606328 8	0,074545814	19,9405015 6	18,8406497 6	0,091800451	19,54	1,10	0,08	0,01
6407,14	20,3237007 6	0,065561216	17,6063255 7	0,079090485	20,2902199 3	0,101671325	20,2477488 0,070073222	19,9564136 9	0,068868237	18,8535598 1	0,09965591	19,55	1,10	0,08	0,02
6617,13	20,3121219 1	0,098193159	17,6053509 3	0,091033361	20,3057028 0,099035404	20,2871847 9	20,2421496 6	0,080254451	19,9292613 0,08261484	18,8219391 5	0,103230888	19,54	1,10	0,09	0,01
6834,00	20,2732957 5	0,11100237	17,5922136 6	0,079209038	20,2871847 9	0,099187866	20,2394252 4	0,0864555	19,9250354 6	18,8269268 7	0,10645132	19,52	1,10	0,10	0,01
7057,97	20,2741256 8	0,095397166	17,5801668 4	0,088962958	20,2800611 0,109985677	20,2563521 2	20,2147034 6	0,085808207	19,8995979 3	18,8152997 3	0,105597773	19,51	1,10	0,10	0,01
7289,29	20,2948083 0,09428548		17,5661393 6	0,073777052	20,2563521 2	0,097582683	20,2379424 8	0,083525718	19,8833209 0,102998851	18,8159005 8	0,118761638	19,51	1,10	0,10	0,02
7528,18	20,2667037 7	0,098929701	17,5413740 9	0,081897837	20,2523388 4	0,101304293	20,2181020 8	0,096563334	19,8780446 8	18,7832109 6	0,130916711	19,49	1,11	0,10	0,02
7774,91	20,2650865 5	0,107428212	17,5371121 5	0,106688394	20,2367669 3	0,10484949	20,1992331 7	0,113908422	19,8707157 7	18,7849596 4	0,114839003	19,48	1,11	0,11	0,00
8029,72	20,240067 0,108626073		17,5289494 0,092100781		20,2362368 1	0,112179696	20,1909180 2	0,112703652	19,8472430 9	18,7813121 0,116388323		19,47	1,10	0,11	0,01
8292,88	20,2336093 6	0,118732107	17,4967539 7	0,094571329	20,2250022 5	0,072932469	20,1770934 5	0,100525309	19,8785952 3	18,7693438 7	0,127827889	19,46	1,11	0,11	0,02
8564,67	20,2438561 3	0,092310971	17,5457964 4	0,118909591	20,2048246 3	0,128226963	20,1758906 4	0,106945003	19,8363208 2	18,7798362 2	0,115127957	19,46	1,09	0,11	0,01
8845,37	20,2188178 0,109677575		17,5260770 6	0,114034628	20,2075746 6	0,111994321	20,1695933 3	0,099167149	19,8296318 0,096441092	18,7488303 0,133692699		19,45	1,10	0,11	0,01
9135,26	20,2132630 5	0,109285405	17,5155345 5	0,094990767	20,1919356 1	0,112418448	20,1493685 5	0,105097683	19,8246620 0,110923476	18,7265178 3	0,123758081	19,44	1,10	0,11	0,01
9434,66	20,1956730 5	0,105860449	17,4911984 5	0,099124903	20,1929913 8	0,098095585	20,1538015 2	0,109805419	19,8177184 5	18,7362321 9	0,142807329	19,43	1,10	0,11	0,02
9743,87	20,1821268 8	0,100347327	17,4855436 6	0,093914907	20,1874566 8	0,101547093	20,1427012 5	0,10309621	19,7971123 1	18,7224876 5	0,117366782	19,42	1,10	0,11	0,01
10063,21	20,1876192 6	0,086776534	17,5005091 1	0,093249572	20,1679640 7	0,080341094	20,1283970 7	0,091091132	19,8160648 1	18,7275698 5	0,101305588	19,42	1,09	0,09	0,01
10393,02	20,1728535 5	0,09702036	17,4857971 8	0,097897018	20,1659819 1	0,083424582	20,1242577 9	0,093461696	19,7878608 8	18,7011535 5	0,145919525	19,41	1,10	0,11	0,02
10733,63	20,1554764 4	0,095181473	17,4597053 1	0,091413126	20,1460478 1	0,093156043	20,1154025 7	0,09669157	19,7924665 9	18,703328 0,124353438		19,40	1,10	0,10	0,01
11085,41	20,1680378 8	0,090514688	17,4561470 4	0,089939149	20,1508895 5	0,091173064	20,1214492 8	0,07978539	19,7800810 3	18,6964802 3	0,106122223	19,40	1,10	0,09	0,01
11448,72	20,1596948 9	0,090836861	17,4522387 9	0,09758069	20,1437230 7	0,082668467	20,1099790 4	0,096103844	19,7691697 9	18,6790017 9	0,121311611	19,39	1,10	0,09	0,01
11823,94	20,1476293 0,12408147		17,4328319 2	0,053288393	20,1751311 1	0,136892727	20,0873542 7	0,087198651	19,7675846 3	18,6608662 8	0,107038503	19,38	1,11	0,10	0,03
12211,45	20,1333323 6	0,091610141	17,4203669 0,098808489		20,1379420 5	0,100805553	20,0377565 7	0,146954631	19,7408263 7	18,7089164 9	0,121735201	19,36	1,09	0,10	0,04
12611,67	20,1215152 3	0,095606649	17,4568063 2	0,057741874	20,0851891 4	0,087621134	20,0855532 4	0,057532933	19,8185065 1	18,6727388 6	0,132370141	19,37	1,09	0,08	0,03
13025,00	20,1036063 3	0,080960277	17,4133013 1	0,064982005	20,1055151 3	0,088102021	20,0488291 8	0,066572488	19,7281905 0,078131677	18,6552207 0,091967874		19,34	1,10	0,08	0,01
13451,87	20,1075857 8	0,099502238	17,4194011 9	0,081518648	20,0912106 3	0,080362824	20,0595737 6	0,084763423	19,7270439 5	18,6162368 2	0,095796315	19,34	1,10	0,08	0,01

13892,74	20,1076857	17,3998581	0,065946109	20,0799223	0,054716165	20,0564232	0,098101374	19,7265215	0,082024997	18,6254619	0,092599177	19,33	1,10	0,08	0,02
	4	5		9		7		1		3					
	20,1006413	17,4082308	0,064058689	20,0945239	0,081456203	20,0338994	0,060994089	19,7073822	0,070063539	18,6243479	0,087404169	19,33	1,10	0,07	0,01
14348,06	4	7		5		8		2		2					
	20,1067874	17,3860785	0,047840165	20,0814839	0,064538918	20,0487001	0,053164042	19,7140500	0,062909326	18,5979177	0,078712786	19,32	1,11	0,06	0,02
14818,30	5	3		3		9		3		5					
	20,1283914	17,4159210	0,029667598	20,1009209	0,017692603	20,0357028	0,048632214	19,6747330	0,065083922	18,6210680	0,069118112	19,33	1,10	0,05	0,02
15303,95	6	3		1		1		7		1					
	20,0980802	17,3899131	0,040562355	20,0914631	0,039601697	20,0287414	0,051093167	19,7010462	0,044585953	18,5943319	0,06078136	19,32	1,10	0,05	0,01
15805,51	5	4		8		7		9		2					
	20,0633727	17,3733149	0,018730657	20,0826556	0,030562747	20,0380589	0,042052039	19,6909845	0,038537043	18,5971242	0,059006813	19,31	1,10	0,04	0,01
16323,52	2	8		3		8		1		1					
	20,0584445	17,4540067	0,051888853	20,0664271	0,011869576	20,0364844	0,024892273	19,7058883	0,018101784	18,6058097	0,064616298	19,32	1,07	0,03	0,02
16858,50	3	8		1		1		4		3					
	20,0926026	17,4231793	-	20,0687377	0,034173298	20,0439171	0,027533312	19,7562604	0,019414362	18,5940056	0,025917395	19,33	1,10	0,02	0,02
17411,01	7	9		9		6		3		6					
	20,0918135	17,4114265	0,037692522	20,0881958	0,018257046	20,0101510	0,018099177	19,7065712	0,01416073	18,6033251	0,037267658	19,32	1,09	0,02	0,01
17981,63	3	3		4		3		9		1					
	20,0971583	17,4197755	0,010363687	20,0953547	-	20,0283670	0,014514904	19,7078040	0,012848774	18,5614009	0,026821164	19,32	1,10	0,01	0,02
18570,96	5	9		1		2		8		9					
	20,1521737	17,3931490	0,007003532	20,0411167	-	20,0467992	0,085349129	19,7453958	-	18,6056052	-	19,33	1,11	-0,02	0,08
19179,60	2	5		6		6		2		5					
	20,1076100	17,4529677	0,026753713	20,1357295	0,076443133	20,0592516	0,010235464	19,7159844	0,010306955	18,5928078	0,015725382	19,34	1,10	0,03	0,03
19808,18	1	7		8		8		2		2					
	20,2625220	17,4207664	0,016038491	20,0879260	-	20,0531127	0,005875603	19,7315307	-	18,6162306	0,014219029	19,36	1,12	0,04	0,10
20457,37	9	8		3		8		3		8					
	20,3040081	17,4132413	0,001594439	20,1055206	0,015061648	20,0727154	-	19,7244090	0,022401965	18,6192240	0,005004502	19,37	1,13	0,01	0,01
21127,83	0,012712284	5		5		7		7		6					
	20,0111059	17,4492796	0,006550412	20,0709174	-	20,0575526	0,004888541	19,7552931	0,01165432	18,6164871	0,011539251	19,33	1,07	-0,03	0,10
21820,27	9	4		8		7		7		6					
	20,1062994	17,4203220	0,015254034	20,1442504	-	20,0643263	-	19,7066520	0,010204479	18,6334920	0,01628225	19,35	1,10	0,00	0,04
22535,40	9	8		5		2		5		5					
	20,1583192	17,4433761	-	20,1761109	0,046935041	20,1078887	-	19,7423096	-	18,6322601	-	19,38	1,11	0,00	0,03
23273,96	8	7		5		9		6		7					
	20,1401269	17,4371892	0,016486302	20,1339590	0,014545482	20,0804467	-	19,7425951	0,012064992	18,6455091	0,013653386	19,36	1,10	0,01	0,01
24036,74	3	1		1		8		8		8					
	20,1235683	17,4505776	0,005537024	20,1612215	0,016664782	20,0854319	0,011450795	19,7444684	-	18,6473126	0,011611955	19,37	1,10	0,01	0,01
24824,51	5	9		9		5		8		7					
	20,1247547	17,4342222	0,000236558	20,1172969	0,003096252	20,0825702	-	19,7472401	0,000542904	18,6548455	0,005694015	19,36	1,10	0,00	0,01
25638,10	4	1		2		4		7		7					
	20,1320124	17,4296810	0,021908175	20,1319705	0,020338972	20,0824891	0,010540946	19,7707144	0,017775656	18,6298294	-	19,36	1,11	0,01	0,02
26478,35	2	2		7		7		8		1					
	20,1431488	17,4297667	0,010331986	20,1224481	-	20,0901396	-	19,7673789	0,009211185	18,6529640	0,015612899	19,37	1,11	0,00	0,01
27346,14	4	5		8		1		8		6					
	20,1417359	17,4391865	-	20,1018073	0,016005781	20,0713956	0,002411274	19,7548838	0,004974078	18,6523846	0,016263806	19,36	1,10	0,02	0,02
28242,38	3	9		2		2		8		6					
	20,1365469	17,4555229	-	20,1394909	0,000987308	20,0949181	0,013073485	19,7590137	0,003064374	18,6561406	0,012291948	19,37	1,10	0,01	0,01
29167,98	9	5		9		9		7		5					
	20,1753932	17,4789142	0,028980796	20,1720408	0,030569909	20,1206649	0,032507495	19,7932631	0,030534303	18,6877021	0,026527594	19,40	1,10	0,03	0,00
30123,92	7	6		1		8		3		3					
	20,1682206	17,4716410	0,024418567	20,1532000	0,035498716	20,1155016	0,024339282	19,7915042	0,0314465	18,683467	0,020400683	19,40	1,10	0,03	0,01
31111,20	7	6		2		4		8		8					

