

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**CÁLCULO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM
ESTRUTURAS VEICULARES NO AMBIENTE DE UMA
CÂMARA SEMIANECÓICA DE TAMANHO REDUZIDO**

CRISTIANO MELO PEREIRA

BELO HORIZONTE

2008

CRISTIANO MELO PEREIRA

**CÁLCULO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM
ESTRUTURAS VEICULARES NO AMBIENTE DE UMA
CÂMARA SEMIANECÓICA DE TAMANHO REDUZIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mário Fabiano Alves

BELO HORIZONTE

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

P436c	<p>Pereira, Cristiano Melo</p> <p>Cálculo de campos eletromagnéticos em estruturas veiculares no ambiente de uma câmara semianecóica de tamanho reduzido / Cristiano Melo Pereira. Belo Horizonte, 2008.</p> <p>109f. : Il.</p> <p>Orientador: Mário Fabiano Alves</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica</p> <p>1. Compatibilidade eletromagnética. 2. Método dos elementos finitos. 3. Compatibilidade eletromagnética - Testes. 4. Eletromagnetismo – Simulação (Computadores). I. Alves, Mário Fabiano. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p>
	CDU: 538.3

CRISTIANO MELO PEREIRA

Prof. Dr. Mário Fabiano Alves – PUC Minas

Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino – UFMG

Prof. Dr^a. Rose Mary Souza Batalha – PUC Minas

Suplente:

Prof. Dr. Carlos Augusto Paiva da Silva Martins – PUC Minas

BELO HORIZONTE, 19 DE NOVEMBRO DE 2008.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a essa força misteriosa que chamamos de Deus ao qual sempre nos recorreremos em momentos difíceis e de onde nos vem milagrosamente a indicação dos melhores caminhos a serem seguidos.

Ao meu admirável orientador Prof. Mário Fabiano Alves pela paciência e dedicação ao longo do meu trabalho, quem nas situações mais difíceis, tanto no âmbito acadêmico como pessoal, com suas palavras sinceras e amigáveis conseguia fazer com que eu emergisse e encontrasse sentido em minha trajetória.

À Prof^a Rose Mary de Souza Batalha pela participação e contribuição.

À FIAT Automóveis, em especial ao Leonardo Alvarenga Lopes Santos pela seriedade e garra para a conclusão do projeto de pesquisa.

Aos amigos e colaboradores do PPGEE em especial à Maria Isabel Novaes e Izabel Siqueira pelo apoio, carinho e dedicação.

À minha querida Mãe Maria das Graças e meu Irmão Erlon Cristian pela compreensão nos momentos de cansaço e irritação.

Ao meu amigo Leandro Gomes com quem sempre pude contar ao longo desses anos.

E a todos que mesmo não explicitados aqui tiveram em algum momento sua participação na evolução e conclusão desse trabalho.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

Esta dissertação faz parte de um projeto de pesquisa envolvendo PUC Minas, UnB, CEFET-MG, UFMG, FIAT Automóveis e financiamento do CNPq. Esse projeto teve como o objetivo avaliar a viabilidade do uso de uma câmara semianecóica de dimensões reduzida para a condução de testes de imunidade eletromagnética em alternativa ao que é proposto pela (ISO 11451-2, 2001), com o uso de câmara semianecóica de grandes dimensões. A configuração de testes de imunidade eletromagnética proposta pelo projeto de pesquisa consiste em utilizar somente a parte frontal do veículo. A justificativa dessa configuração baseia-se no fato de que a maior parte da eletrônica embarcada está concentrada na parte frontal do veículo. Com isso espera-se poder criar uma proposta de metodologia de testes capaz de atender preliminarmente aos requisitos normativos com uma estrutura laboratorial menos onerosa. Nesse contexto o presente trabalho concentra-se no uso de metodologias numéricas de cálculo de campo eletromagnético como ferramenta para reproduzir e validar no ambiente computacional os experimentos propostos no projeto de pesquisa. É abordada ainda a utilização de modelos simplificados como forma de compreensão dos fenômenos eletromagnéticos, penetração de campo em aberturas e cavidades ressonantes eletromagnéticas, presentes em uma estrutura veicular complexa.

Palavras Chave: Compatibilidade Eletromagnética. Cálculo Numérico de Campos Eletromagnéticos. Ensaios de Suscetibilidade Eletromagnética Veiculares. Método dos Elementos Finitos. Penetração de Campo Eletromagnético. Acoplamento de Campo em Aberturas. Cavidades Eletromagnéticas Ressonantes. Suscetibilidade Eletromagnética.