32130,82	20,1724839 1	17,4634178 8	0,032735319	20,1390347 6	0,025603688	20,1209209 6	0,020705145	19,7805575 6	0,016555385	18,6757995 3	0,022292713	19,39	1,10	0,02	0,01
32130,82	20,1724839 1	17,4634178 8	0,032735319	20,1390347 6	0,025603688	20,1209209 6	0,020705145	19,7805575 6	0,016555385	18,6757995 3	0,022292713	19,39	1,10	0,02	0,01
33183,87	20,1610238 7	17,4611839 1	0,027388468	20,1686800 7	0,026919349	20,1109908 4	0,026615231	19,7779988 2	0,029120359	18,6729438 3	0,026348726	19,39	1,11	0,03	0,00
34271,42	20,1539819 20,1519547	17,4639415 17,4590205	0,021319763 0,018116875	20,0927986 20,1506417	- 0,018588665	20,1038315 20,1032761	0,042888442 0,0226997	19,7657298 19,7633109	0,022945212 0,013789626	18,6711228 18,6644275	0,017105997 0,015220839	19,38	1,09	0,02	0,02
35394,62	20,1588459 7	17,4577189 1	0,015578198	20,1226232 8	0,018632729	20,0988368 2	0,00999245	19,7685478 9	0,015166137	18,660087 1	0,010455002	19,38	1,10	0,01	0,00
36554,64	20,1471055 4	17,4639198 8	0,011700374	20,1509459 3	0,022148379	20,1127973 4	0,008765794	19,7696689 7	0,011488623	18,6709853 6	0,012352688	19,39	1,10	0,01	0,01
37752,66	20,1565226 7	17,4624525 7	0,011424838	20,1438031 2	0,01299465	20,1038487 4	0,012845453	19,7701682 2	0,009627697	18,6681683 9	0,009464467	19,38	1,10	0,01	0,00
38989,96	20,1598217 1	17,4655286 2	0,017078575	20,1584669 2	0,009683799	20,1078044 8	0,01395344	19,7720320 3	0,009934788	18,6635996 8	0,009492011	19,39	1,10	0,01	0,00
40267,80	20,1541791 3	17,4705733 4	0,01070088	20,1465568 8	0,007730568	20,1089826 5	0,017893484	19,7661506 0,01868753	0,01868753	18,6734490 7	0,003276229	19,39	1,10	0,01	0,01
41587,52	20,1543531 5	17,4624803 8	0,006372382	20,1653540 1	0,008067946	20,1098226 8	0,013622753	19,7701928 0,010548907	0,010548907	18,6726388 6	0,002248179	19,39	1,10	0,01	0,00
42950,50	20,1553448 1	17,4623081 1	0,008892391	20,1461415 4	0,011491826	20,1084635 3	0,012540367	19,7724866 6	0,005367998	18,6690956 0,004948145	0,004948145	19,39	1,10	0,01	0,00
44358,14	20,1416361 7	17,4726061 5	0,002465675	20,1815710 5	- 0,043433119	20,1043355 2	0,005558861	19,7824748 1	0,004387569	18,6680438 2	0,006258251	19,39	1,10	0,00	0,02
45811,92	20,1549129 4	17,4640932 4	0,010849949	20,1324958 0,007777495	0,007777495	20,1074373 1	0,00803731	19,7783015 2	0,009414794	18,6687021 8	0,00308946	19,38	1,10	0,01	0,00
47313,34	20,1615413 4	17,4598654 5	0,009857582	20,1389827 4	0,006065068	20,1041400 3	0,007844384	19,7724641 9	0,0078516	18,6669275 9	0,00426527	19,38	1,10	0,01	0,00
48863,98	20,1601612 5	17,4605077 4	0,007434983	20,1550620 3	0,006185802	20,1074913 1	0,012802049	19,7753836 1	0,018097727	18,6675678 8	0,010045561	19,39	1,10	0,01	0,01
50465,43	20,1526807 9	17,4677994 6	0,009872726	20,1540463 0,018705487	0,018705487	20,0971987 1	0,006736004	19,7741514 2	0,01774633	18,6643923 4	-0,00103477	19,39	1,10	0,01	0,01
52119,36	20,1540399 7	17,4593812 2	0,007797546	20,1544203 1	0,033478039	20,1070586 6	0,008714632	19,7809507 4	0,023394827	18,6709997 3	0,012618166	19,39	1,10	0,01	0,01
53827,50	20,1586629 6	17,4634868 3	0,002494364	20,1487282 7	0,004831141	20,1066575 1	0,004919956	19,7723337 5	0,006411151	18,6709569 8	- 0,000384744	19,39	1,10	0,00	0,00
55591,63	20,1565077 7	17,4616444 1	0,003215828	20,1507984 7	0,018588363	20,1043341 9	0,008064731	19,7749101 6	0,003823396	18,6666570 9	0,000250861	19,39	1,10	0,01	0,01
57413,57	20,1572870 1	17,4629438 8	0,004891835	20,1471636 5	- 0,003330805	20,1073679 8	0,005170808	19,7760724 2	0,006268354	18,6688180 3	0,000195969	19,39	1,10	0,00	0,00
59295,22	20,1605212 9	17,4645288 8	0,010273441	20,1513927 1	0,011394327	20,1119881 7	0,008853342	19,7772420 6	0,013177536	18,6677588 5	0,005422191	19,39	1,10	0,01	0,00
61238,54	20,1638825 2	17,4617144 7	0,010559391	20,1495969 3	0,010759209	20,1100837 8	0,013785548	19,7791883 9	0,013244962	18,6723583 8	0,011065182	19,39	1,10	0,01	0,00
63245,55	20,1606087 7	17,4636205 7	0,003478165	20,1495007 8	- 0,006811731	20,1090601 3	0,000759402	19,7749976 7	0,007617538	18,6750523 1	0,000144001	19,39	1,10	0,00	0,00
65318,34	20,1583232 20,1600134	17,4628238 17,4635218	0,003605535 0,00445739	20,1530260 20,1534234	0,00203348 0,011441972	20,1109375 20,1128893	0,005353747 0,009098165	19,7772996 19,7762207	0,006926695 0,004633212	18,6710031 18,6712882	- 0,003353467	19,39	1,10	0,00	0,00
67459,06	20,1600134 5	17,4635218 7	0,00445739	20,1534234 9	0,011441972	20,1128893 9	0,009098165	19,7762207 9	0,004633212	18,6712882 6	0,003353467	19,39	1,10	0,01	0,00
69669,94	20,1600134 5	17,4635218 7	0,00445739	20,1534234 9	0,011441972	20,1128893 9	0,009098165	19,7762207 9	0,004633212	18,6712882 6	0,003353467	19,39	1,10	0,01	0,00

71953,28	20,1613634 9	0,005082657	17,4737912 3	0,002961039	20,1559806 3	-0,00100241	20,1028705 9	0,00758248	19,7754010 1	0,003565489	18,6741405 5	0,003768602	19,39	1,10	0,00	0,00
74311,45	20,1607288 6	0,006169175	17,4652690 2	0,004627663	20,1483332 9	0,014330325	20,1079189 3	0,01067141	19,7729559 5	0,008166398	18,6706306 7	0,006147514	19,39	1,10	0,01	0,00
76746,91	20,1584721 4	0,015697965	17,4651023 5	0,014585811	20,1347187 6	0,007731753	20,0935833 6	0,034848202	19,7939327 5	0,003051481	18,6573895 9	0,009193244	19,38	1,10	0,01	0,01
79262,19	20,1527221 7	0,020990407	17,4631176 6	0,011628213	20,1373590 7	0,016962117	20,1042585 9	0,020842434	19,7746909 8	0,015884028	18,6672257 3	0,012732599	19,38	1,10	0,02	0,00
81859,90	20,1563139 4	0,017646052	17,4623225 6	0,014625187	20,1424871 3	0,014527877	20,1056570 7	0,017921232	19,7731604 8	0,017264057	18,6672565 3	0,013517356	19,38	1,10	0,02	0,00
84542,75	20,1547649 2	0,017882961	17,4577286 6	0,012269796	20,1394797 8	0,028849506	20,1026382 2	0,021120428	19,7692828 7	0,019287918	18,6670805 7	0,007659566	19,38	1,10	0,02	0,01
87313,52	20,1625623 7	0,006006858	17,4624260 9	0,008371112	20,1484732 9	0,010125882	20,1072109 9	0,010076045	19,7722928 7	0,008333548	18,6661527 3	0,00070004	19,39	1,10	0,01	0,00
90175,10	20,1558336 6	0,005580564	17,4624055 8	0,007758752	20,1470377 6	0,006209297	20,1041475 8	0,008717626	19,774343 9	0,008465561	18,6699592 9	0,004217475	19,39	1,10	0,01	0,00
93130,47	20,1575463 4	0,013272665	17,4642713 7	0,000644013	20,1586570 4	0,021203941	20,1057020 2	0,009335466	19,7748192 9	0,002777692	18,6680415 4	0,007126833	19,39	1,10	0,01	0,01
96182,70	20,1544141 8	0,007562702	17,4645576 5	0,005076451	20,1622344 1	0,009748498	20,0994898 8	0,011162458	19,7648673 8	0,006657617	18,6676153 8	0,005074395	19,39	1,10	0,00	0,01
99334,95	20,1584520 9	0,007840464	17,4655792 6	0,005520783	20,1491867 1	0,015058687	20,1048355 4	0,006724727	19,7690563 3	0,008701675	18,6673946 2	0,004982489	19,39	1,10	0,01	0,00
102590,52	20,1537252 7	0,016751923	17,4596853 4	0,015823117	20,1435429 6	0,020410849	20,1020631 9	0,019600485	19,7733966 6	0,018218445	18,6652188 6	0,016061806	19,38	1,10	0,02	0,00
105952,79	20,1546511 5	0,019001846	17,4634327 6	0,01446558	20,1365839 3	0,023269403	20,0957533 3	0,022688345	19,7735418 7	0,016767746	18,6581189 1	0,007354382	19,38	1,10	0,02	0,01
109425,25	20,1516822 7	0,017010851	17,4594482 3	0,016445389	20,1439246 9	0,017912887	20,1020985 2	0,020363437	19,7717527 4	0,020271633	18,6653721 1	0,015184739	19,38	1,10	0,02	0,00
113011,52	20,1566772 2	0,008737183	17,4600762 3	0,007103806	20,1487819 9	0,011656292	20,1048533 1	0,00880176	19,7708577 4	0,008616729	18,6675227	0,005643222	19,38	1,10	0,01	0,00
116715,32	20,1544982 8	0,006615728	17,4610497 1	0,008145329	20,1461822 5	0,007759181	20,1035481 1	0,010015875	19,7718815 6	0,008547485	18,66676	0,007147859	19,38	1,10	0,01	0,00
120540,50	20,1544272 6	0,008752477	17,4612802 4	0,007332422	20,1470783 5	0,009565093	20,1028146 6	0,007839526	19,7722608 2	0,009391878	18,6667316 9	0,00666013	19,38	1,10	0,01	0,00
124491,05	20,1544471 6	0,009903099	17,4601804 9	0,008433935	20,1477063 4	0,007323614	20,1027783 4	0,010818701	19,7714449 4	0,008743471	18,6660269 4	0,007272201	19,38	1,10	0,01	0,00
128571,08	20,1514291 3	0,008327584	17,4597209 5	0,00904308	20,1481267 6	0,008247356	20,1030400 8	0,009146254	19,7700027 8	0,01031493	18,6660602 8	0,007805434	19,38	1,10	0,01	0,00
132784,83	20,1545818 4	0,00804361	17,4593919 3	0,005842139	20,1431677 3	0,010475104	20,1035470 9	0,008957224	19,7712219 1	0,009795312	18,6667032 1	0,007330955	19,38	1,10	0,01	0,00
137136,67	20,153833 8	0,010030038	17,4684650 8	0,008972723	20,1548363 4	0,021856697	20,1015969 2	0,009391159	19,7675893 6	0,011585451	18,6685127 4	0,008181457	19,39	1,10	0,01	0,01
141631,14	20,1518849 6	0,001327883	17,4645789 9	0,006591688	20,1493516 3	0,002658303	20,1092163 8	0,011765495	19,7773284 6	0,013118018	18,6595789 7	0,01230241	19,39	1,10	0,01	0,01
146272,91	20,1526797 8	0,006336506	17,4576210 8	0,006388351	20,1357666 2	0,004327171	20,1007149 3	0,010638696	19,7712647 7	0,009987434	18,6630600 9	0,007618073	19,38	1,10	0,01	0,00
151066,81	20,1513498 2	0,021766321	17,4549286 5	0,016999404	20,1374171 4	0,017265238	20,0992542 8	0,020406651	19,7663012 2	0,020688301	18,6627448 4	0,018254982	19,38	1,10	0,02	0,00
156017,82	20,1499339 1	0,020715478	17,4556685 1	0,017495571	20,1393060 1	0,018790701	20,0987188 7	0,021046354	19,7666467 5	0,019431687	18,6619813 4	0,017398693	19,38	1,10	0,02	0,00
161131,09	20,1500980 2	0,021630131	17,4560477 3	0,018948919	20,140037 2	0,021815496	20,0983993 2	0,019846431	19,7658292 1	0,019712165	18,6611958	0,018544823	19,38	1,10	0,02	0,00

166411,94	20,1512324 2	17,4576876 3	0,007494797	20,1427114 9	0,007980806	20,1003961 1	0,009833537	19,7692726 9	0,010094857	18,6646006 1	0,00842537	19,38	1,10	0,01	0,00
171865,87	20,1508105 1	17,4574026 1	0,009217894	20,1417650 5	0,013695032	20,1010176 5	0,010842439	19,7702010 9	0,010487094	18,6637426 5	0,008744466	19,38	1,10	0,01	0,00
177498,54	20,1515608 2	17,4578315 1	0,009614481	20,1431144 1	0,010039425	20,101197 0,01081939		19,7685839 9	0,009813865	18,6630545 3	0,009330795	19,38	1,10	0,01	0,00
183315,82	20,1502208 8	17,4564496 6	0,009880093	20,1335261 6	0,014511025	20,0915676 1	0,013582865	19,7681294 9	0,011205658	18,6630875 1	0,008771163	19,38	1,10	0,01	0,00
189323,75	20,1468792 5	17,4593990 8	0,009842341	20,1345192 3	0,007601282	20,0904804 3	0,014223435	19,7702942 2	0,008096496	18,6643573 8	0,012804963	19,38	1,10	0,01	0,00
195528,58	20,1418408 6	17,4558968 6	0,009295226	20,1360640 5	0,016153089	20,0897886 7	0,014790462	19,7601368 7	0,014755247	18,6625681 7	0,009942619	19,37	1,10	0,01	0,00
201936,77	20,1430465 9	17,4533450 1	0,020616577	20,1372694 9	0,014354638	20,0927918 6	0,014135097	19,7628245 3	0,012937748	18,6551328 3	0,010574539	19,37	1,10	0,01	0,00
208554,97	20,1462970 6	17,4504812 9	0,014547053	20,1356865 7	0,015511658	20,0912238 7	0,013941121	19,7620297 9	0,013672772	18,6539887 9	0,010893118	19,37	1,10	0,01	0,00
215390,08	20,1435003 4	17,4507641 5	0,014005215	20,1335971 5	0,014443581	20,0928167 5	0,013714361	19,7618737 9	0,014486951	18,6542828 4	0,011440158	19,37	1,10	0,01	0,00
222449,20	20,1400927 4	17,4485469 8	0,012102069	20,1289463 2	0,015013476	20,0903855 0,017003103		19,7598910 9	0,016081019	18,6539984 2	0,014888507	19,37	1,10	0,02	0,00
229739,67	20,1406166 3	17,4483076 5	0,014137777	20,1299197 4	0,019541693	20,0904331 0,01575652		19,7592689 0,015770185		18,6559317 3	0,012826264	19,37	1,10	0,02	0,00
237269,08	20,1358611 4	17,4487174 1	0,01486091	20,1323512 4	0,016657676	20,0882712 2	0,014522836	19,7581584 7	0,012778452	18,6571342 1	0,013352257	19,37	1,10	0,01	0,00
245045,25	20,1329513 7	17,4471375 2	0,014278561	20,1309281 8	0,011057821	20,0912526 1	0,016818355	19,7558420 8	0,01461314	18,6524483 2	0,013231198	19,37	1,10	0,01	0,00
253076,28	20,1410773 9	17,4476138 9	0,015038136	20,1329053 8	0,014901138	20,0888149 1	0,017943471	19,7552728 0,016237737		18,6527468 4	0,013764827	19,37	1,10	0,02	0,00
261370,52	20,1406263 0,014235533	17,4469093 7	0,014712774	20,1340933 2	0,016674217	20,0886429 4	0,015759153	19,7563365 7	0,016947242	18,6539752 0,014254399		19,37	1,10	0,02	0,00
269936,58	20,139623 0,015491726	17,4472874 2	0,015317263	20,1383209 7	0,016754365	20,0871111 9	0,018077623	19,7578038 5	0,013749998	18,6525515 8	0,014661639	19,37	1,10	0,02	0,00
278783,39	20,1415058 5	17,4447339 2	0,016745106	20,1297062 2	0,014827373	20,0872425 1	0,01811518	19,7510384 9	0,013728857	18,6516165 5	0,014625033	19,37	1,10	0,02	0,00
287920,14	20,1381121 6	17,4468699 7	0,016590738	20,1306817 0,016646411		20,0874322 6	0,017458356	19,7547374 9	0,016169766	18,6519728 0,015406858		19,37	1,10	0,02	0,00
297356,34	20,1401039 8	17,4460072 4	0,015594654	20,1312984 0,015321293		20,0903478 0,017021076		19,7592300 2	0,016242165	18,6550179 8	0,015288594	19,37	1,10	0,02	0,00
307101,79	20,1417949 3	17,4453048 3	0,016764767	20,1315260 6	0,015088085	20,0902990 7	0,018311904	19,7583270 5	0,015845323	18,6543941 0,015636748		19,37	1,10	0,02	0,00
317166,64	20,1414903 4	17,4474366 9	0,015752413	20,1289989 4	0,023331141	20,0889737 4	0,019315322	19,7572150 1	0,01650055	18,6522183 1	0,015221392	19,37	1,10	0,02	0,00
327561,34	20,1401381 3	17,4461533 1	0,016506379	20,1300975 4	0,017423914	20,0872442 8	0,018297574	19,7583112 8	0,01838253	18,6542555 6	0,015892965	19,37	1,10	0,02	0,00
338296,73	20,1373756 9	17,4460912 4	0,015910892	20,1299073 0,020427069		20,0861649 6	0,019741992	19,7553092 1	0,018365537	18,6511937 8	0,017384381	19,37	1,10	0,02	0,00
349383,95	20,1374625 6	17,4445282 7	0,017144849	20,1280188 8	0,019504276	20,0860300 3	0,019596417	19,754523 0,019120531		18,6507268 9	0,017369657	19,37	1,10	0,02	0,00
360834,53	20,1360594 4	17,4448131 6	0,015450829	20,1266036 1	0,020191224	20,0871479 6	0,020758823	19,754969 0,018092239		18,6500479 9	0,017643231	19,37	1,10	0,02	0,00
372660,40	20,1362048 3	17,4451414 1	0,017023636	20,1278016 6	0,021565148	20,0857175 6	0,019927519	19,7551106 0,019622352		18,6497335 0,017862393		19,37	1,10	0,02	0,00