ABSTRACT

This dissertation is part of a research project involving PUC Minas, UnB, CEFET-MG, UFMG, FIAT Automóveis financed by CNPq. The project objective is to evaluate the viability of the use of a semi-anechoic chamber with reduced dimensions for the conduction of electromagnetic immunity test as an alternative to what it is established by (ISO 11451-2, the 2001), where is applied semi-anechoic chamber with large dimensions. The configuration of tests of electromagnetic immunity proposed by the project consists of using only the frontal part of the vehicle in the test. This is justified by the fact that most of the embedded electronics is concentrated in this part of the vehicle. It is the project expectancy the creation of an alternative proposal for preliminary vehicle radiated electromagnetic immunity test, applying cheaper laboratory structures. In this context the present work concentrates in the development of computational simulations of the tests configurations in order to evaluate the research project proposal. Simplified models are used as form of understanding the electromagnetic phenomena, field penetration in apertures and electromagnetic resonance cavity, in a complex vehicular structure. The results had demonstrated hopeful and satisfactory in comparison to the degree of difficulty for electromagnetic numerical simulations in large structures as automotive vehicle.

Key-words: Electromagnetic Compatibility. Numerical Electromagnetic Calculation. Vehicle Electromagnetic Immunity Test. Finite Element Method. Electromagnetic Penetration. Aperture Coupling. Electromagnetic Resonance Cavity. Electromagnetic Susceptibility

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto	14
1.2	Problema Motivador	17
1.3	Objetivos e Metas	19
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	19
1.3.3	<i>Metas</i>	20
1.4	Organização da Dissertação	20
2	CONCEITUAÇÃO BÁSICA	22
2.1	Compatibilidade Eletromagnética	22
2.1.1	<i>Fontes de Interferência</i>	24
2.1.2	<i>Mecanismos de Acoplamento</i>	25
2.2	CEM em Automóveis	26
2.2.1	<i>Legislação Sobre CEM na Indústria Automobilística</i>	30
2.3	Metodologia de Teste ISO 11451-2, 2001	32
2.3.1	<i>Procedimento dos Testes Conforme ISO-11451 – Parte 2</i>	35
2.4	Esquema do Projeto de Pesquisa	36
2.4.1	<i>Características do LACE</i>	36
2.4.2	<i>Características da Eletrônica Embarcada em Veículos</i>	38
2.4.3	<i>Configuração de Teste Proposta pelo Projeto de Pesquisa</i>	39
3	MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS A CEM	41
3.1	Visão Geral dos Métodos de Cálculo de Campo	42
3.1.1	<i>Testes de Suscetibilidade e a Teoria Eletromagnética</i>	42
3.1.2	<i>Métodos Numéricos de Cálculo de Campo</i>	43
3.1.3	<i>Técnicas Integrais</i>	44
3.1.4	<i>Técnicas Diferenciais</i>	45
3.2	Programa de Cálculo de Campo HFSS	47
3.3	Simulações Numéricas	50
3.4	Cálculo de Campo em Estrutura Automotiva Simplificada	51
4	MODELAMENTO DA ESTRUTURA VEICULAR	53
4.1	Considerações Iniciais da Modelagem	53
4.2	Análise Física do Problema	53
4.2.1	<i>Estudo das Cavidades Ressonantes e das Aberturas</i>	54
4.3	Modelamento	61
4.3.1	<i>Fonte de Campo</i>	61
4.3.2	<i>Estrutura Veicular Simplificada</i>	61
4.4	Simulação	64
4.4.1	<i>Pontos de Medição</i>	66
4.4.2	<i>Dados da Simulação</i>	69
5	RESULTADOS	70
5.1	Estruturação dos Resultados	70
5.2	Veículo Seccionado: Comparação entre Medição e Resultados da Simulação	71

5.2.1	<i>Pontos A06, A07 e A08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente</i>	71
5.2.2	<i>Pontos B06, B07 e B08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente</i>	75
5.2.3	<i>Análise dos Resultados: Cálculo X Medição</i>	78
5.2.4	<i>Veículo Seccionado X Veículo Inteiro: Comparação entre Resultados da Simulação</i>	80
5.2.5	<i>Pontos A06, A07 e A08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente</i>	80
5.2.6	<i>Pontos B06, B07 e B08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente</i>	84
5.2.7	<i>Análise dos Resultados: Veículo Inteiro X Veículo Seccionado</i>	87
6	CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
	APÊNDICE A	93