384873,84	20,1366011	0,020281481	17,4447682	0,017739701	20,1293855	0,024634428	20,0847744	0,021488689	19,7545027	0,021753306	18,6492953	0,018744629	19,37	1,10	0,02	0,00
	20,1350713		17,4420797		20,1292810		20,0853425		19,7521393		18,6500020		19,37	1,10	0,02	0,00
397487,56	8	0,021118789	17,4449509	0,01813116	20,1267904	0,020383602	20,0856132	0,02149354	19,7534489	0,021798663	18,6498957	0,017851463	19,37	1,10	0,02	0,00
410514,68	4	0,020663276	17,4439724	0,017339164	20,1275094	0,024053556	20,0856132	0,019570855	19,7534489	0,020955836	18,6498957	0,018845336	19,37	1,10	0,02	0,00
423968,75	1	0,021281244	17,4412678	0,018250454	20,1275094	0,021602584	20,0846478	0,021844311	19,7535072	0,021306074	18,6486499	0,019642663	19,37	1,10	0,02	0,00
437863,75	7	0,023955644	17,4419442	0,019027833	20,1297206	0,023162305	20,0863457	0,023003215	19,7533350	0,022598599	18,6483882	0,020863961	19,37	1,10	0,02	0,00
452214,15	5	0,030548603	17,4442503	0,01877749	20,1193989	0,029912271	20,0895227	0,023289533	19,7570042	0,021664626	18,6484218	0,021692707	19,37	1,10	0,02	0,00
467034,86	6	0,022754971	17,4443109	0,018853914	20,1288335	0,024047709	20,0843887	0,023723288	19,7543865	0,021494532	18,6493637	0,021074119	19,37	1,10	0,02	0,00
482341,29	3	0,023201952	17,4443109	0,019133923	20,1280375	0,02603078	20,0837263	0,024770403	19,7548221	0,023643404	18,6490710	0,02142222	19,37	1,10	0,02	0,00
498149,38	4	0,02384913	17,4431042	0,019005694	20,1257588	0,025846913	20,0834144	0,024171423	19,7522916	0,022242629	18,6483624	0,022397221	19,36	1,10	0,02	0,00
514475,56	2	0,023855998	17,4420292	0,021490939	20,1265979	0,026139697	20,0824231	0,025748476	19,7489576	0,024031714	18,6465791	0,023081752	19,36	1,10	0,02	0,00
531336,80	1	0,017920764	17,4405656	0,02233798	20,1241178	0,026495594	20,0809375	0,02622621	19,7511617	0,024774197	18,6473270	0,024841412	19,36	1,10	0,02	0,00
548750,65	4	0,021550918	17,4415831	0,022532905	20,1308625	0,025181126	20,0841759	0,029406118	19,7522746	0,024097788	18,6411233	0,025513757	19,36	1,10	0,02	0,00
566735,21	5	0,026321332	17,4408878	0,022745057	20,1247194	0,028536533	20,0807364	0,027001252	19,7495682	0,025833594	18,6460730	0,024144506	19,36	1,10	0,03	0,00
585309,19	1	0,027041356	17,4404662	0,023267993	20,1238461	0,027401051	20,0801898	0,027619548	19,7494245	0,026513961	18,6455159	0,02452978	19,36	1,10	0,03	0,00
604491,91	6	0,025985682	17,4416204	0,023489816	20,1249678	0,027930306	20,0805003	0,027402909	19,7500867	0,027550825	18,6466952	0,025325001	19,36	1,10	0,03	0,00
624303,32	9	0,026658143	17,4408968	0,024424444	20,1236955	0,028218041	20,0808881	0,028813054	19,7497561	0,02746965	18,6459956	0,024443385	19,36	1,10	0,03	0,00
644764,02	5	0,027171499	17,4404746	0,024413323	20,1233106	0,028332466	20,0798303	0,028803349	19,7493812	0,028060779	18,6454712	0,024695839	19,36	1,10	0,03	0,00
665895,29	5	0,029353994	17,4388391	0,02568015	20,1230791	0,029198646	20,0786435	0,029951596	19,7479268	0,029124125	18,6435155	0,026922245	19,36	1,10	0,03	0,00
687719,11	7	0,030292261	17,4385957	0,02620105	20,1213677	0,030713798	20,0782437	0,030986851	19,7473715	0,030146057	18,6433906	0,02774946	19,36	1,10	0,03	0,00
710258,18	8	0,030781346	17,4381970	0,02707251	20,1212912	0,03167328	20,0780927	0,032164959	19,7472984	0,030781766	18,6431422	0,028643365	19,36	1,10	0,03	0,00
733535,94	5	0,031724556	17,4375610	0,027445801	20,1197082	0,032927973	20,0768898	0,032736815	19,7461203	0,031535647	18,6421387	0,029310709	19,36	1,10	0,03	0,00
757576,59	9	0,032400588	17,4367401	0,028135091	20,1193698	0,033045572	20,0758967	0,032982586	19,7452940	0,032414361	18,6413485	0,029719906	19,36	1,10	0,03	0,00
782405,14	4	0,033517244	17,4362249	0,028712328	20,1180285	0,033729762	20,0753412	0,033389287	19,7445288	0,03269962	18,6407134	0,030186935	19,36	1,10	0,03	0,00
808047,41	9	0,034739979	17,4365865	0,029776554	20,1164230	0,03513528	20,0758040	0,034255919	19,7450937	0,032440328	18,6395261	0,031500902	19,36	1,10	0,03	0,00
834530,08	6	0,034848565	17,4352205	0,029905268	20,1169210	0,035270809	20,0745350	0,035321187	19,7435372	0,033843188	18,6393704	0,031701619	19,36	1,10	0,03	0,00
861880,68	3	0,035664448	17,4346532	0,030883397	20,1164794	0,035804493	20,0736529	0,036373482	19,7430936	0,034926126	18,6389680	0,032368252	19,36	1,10	0,03	0,00

890127,65	20,1242823 3	0,036723102	17,4344439	0,031797426	20,1161912 8	0,037258822	20,0729939 4	0,037319666	19,7425313 6	0,036166304	18,6386784 3	0,033640524	19,35	1,10	0,04	0,00
919300,39	20,1247852 6	0,037513082	17,4343702 2	0,032401919	20,1165053 3	0,038028029	20,0729404 6	0,038298887	19,7424690 9	0,03661155	18,6387050 4	0,034155533	19,35	1,10	0,04	0,00
949429,22	20,1238698 8	0,038426681	17,4340847	0,033211968	20,1153156 7	0,039026584	20,0722459 9	0,03900986	19,7420937 8	0,037540331	18,6380967 8	0,035189074	19,35	1,10	0,04	0,00
980545,48	20,1230328 5	0,038621839	17,4333868 9	0,033608463	20,1145884 7	0,03915368	20,0714944 2	0,03937777	19,7410618 4	0,037987972	18,6373432 5	0,035499932	19,35	1,10	0,04	0,00
1012681,54	20,1440475 8	0,002899975	17,4514353 7	0,00244729	20,1362640 5	0,002889247	20,0925683 2	0,003720236	19,7623874 8	0,003541205	18,6578018 2	0,001313349	19,37	1,10	0,00	0,00
1045870,81	20,1449645 2	0,003620173	17,4525665 6	0,003534426	20,1372111 9	0,004198358	20,0940194 7	0,003527486	19,7631096 6	0,003206502	18,6592482	0,002978633	19,38	1,10	0,00	0,00
1080147,82	20,1454916 2	0,004236754	17,4516450 6	0,004279858	20,1362166 8	0,004522916	20,0936056 5	0,004878947	19,7626964 4	0,004571608	18,6582452 4	0,0039084	19,37	1,10	0,00	0,00
1115548,21	20,1445027 7	0,004200607	17,4524662 1	0,004550477	20,1369217 5	0,005286572	20,0941406 9	0,005078858	19,7629532 2	0,004654225	18,6579912 4	0,003791077	19,37	1,10	0,00	0,00
1152108,80	20,1431268 4	0,000489793	17,4486313 4	-0,00074207	20,1431337 5	0,010601774	20,0942706 1	0,00525878	19,7632057 2	0,004079748	18,6573614 7	0,004638467	19,37	1,10	0,00	0,00
1189867,61	20,1452109 2	0,005313797	17,4527869 2	0,003182083	20,1390471 9	0,0070534	20,0924799 9	0,00623197	19,7627910 7	0,005133532	18,6580914 9	0,003779861	19,38	1,10	0,01	0,00
1228863,92	20,1444533 2	0,005137669	17,4515130 9	0,004503234	20,1362899 3	0,005424885	20,0933343 1	0,005021347	19,7619307 1	0,00498308	18,6579957	0,003934757	19,37	1,10	0,00	0,00
1269138,28	20,1443813 7	0,005059134	17,4521223 8	0,004863346	20,1363273 6	0,005527563	20,0929113 5	0,005483459	19,7621434 5	0,004706111	18,6574059 1	0,004152535	19,37	1,10	0,00	0,00
1310732,58	20,1442946 2	0,004589422	17,4518000 6	0,003561212	20,1361216 2	0,005021036	20,0928621 6	0,007778399	19,7624171 5	0,005697885	18,6566410 5	0,00295148	19,37	1,10	0,00	0,00
1353690,07	20,1438168 7	0,004337701	17,4515148 3	0,004888753	20,1350759 9	0,004587188	20,0922534 9	0,005612382	19,7614349 5	0,004815342	18,6570183 9	0,00406457	19,37	1,10	0,00	0,00
1398055,44	20,1432659 3	0,005068493	17,4501291	0,004115641	20,1353645	0,005234437	20,0923410 1	0,005364621	19,7615437 5	0,004646449	18,6568908 3	0,004308881	19,37	1,10	0,00	0,00
1443874,82	20,1434527 2	0,004874302	17,4504606 9	0,004475665	20,1270487 2	0,007750281	20,0833446 9	0,007832237	19,7612837 1	0,004855052	18,6569464 9	0,003627221	19,37	1,10	0,01	0,00
1491195,88	20,1342205 8	0,007406697	17,4501219 9	0,004172039	20,1265735 6	0,008185094	20,0833290 6	0,008525847	19,7526505 2	0,006727262	18,6563004 3	0,003669648	19,37	1,10	0,01	0,00
1491195,88	20,1342205 8	0,007406697	17,4501219 9	0,004172039	20,1265735 6	0,008185094	20,0833290 6	0,008525847	19,7526505 2	0,006727262	18,6563004 3	0,003669648	19,37	1,10	0,01	0,00
1540067,81	20,1342751 7	0,007911854	17,4506923 7	0,003861219	20,1263424 8	0,007736844	20,0827451 5	0,007919836	19,752491	0,006865188	18,6561970 6	0,003611809	19,37	1,10	0,01	0,00
1590541,46	20,1335776 6	0,006878135	17,4430417 8	0,005818025	20,1266577 6	0,008055637	20,0828845 1	0,008037703	19,7526535 4	0,007621057	18,6485793 6	0,006256219	19,36	1,10	0,01	0,00
1642669,31	20,1340383 9	0,007061239	17,4429649 9	0,00631669	20,1267794 6	0,007117428	20,0830266 7	0,007803155	19,7523967 7	0,007121441	18,6485916 9	0,006262309	19,36	1,10	0,01	0,00
1696505,58	20,1342264 7	0,007333358	17,4438873 7	0,005979939	20,1260120 9	0,007477085	20,0823716 1	0,008430701	19,7519663 8	0,007838999	18,6483976 2	0,006277018	19,36	1,10	0,01	0,00
1752106,27	20,1336985 5	0,007308399	17,4421896 1	0,006862671	20,1258233 6	0,007369419	20,0825284 9	0,007340623	19,7525268 9	0,007322852	18,6481250 2	0,006567529	19,36	1,10	0,01	0,00
1809529,19	20,1330414 1	0,00773384	17,4421558 6	0,006339292	20,1258695 9	0,007255152	20,0824981 2	0,008335358	19,7517428 4	0,007533339	18,6478277 1	0,006024548	19,36	1,10	0,01	0,00
1868834,07	20,1334970 7	0,007672717	17,4427268 1	0,006630816	20,1256402 2	0,008038409	20,0824311 5	0,008035721	19,7515670 2	0,007186632	18,6478193 9	0,00688671	19,36	1,10	0,01	0,00
1930082,59	20,1332246 3	0,007478543	17,4426035 6	0,006948312	20,1253021 3	0,007976054	20,0822278 6	0,007961457	19,7515358 3	0,007315682	18,6477525	0,006422999	19,36	1,10	0,01	0,00

1993338,45	20,1333841 1	0,00803513	17,4421739	0,006608763	20,1252147 5	0,007801203	20,0819481 2	0,008263766	19,7511435 7	0,007738937	18,6472485 8	0,00674059	19,36	1,10	0,01	0,00
2058667,43	20,1331952 4	0,007683757	17,4420174 8	0,006545258	20,1251918 5	0,008108223	20,0816833 6	0,008170733	19,7514238 4	0,00752915	18,6469362 5	0,006852432	19,36	1,10	0,01	0,00
2126137,48	20,1328872 2	0,008083004	17,4415836 6	0,006901964	20,1250439 9	0,008559406	20,0817162 4	0,009137892	19,7508908 5	0,007360015	18,647282	0,006688966	19,36	1,10	0,01	0,00
2195818,77	20,1325834 8	0,00926331	17,4420428 5	0,006954221	20,1242505 7	0,008474476	20,0814080 3	0,008140305	19,7506467 2	0,007699048	18,6471788 7	0,006700558	19,36	1,10	0,01	0,00
2267783,77	20,1322828 4	0,007718714	17,4415956 1	0,006902546	20,1244485 8	0,008339264	20,0812361 9	0,008879854	19,7510138 8	0,00790939	18,6470985 8	0,007082338	19,36	1,10	0,01	0,00
2342107,33	20,1323424 3	0,00867685	17,4414659 8	0,006973412	20,1248895 1	0,008389055	20,0812458 7	0,008911026	19,7507382 7	0,007386957	18,6467169 7	0,007141338	19,36	1,10	0,01	0,00
2418866,74	20,1324846 4	0,008446467	17,4413872 6	0,007104485	20,1240191 6	0,008643658	20,0807833 2	0,008707992	19,7506164 7	0,00832544	18,6469008 9	0,007192522	19,36	1,10	0,01	0,00
2498141,84	20,1322264 20,1323737	0,008457491	17,4413636 1	0,006786065	20,1240227 1	0,008609678	20,0809967 1	0,008782485	19,7503560 9	0,008307516	18,6466159 2	0,007013937	19,36	1,10	0,01	0,00
2580015,07	20,1323737 8	0,008361229	17,4414168 6	0,007156626	20,1240453 7	0,008528461	20,0809356 8	0,008705311	19,7503658 5	0,008269785	18,6463268 1	0,007203218	19,36	1,10	0,01	0,00
2664571,59	20,1319407 4	0,008453161	17,4411309 9	0,006841853	20,1242128 5	0,008139468	20,0807169 6	0,008781778	19,7507591 0,007707684	0,007707684	18,6462491 9	0,007250223	19,36	1,10	0,01	0,00
2751899,33	20,1319184 8	0,007877772	17,4411643 1	0,006585565	20,1241533 0,008326845	0,008326845	20,0806615 8	0,008596177	19,7505274 0,007756118	0,007756118	18,6463014 9	0,007230302	19,36	1,10	0,01	0,00
2842089,13	20,1318001 5	0,007327199	17,4412982 6	0,006828441	20,1240218 4	0,007650785	20,0807306 2	0,007995469	19,7505790 5	0,007548352	18,6461256 8	0,0064858	19,36	1,10	0,01	0,00
2935234,77	20,1317449 9	0,007282523	17,4408802 5	0,006225038	20,1241684 8	0,007516182	20,0807685 0,00783847	0,00783847	19,7508366 9	0,00743567	18,6465316 8	0,006373335	19,36	1,10	0,01	0,00
3031433,13	20,1320010 2	0,007524523	17,4411487 0,006140234	0,006140234	20,1239255 9	0,007403772	20,0807121 3	0,007889381	19,7503214 4	0,006858693	18,6461768 1	0,00625956	19,36	1,10	0,01	0,00
3130784,27	20,1316039 2	0,006826044	17,4411238 7	0,006355879	20,1236113 3	0,006951075	20,0803256 3	0,007344957	19,7503319 1	0,007506208	18,6465249 9	0,005322455	19,36	1,10	0,01	0,00
3233391,51	20,1315035 2	0,006571808	17,4406648 1	0,00594547	20,1238263 4	0,007495318	20,0803778 0,007482141	0,007482141	19,7499241 5	0,006858722	18,6457657 8	0,006178133	19,36	1,10	0,01	0,00
3339361,56	20,1315483 1	0,006864388	17,4408269 7	0,005889519	20,1237272 9	0,007172578	20,0801174 1	0,007362295	19,7502173 9	0,006834977	18,6458097 9	0,005964414	19,36	1,10	0,01	0,00
3448804,63	20,1314102 4	0,006499399	17,4405567 3	0,005889014	20,1237431 0,006841919	0,006841919	20,0801817 6	0,007173994	19,7498747 8	0,006384728	18,6458351 0,005882679	0,005882679	19,36	1,10	0,01	0,00
3561834,56	20,1314977 2	0,006685104	17,4409808 3	0,00547768	20,1239307 0,007076704	0,007076704	20,0802510 2	0,007350054	19,7498164 6	0,0065541	18,6457548 2	0,005996496	19,36	1,10	0,01	0,00
3678568,88	20,1312688 1	0,006595213	17,4412492 7	0,005392599	20,1239095 7	0,00678806	20,0802865 5	0,007178055	19,7499780 3	0,006669309	18,6458839 3	0,005694097	19,36	1,10	0,01	0,00
3799129,02	20,1314722 7	0,006469577	17,4407663 0,006071837	0,006071837	20,1240072 5	0,006723569	20,0800954 0,007077359	0,007077359	19,7499872 2	0,006416645	18,6460981 7	0,005868104	19,36	1,10	0,01	0,00
3923640,36	20,1314199 20,1319337	0,006630898	17,4407376 5	0,005651453	20,1239143 2	0,006831367	20,0805961 0,006922236	0,006922236	19,7504578 7	0,006553689	18,6461540 1	0,005849771	19,36	1,10	0,01	0,00
4052232,38	20,1319337 2	0,006513292	17,4411208 8	0,00586011	20,1242717 0,006798072	0,006798072	20,0808521 8	0,007226966	19,7507191 3	0,006338296	18,6462529 4	0,005603207	19,36	1,10	0,01	0,00
4185038,84	20,1320878 4	0,006415351	17,4410886 5	0,005585821	20,1245758 4	0,006682201	20,0808238 0,006931771	0,006931771	19,7507326 3	0,006024797	18,6464340 2	0,005461743	19,36	1,10	0,01	0,00
4322197,85	20,1323169 8	0,00618204	17,4417417 6	0,005515869	20,1248259 8	0,006085582	20,0811989 3	0,006459939	19,7511734 1	0,006109638	18,6468161 1	0,005225555	19,36	1,10	0,01	0,00
4463852,06	20,1326443 3	0,005898823	17,4423891 3	0,004721904	20,1253097 5	0,005939404	20,0815788 1	0,006305831	19,7517987 2	0,005671257	18,6471331 7	0,005051551	19,36	1,10	0,01	0,00

4610148,80	20,1328124 5	0,005537171	17,4427144	0,00483257	20,1256178 9	0,005430669	20,0819460 1	0,005805397	19,7519325 1	0,00520912	18,6472192 5	0,004746462	19,36	1,10	0,01	0,00
4761240,21	20,1329373 2	0,004632076	17,4424909	0,004282171	20,1256988 3	0,004920673	20,0821242 6	0,005226085	19,7520634 7	0,004747656	18,6475347 5	0,004276265	19,36	1,10	0,00	0,00
4917283,44	20,1329191 5	0,004127636	17,4427317 5	0,003338325	20,1254811 3	0,004069373	20,0821570 2	0,004583906	19,7520469 7	0,003955734	18,6474806 7	0,003635973	19,36	1,10	0,00	0,00
5078440,78	20,1326307 4	0,003942946	17,4422879 5	0,003412587	20,1252487 6	0,003852014	20,0819267 2	0,004431794	19,7517760 3	0,003825782	18,6473541	0,003503982	19,36	1,10	0,00	0,00
5244879,84	20,1331476 9	0,00443149	17,4426334 3	0,003783761	20,1255825 7	0,004576494	20,0821860 7	0,004790604	19,7521435 5	0,004279422	18,6479748 3	0,004232692	19,36	1,10	0,00	0,00
5416773,71	20,1339563 7	0,005491084	17,4434874 1	0,004531164	20,1266761 3	0,005488672	20,0829193 7	0,005830686	19,7530458 6	0,005150023	18,6484219 5	0,00502885	19,36	1,10	0,01	0,00
5594301,17	20,1348225 7	0,006131952	17,4440938 7	0,005318619	20,1275536 7	0,006081643	20,0835431 5	0,006325217	19,7534830 1	0,005888049	18,6489680 9	0,005474541	19,37	1,10	0,01	0,00
5777646,85	20,1347357 5	0,005881586	17,4443811 7	0,005561243	20,1276464 3	0,006300812	20,0838904 9	0,00661788	19,7537975 5	0,006104271	18,6491089 9	0,005655212	19,37	1,10	0,01	0,00
5967001,44	20,1349454 7	0,006187287	17,4442195 2	0,005424579	20,1278522 6	0,006353311	20,0841523 9	0,006773493	19,7541091 1	0,005884588	18,6493049 9	0,005845066	19,37	1,10	0,01	0,00
6162561,87	20,1352163 9	0,006282452	17,4445510 5	0,005350817	20,1281538 5	0,006135443	20,0844306 9	0,006676388	19,7544454 9	0,006252719	18,6497908 5	0,00572521	19,37	1,10	0,01	0,00
6364531,53	20,1356298 6	0,006268259	17,4449929	0,005504307	20,1283146 6	0,006159312	20,0849104 3	0,006772596	19,7548168 2	0,006046817	18,6501725 4	0,005769248	19,37	1,10	0,01	0,00
6573120,48	20,1360092 1	0,006310953	17,4450901 2	0,005449171	20,1288264 9	0,006295438	20,0850861 8	0,006945988	19,7547486 1	0,006118074	18,6504767 7	0,006291162	19,37	1,10	0,01	0,00
6788545,65	20,1360260 6	0,006236401	17,4451696 4	0,005320993	20,1290502 9	0,006040397	20,0852702 3	0,006389137	19,7548670 4	0,005647821	18,6505857 3	0,005797871	19,37	1,10	0,01	0,00
7011031,08	20,1361573 8	0,005690422	17,4454201 2	0,005123573	20,1290166 8	0,005587698	20,0851049	0,005788607	19,7548245 1	0,005131481	18,6503852	0,005265682	19,37	1,10	0,01	0,00
7240808,18	20,1362736 7	0,004751567	17,4457395 1	0,004569017	20,1292718 4	0,005006689	20,0856155 5	0,005356079	19,7552113 6	0,004748848	18,6507684 7	0,004473123	19,37	1,10	0,00	0,00
7478115,91	20,1367451 9	0,004024008	17,4460298 5	0,004024444	20,1298421 3	0,004284127	20,0860858	0,004646691	19,7558810 4	0,004075572	18,6513126 8	0,004219125	19,37	1,10	0,00	0,00
7723201,08	20,1372171 8	0,003686006	17,4465564 6	0,00284697	20,1308930 7	0,003563361	20,0872240 4	0,003547794	19,7569025 6	0,003075351	18,6524297 8	0,003440136	19,37	1,10	0,00	0,00
7976318,59	20,1389532 1	0,002793233	17,4478221 3	0,002738309	20,1317371 2	0,002419894	20,0883027 3	0,003472655	19,7580385 4	0,002967382	18,6533021 3	0,003152751	19,37	1,10	0,00	0,00
8237731,69	20,1401281 3	0,002163143	17,4487958 1	0,002414556	20,1329710 2	0,001711684	20,0893802 7	0,002805871	19,7591561 3	0,002223662	18,6543670 3	0,002627896	19,37	1,10	0,00	0,00
8507712,24	20,1412605 6	0,001437778	17,4499474 1	0,001516787	20,1343390 7	0,00108027	20,0907353 6	0,001606682	19,7603040 4	0,001169855	18,6556602 2	0,001792792	19,37	1,10	0,00	0,00
8786541,05	20,142769 2	0,000971842	17,4511690 2	0,001307499	20,1357686 8	0,000450769	20,0921139 2	0,000642666	19,7618671 2	0,000412955	18,6567997 4	0,001024406	19,37	1,10	0,00	0,00
9074508,09	20,1442135 5	-3,89E-05	17,4524619 6	0,000886179	20,1374029 1	-7,94E-05	20,0937922 9	-6,58E-06	19,7632220 9	0,000139888	18,6581706 8	0,000460567	19,37	1,10	0,00	0,00
9371912,87	20,1460830 1	-0,00113968	17,4539546 -	9,12E-05	20,1391448 7	-	20,0954740 9	-	19,7651271 5	-	18,6597593 5	-	19,38	1,10	0,00	0,00
9679064,69	20,1483114 8	0,001424436	17,4560348 7	0,000469152	20,1415582 6	0,001205406	20,0977859 4	0,000901959	19,7673107 1	0,001058467	18,6616909 7	0,000366462	19,38	1,10	0,00	0,00
9996282,99	20,1507701 6	0,000635125	17,4583502 2	0,000112494	20,1444043 9	0,000905059	20,1005614 3	0,000163332	19,7698339 8	0,000139077	18,6643149 6	0,000247283	19,38	1,10	0,00	0,00
10323897,7 0	20,1670823 3	0,047905311	17,4723133 3	0,041326906	20,1606296 1	0,047564407	20,1165092 7	0,048196867	19,7861430 3	0,046986187	18,6796947 9	0,044316137	19,40	1,10	0,05	0,00

10662249,5 3	20,1699161 2		17,4742967 6	0,043313482	20,1632794 8	0,049776388	20,1196350 3	0,050831018	19,7888109 9	0,048602357	18,6816386 9	0,046249372	19,40	1,10	0,05	0,00
11011690,3 9	20,1714057 3	0,051803404	17,4763616 9	0,044932839	20,1654482 3	0,051701176	20,1221126 4	0,052602713	19,7910330 5	0,050266233	18,6840493 4	0,047641558	19,40	1,10	0,05	0,00
11372583,7 1	20,1740894 8	0,053360415	17,4784588 5	0,045900855	20,1678552 7	0,053581838	20,1237008 8	0,054500076	19,7928122 4	0,052262577	18,6862709 8	0,048702343	19,40	1,10	0,05	0,00
11745304,8 2	20,1771445 7	0,055117178	17,4810869 6	0,047571165	20,1697549 8	0,055240204	20,1265471 8	0,055360598	19,7953384 6	0,053887989	18,6877256 1	0,049885666	19,41	1,10	0,05	0,00
12130241,3 6	20,1795721 8	0,055853745	17,4830914 4	0,047626567	20,1726957 3	0,056131049	20,1286271 1	0,057281663	19,7980202 8	0,054752479	18,6898500 8	0,050944928	19,41	1,10	0,05	0,00
12527793,6 7	20,1818187 9	0,057319768	17,4848940 4	0,049064348	20,1670398 7	0,06011223	20,1224058 9	0,060837179	19,7998397 2	0,056622204	18,6924697 2	0,05328212	19,41	1,10	0,06	0,00
12938375,2 3	20,1745511 1	0,062641014	17,4865739 2	0,050294448	20,1693740 6	0,061179533	20,1260365 9	0,061916399	19,8020542 7	0,057644707	18,6945316 7	0,054024223	19,41	1,10	0,06	0,00
13362413,0 4	20,1786433 3	0,06268774	17,4890814 9	0,051831085	20,1726776 9	0,062973377	20,1288815 2	0,063415816	19,7973347 1	0,062146182	18,6970180 9	0,055836812	19,41	1,10	0,06	0,00
13800348,1 3	20,1830848 5	0,064514242	17,4929583 9	0,053131462	20,1765801 4	0,064244407	20,1327731 9	0,064750444	19,8016530 1	0,06296388	18,6933330 4	0,058707223	19,41	1,10	0,06	0,00
14252635,9 4	20,1859771 6	0,064990878	17,4882964 2	0,056225104	20,1795949 4	0,065309473	20,1362811 3	0,065044742	19,8046004 3	0,064104419	18,6961912 1	0,060432641	19,42	1,10	0,06	0,00
14719746,8 8	20,1871192 2	0,065611096	17,4894281 8	0,056736568	20,1806153 7	0,065895364	20,1370062 6	0,066334499	19,8058896 8	0,064524843	18,6967105 8	0,060943175	19,42	1,10	0,06	0,00
15202166,7 5	20,1890260 1	0,06687754	17,4904194 5	0,05764744	20,1818472 8	0,065849071	20,1372009 8	0,066909156	19,8072449 8	0,065306344	18,6984316 4	0,06151265	19,42	1,10	0,06	0,00
15700397,2 8	20,1935518 9	0,066512419	17,4952484 9	0,056920617	20,1878251 7	0,065909554	20,1440469 2	0,066700301	19,8119937 9	0,065300639	18,7033345 7	0,06099733	19,42	1,10	0,06	0,00
16214956,6 5	20,2000221 8	0,06626395	17,5006811 2	0,056594359	20,1944373 6	0,065900245	20,1506967 9	0,066087954	19,8190037 8	0,065037864	18,7096603 5	0,061204061	19,43	1,10	0,06	0,00
16746380,0 1	20,2054533 8	0,066526257	17,5051053 8	0,057143867	20,1997899 2	0,065721693	20,1559169 2	0,066723581	19,8253408 3	0,06484986	18,7145896 6	0,061078993	19,43	1,10	0,06	0,00
17295220,0 5	20,2120037 7	0,066146574	17,5104532 2	0,056641907	20,2057955 7	0,065531234	20,1625322 2	0,066503918	19,8314793 8	0,063516125	18,7203977 7	0,061083355	19,44	1,10	0,06	0,00
17862047,5 8	20,2206824 9	0,065071097	17,5184013 7	0,055801667	20,2145261 7	0,06458441	20,1712067 6	0,064760364	19,8399818 3	0,062734922	18,7281276 7	0,059439828	19,45	1,10	0,06	0,00
18447452,1 2	20,2296215 2	0,065019351	17,5264484 3	0,056301269	20,2248514 5	0,064488046	20,1798964 2	0,064575369	19,8483117 5	0,063223663	18,7364862 6	0,059577545	19,46	1,11	0,06	0,00
19052042,5 1	20,2387062 2	0,066258409	17,5351178 6	0,056809915	20,2339180 7	0,065769985	20,1893354 5	0,066416875	19,8579207 6	0,064330519	18,7450133 9	0,060729051	19,47	1,11	0,06	0,00
19676447,5 3	20,2497512 9	0,06655055	17,5438626 1	0,057354648	20,2446248 1	0,066268709	20,201001 7	0,067181512	19,8689504 1	0,064984442	18,7552065 4	0,061569403	19,48	1,11	0,06	0,00
20321316,5 9	20,2619273 6	0,068176649	17,5536203 9	0,058481191	20,2564157 5	0,06789634	20,2128566 7	0,068905205	19,8798319 1	0,066139273	18,7659258 5	0,06329875	19,49	1,11	0,07	0,00
20987320,3 6	20,2741684 1	0,070444799	17,5649845 4	0,060751857	20,2688473 6	0,070453962	20,2248429 6	0,071435598	19,8931165 1	0,069116648	18,7776367 5	0,065440421	19,50	1,11	0,07	0,00
21675151,5 0	20,2876999 6	0,074069651	17,5768713 1	0,063487328	20,2817615 9	0,073676857	20,2392185 2	0,074803995	19,9065107 3	0,072153913	18,7896357 1	0,068448364	19,51	1,11	0,07	0,00
22385525,3 9	20,3014376 5	0,077990991	17,5891028 3	0,067037706	20,2960174 2	0,077756835	20,2521063 5	0,07859526	19,9208969 1	0,07664231	18,8028555 1	0,072524572	19,53	1,11	0,08	0,00
23119180,8 2	20,3164064 6	0,082614557	17,6017694 4	0,071359026	20,3112070 9	0,082331689	20,2675576 9	0,082770954	19,9350135 4	0,081410894	18,8164658 2	0,076598563	19,54	1,11	0,08	0,00
23876880,8 2	20,3302129 4	0,087670845	17,6140123 6	0,075797461	20,3254204 3	0,087412969	20,2809167 3	0,0879164	19,9479502 3	0,085885593	18,8290609 2	0,081504638	19,55	1,11	0,08	0,00

24659413,4 2	20,3438447 8		17,6258712 5	0,081935393	20,3389403 9	0,09442073	20,2946171 2	0,094987741	19,9623775 1	0,092169807	18,8419004 3	0,088880054	19,57	1,11	0,09	0,01
25467592,4 7	20,3585037 6	0,100592854	17,6388082 8	0,087593814	20,3544606 6	0,100811645	20,3098632 8	0,101498982	19,9771993 2	0,099058357	18,8551895 9	0,095232151	19,58	1,11	0,10	0,01
26302258,4 9	20,3753651 2	0,104361122	17,6532693 7	0,090356938	20,3709038 4	0,103887202	20,3273432 3	0,105117542	19,9944196 7	0,102970189	18,8712026	0,098476745	19,60	1,11	0,10	0,01
27164279,5 8	20,3916924 5	0,110780556	17,6669418 1	0,096022287	20,3874075 3	0,110396818	20,3433234 4	0,111146472	20,0107532 9	0,10915845	18,8861534 7	0,104334681	19,61	1,11	0,11	0,01
28054552,2 4	20,4085527 2	0,116617977	17,6819835	0,100966678	20,4041296 4	0,115979822	20,3602408	0,116760623	20,0268493 8	0,114481895	18,9016027 5	0,109568085	19,63	1,12	0,11	0,01
28974002,3 9	20,4250217 5	0,121631116	17,6963958 6	0,105514019	20,4209481 2	0,121189245	20,3770284 6	0,122108711	20,0439566 8	0,119469944	18,9171206 5	0,114556921	19,65	1,12	0,12	0,01
29923586,2 7	20,4424309 2	0,125813826	17,7119747 3	0,109468076	20,4394556 6	0,124939251	20,3948930 2	0,125554963	20,0613092 8	0,123513922	18,9333928 8	0,118799864	19,66	1,12	0,12	0,01
30904291,5 0	20,4638591 1	0,1305452	17,7308868 5	0,113805334	20,4605797 1	0,12990177	20,4167473 9	0,130343781	20,0828599 2	0,128122244	18,9534677 4	0,123483975	19,68	1,12	0,13	0,01
31917138,0 1	20,4867536 1	0,134768687	17,7506354	0,117333383	20,4835011 8	0,133972841	20,4392113 6	0,135199461	20,1058049	0,13217724	18,9738913	0,127505615	19,71	1,12	0,13	0,01
32963179,2 0	20,5108694 9	0,139522045	17,7715389 1	0,121635702	20,5077807 1	0,138618505	20,4638268 1	0,139368902	20,1296956 4	0,136620216	18,9963101 9	0,131405132	19,73	1,12	0,13	0,01
34043502,9 8	20,5366763 4	0,143952114	17,7942896 6	0,125277507	20,5338929 4	0,143044841	20,4890527 3	0,144234085	20,1558605 6	0,141702909	19,0207900 6	0,136347625	19,76	1,12	0,14	0,01
35159232,9 2	20,5664332 0,147206377		17,8206908 5	0,128271302	20,5637568 7	0,145640863	20,5184782 4	0,147246377	20,1857862 2	0,144262361	19,0485724 3	0,13893146	19,78	1,12	0,14	0,01
36311529,4 1	20,5946327 9	0,152181941	17,8457356 1	0,13279732	20,5923592	0,151071776	20,5476693 6	0,152284892	20,2139364 9	0,148994331	19,0746547 4	0,143266017	19,81	1,13	0,15	0,01
37501590,8 6	20,6270481 3	0,15697115	17,8744524 5	0,137271445	20,6256372 7	0,156018816	20,5803266 5	0,157062333	20,2469380 1	0,153922624	19,1052009 8	0,147689763	19,84	1,13	0,15	0,01
38730654,9 7	20,6622757 3	0,162300635	17,9053007 3	0,141692001	20,6610206 2	0,161526888	20,6166912 5	0,162245306	20,2822424 9	0,159184417	19,1374097 9	0,152851746	19,88	1,13	0,16	0,01
40000000,0 0	20,7004177 3	0,1654657	17,9392241 5	0,14373877	20,6976191 6	0,164914348	20,6543433 9	0,164998894	20,3202233 4	0,162885469	19,1724469 7	0,155283017	19,91	1,13	0,16	0,01

APÊNDICE C

**ESTE APÊNDICE APRESENTA PARTE DAS INSTRUÇÕES PARA
CUMPRIMENTO COM OS REQUISITOS DE EFEITOS DIRETOS DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, CONFORME CONSTA NA
ARP 5412- REV. A**

SAE ARP5412 Revision A

5.6 Lightning Strike Zones:

Due to the lightning attachment process, not all locations on an aircraft are exposed to the same lightning environment components. To optimize lightning protection, the aircraft will, therefore, be divided into different lightning strike zones. These zones will then be protected against their applicable components of the lightning environment.

In general an aircraft can be divided into the following zones:

- Zone 1A: First Return Stroke Zone
- Zone 1B: First Return Stroke Zone with Long Hang-On
- Zone 1C: Transition Zone for First Return Stroke
- Zone 2A: Swept Stroke Zone
- Zone 2B: Swept Stroke Zone with Long Hang-On
- Zone 3: Current Conduction Zone

Zone definitions and methods of locating them on particular aircraft are given in ARP5414.

6. IDEALIZED STANDARD LIGHTNING ENVIRONMENT:

6.1 General:

The environment waveforms presented in this chapter represent idealized environments which are to be applied to the aircraft for purposes of analysis and testing. The waveforms are not intended to replicate a specific lightning event, but they are intended to be composite waveforms whose effects upon aircraft are those expected from natural lightning.

The standard lightning environment is comprised of individual voltage waveforms and current waveform components which represent the important characteristics of the natural lightning flashes.

In the waveform descriptions that follow, parameters of particular importance to the effects (direct or indirect) to be considered, are included whereas other parameters are omitted. For example, for direct effects evaluations, peak current amplitude, action integral and time duration are of primary importance, whereas for indirect effects evaluations, rates of current rise and decay as well as peak amplitude are important.

Not all surfaces of an aircraft need to be designed to survive the same lightning threat. The applicable design parameters and test waveforms for each zone are presented in 6.4.

This section presents waveforms and their related parameters to be applied for aircraft structures and equipment lightning protection design and verification purposes.

SAE ARP5412 Revision A

6.2 Idealized Voltage Waveforms:

The idealized voltage waveform represents that portion of the electric field important for assessment of lightning attachment to aircraft structures.

The basic voltage waveform to which vehicles are subjected for analysis or test is one that represents an electric field which increases until breakdown occurs either by puncture of solid insulation such as the fiberglass skin of a radome, or flashover through the air or across an insulating surface. The path that the flashover takes, either puncture or surface flashover, depends in part on the waveshape of the electric fields.

It is sometimes necessary to determine the critical voltage amplitude at which breakdown occurs. This critical voltage level depends upon both the rate-of-rise of voltage and the rate of voltage decay. Two examples are: (1) determining the strength of the insulation used on electrical wiring; and, (2) determining the points from which electrical streamers appear on a vehicle as a lightning flash approaches.

Since there is a wide range of possible electric field waveforms produced by natural lightning, two voltage waveforms have been established, representing fast and slow rates of field rise. These are Waveform A described in 6.2.1 and Waveform D presented in 6.2.4.

Two other high voltage waveforms designated B and C are described in 6.2.2 and 6.2.3 respectively. The first is a full voltage waveform to be used wherever an impulsive field that does not reach breakdown is required, i.e. streamer testing. The second waveform is employed for fast front model tests. Waveform D can also be used for slow front model tests.

It has been determined in laboratory testing that the results of attachment point testing of aircraft models are influenced by the voltage waveform. Fast rising waveforms (rise in the order of a few microseconds) produce a relatively small number of attachment points, usually to the apparent high field regions on the model and may produce a greater likelihood of puncture of dielectric skins. Slow front waveforms (in the order of hundreds of microseconds) produce a greater spread of attachment points, possibly including attachments to lower field regions.

The voltage waveforms presented in this ARP are intended for evaluation of possible lightning attachment locations and/or dielectric breakdown paths through non-conducting surfaces or structures.

- 6.2.1 Voltage Waveform A: This waveform rises at a rate of $1000\text{kV}/\mu\text{s}$ ($\pm 50\%$) until its increase is interrupted by voltage breakdown of the intervening air gap, resulting in the puncture of, or flashover across, the object under test. At that time the voltage collapses to zero. The rate of voltage collapse or the decay time of the voltage if breakdown does not occur (open circuit voltage of a lightning voltage generator) is not specified. The voltage Waveform A is shown in Figure 5.

SAE ARP5412 Revision A

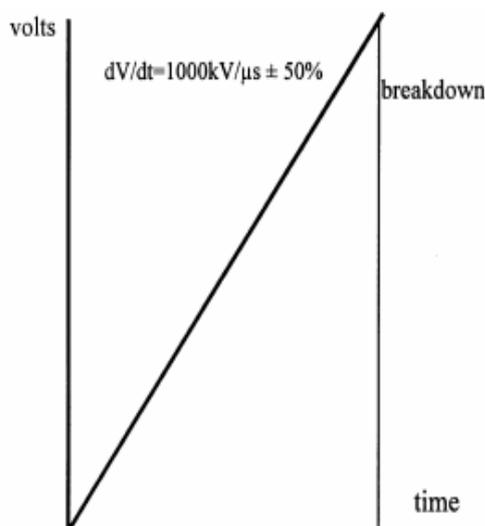


FIGURE 5 - Voltage Waveform A

- 6.2.2 Voltage Waveform B: Waveform B is a $1.2 \mu s \times 50 \mu s$ waveform which is the electrical industry standard for impulse dielectric tests. It rises to crest in $1.2 \mu s (\pm 20\%)$ and decays to half of crest amplitude in $50 \mu s (\pm 20\%)$. Time to crest and decay time refer to the open circuit voltage of a lightning voltage generator, and assume that the waveform is not limited by puncture or flashover of the object under test. This waveform is shown in Figure 6.
- 6.2.3 Voltage Waveform C: This is a chopped voltage waveform in which breakdown of the gap between an object under test and the test electrodes occurs at $2 \mu s (\pm 50\%)$. The amplitude of the voltage at time of breakdown and the rate-of-rise of voltage prior to breakdown are not specified. The waveform is shown in Figure 7.
- 6.2.4 Voltage Waveform D: The slow fronted waveform has a rise time between 50 and $250 \mu s$ so as to allow time for streamers from an object to develop. It should give a higher strike rate to the low probability regions than otherwise might have been expected. This waveform is shown in Figure 8.

SAE ARP5412 Revision A

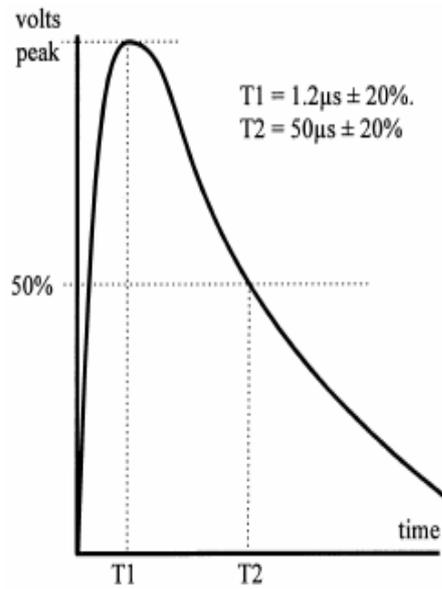


FIGURE 6 - Voltage Waveform B

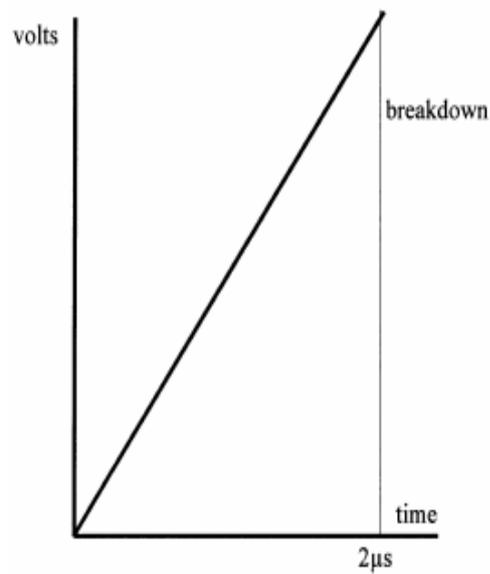


FIGURE 7 - Voltage Waveform C

SAE ARP5412 Revision A

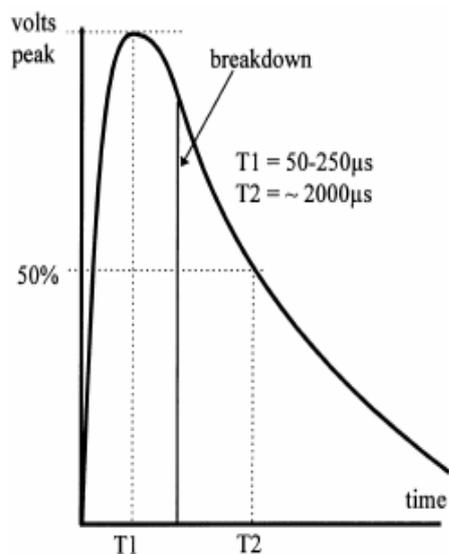


FIGURE 8 - Voltage Waveform D

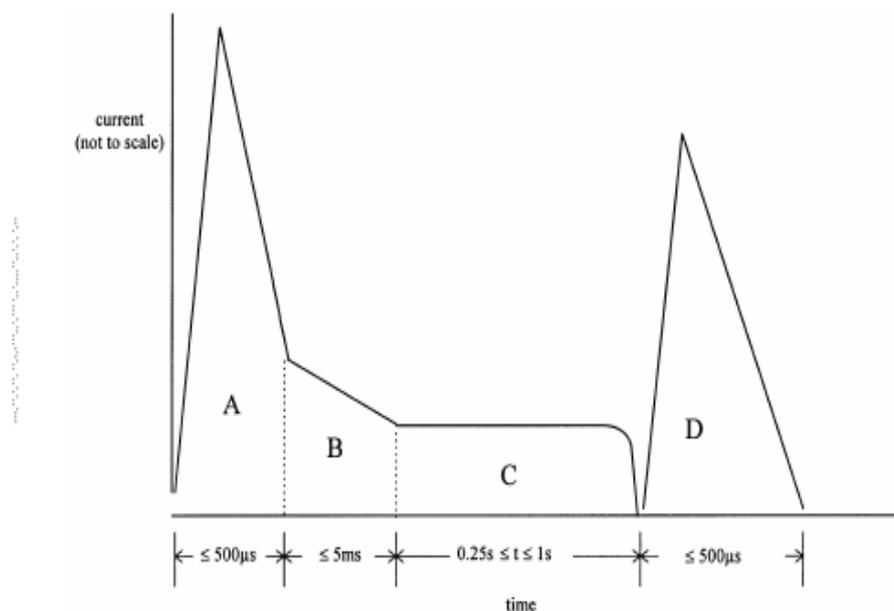
6.3 External Idealized Current Components:

The external lightning environment is comprised of current components A, A_n, B, C, D, and H, and the Multiple Stroke (MS) and Multiple Burst (MB) Waveform sets. The MS is comprised of components D and D/2, and the MB is comprised of component H pulse sequences.

Current components A, B, C, and D comprise the lightning flash current waveform for evaluating direct effects and are shown in Figure 9. Current components A and D, and Waveform sets MS and MB are applicable for evaluating indirect effects. The latter two are shown in Figures 10 and 11.

The current components are defined in the following sections.

SAE ARP5412 Revision A

**COMPONENT A (First Return Stroke)**

Peak Amplitude	:	200kA (± 10%)
Action Integral	:	$2 \times 10^6 \text{A}^2\text{s}$ (± 20%) (in 500µs)
Time Duration	:	≤ 500µs

COMPONENT B (Intermediate Current)

Max. Charge Transfer	:	10 Coulombs (± 10%)
Average Amplitude	:	2kA (± 20%)
Time Duration	:	≤ 5ms

COMPONENT C (Continuing Current)

Amplitude	:	200 - 800A
Charge Transfer	:	200 Coulombs (± 20%)
Time Duration	:	0.25 to 1 s

COMPONENT D (Subsequent Return Stroke)

Peak Amplitude	:	100kA (± 10%)
Action Integral	:	$0.25 \times 10^6 \text{A}^2\text{s}$ (± 20%) (in 500µs)
Time Duration	:	≤ 500µs

FIGURE 9 - Current Components A Through D for Direct Effects Testing

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">DM</p>	2. DATA 25 de fevereiro de 2010	3. REGISTRO N° CTA/ITA/DM-149/2009	4. N° DE PÁGINAS 123
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Caracterização da Anisotropia na Permissividade Complexa em Compósito de Fibra de Carbono (CFC)			
6. AUTOR(ES): Francisco Eduardo de Carvalho			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:			
9. Anisotropia; Permissividade Complexa, Compósito de Fibra de Carbono			
9.PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Materiais compósitos; Fibras de carbono; Medição de permissividade; Anisotropia; Blindagem; Radiação eletromagnética; Estruturas de aeronaves; Laminados; Ensaios de materiais; Engenharia de materiais			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação. Área de Microondas e Optoeletrônica. Orientador: Alberto José de Faro Orlando. Defesa em 22/12/2009. Publicada em 2009.			
11. RESUMO: <p>A caracterização da anisotropia na permissividade relativa complexa do Compósito de Fibra de Carbono (CFC) tornou-se importante para avaliar os efeitos diretos e indiretos causados por impacto de raio em aeronaves construídas com esse material. Esta importância está associada à relação que existe entre a blindagem eletromagnética utilizada para proteger os equipamentos de bordo e a permissividade do CFC. Devido a estas relações e sua relevância para a indústria aeronáutica, foi realizada uma extensa investigação da permissividade do CFC.</p> <p>Foram medidas as partes real e imaginária (ϵ' e ϵ'') da permissividade na faixa de frequência de 1 kHz a 10 MHz, a 25°C, a partir de amostras cilíndricas extraídas de uma mesma placa multicamadas de CFC, com seus eixos ortogonais entre si e paralelos aos eixos cartesianos. Os resultados destas medidas foram compilados em uma base de dados para serem utilizados em um software de simulação baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). Como resultado, foi possível representar em três eixos o campo próximo e a intensidade da energia eletromagnética a que pode ser submetida uma estrutura de CFC com geometria arbitrária no espaço tridimensional de uma placa de CFC do material iluminada pela componente elétrica. Além disso, foi observada a anisotropia entre os planos YZ e YX, apontando que a</p>			

maior anisotropia ocorre na direção do eixo Y. O material analisado apresentou baixas perdas, com ϵ'' tendendo assintoticamente a zero.

¹². GRAU DE SIGILO:

OSTENSIVO

RESERVADO

CONFIDENCIAL

SECRETO

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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