SIGLAS E ACRÔNIMOS

CEM	Compatibilidade Eletromagnética
EM	Eletromagnético
FDM	<i>Finite Difference Method</i> (Método das Diferenças Finitas)
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i> (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)
FEM	<i>Finite Difference Time Domain</i> (Método dos Elementos Finitos)
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator – Ansoft</i>
IEM	Interferência Eletromagnética
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
LT	Linhas de Transmissão
MoM	<i>Method of Moments</i> (Métodos dos Momentos)
PCI	Placa de Circuito Impresso
SE	Eficiência de Blindagem
TEM	Onda transversa Eletromagnética
TLM	<i>Transmission-Line Modeling</i> (Método das Linhas de Transmissão)
TLT	<i>Transmission Line Theory</i> (Teoria de Linha de Transmissão)
\vec{E}	Campo Elétrico
\vec{H}	Campo Magnético
CSA	Câmara Semianecóica
LACE	Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética
OATS	<i>Open Area Test Site</i> (Teste em Campo Aberto)
ERB	Estações Rádio Base de Telefonia Celular

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Figura comparativa de um Fiat 3 ½ HP de 1899 e um Fiat Punto 2008	15
Figura 1.2 – Câmara semianecóicas, laboratório <i>LACE</i> da FIAT Automóveis em Betim	18
Figura 1.3 – Detalhe do interior da CSA do ELASIS em <i>Pomigliano D'Arco</i> , Napolis ³	18
Figura 2.1 – Comparativo disponibilidade de recursos versus custos, sob o aspecto da CEM 23	
Figura 2.2 – Esquema dos caminhos de acoplamento da IEM em um sistema.....	26
Figura 2.3– Desenho ilustrativo em corte de uma CSA conforme ISO-11451	34
Figura 2.4 – Detalhe da antena corneta 3106 da ETS-Lindgren	37
Figura 2.5 – Detalhe da antena isotrópica FP-5000 da ETS-Lindgren	37
Figura 2.6 – Esquema da disposição dos sensores e centrais eletrônicas em um veículo	38
Figura 2.7 – Comparação entre o esquema ISO e o proposto pelo projeto de pesquisa no LACE.....	40
Figura 3.1 – Fluxograma dos passos de solução empregando o FEM.....	47
Figura 4.1 – Cavidade retangular simples com abertura.....	54
Figura 4.2 – Circuito equivalente para a cavidade retangular	56
Figura 4.3 – Comportamento ressonante da cavidade, resultado analítico	58
Figura 4.4 – Detalhe da polarização do campo em relação às dimensões de uma abertura retangular	59
Figura 4.5 – Detalhe da influência da polarização do campo com as dimensões de uma abertura retangular	59
Figura 4.6 – Estrutura veicular completa utilizada nos experimentos e simulações	63
Figura 4.7 – Estrutura veicular seccionada utilizada nos experimentos e simulações.....	63
Figura 4.8 – Detalhe da geração de malha e da região com o refinamento	66
Figura 4.9 – Detalha do plano de simetria aplicado aos modelos veiculares simplificados	67
Figura 4.10 – Detalhe dos pontos de medição.....	68
Figura 5.1 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto A06 , pol. Vertical.....	71
Figura 5.2 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto A06 , pol. Horizontal.....	72
Figura 5.3 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto A07 , pol. Vertical.....	72
Figura 5.4 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto A07 , pol. Horizontal.....	73
Figura 5.5 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto A08 , pol. Vertical.....	73
Figura 5.6 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto A08 , pol. Horizontal.....	74
Figura 5.7 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto B06 , pol. Vertical.....	75

Figura 5.8 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto B06 , pol. Horizontal.....	75
Figura 5.9 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto B07 , pol. Vertical.....	76
Figura 5.10 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto B07 , pol. Horizontal.....	76
Figura 5.11 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto B08 , pol. Vertical	77
Figura 5.12 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto B08 , pol. Horizontal.....	77
Figura 5.13 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto A06 , pol. Vertical	80
Figura 5.14 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto A06 , pol. Horizontal	81
Figura 5.15 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto A07 , pol. Vertical	81
Figura 5.16 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto A07 , pol. Horizontal	82
Figura 5.17 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto A08 , pol. Vertical	82
Figura 5.18 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto A08 , pol. Horizontal	83
Figura 5.19 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto B06 , pol. Vertical	84
Figura 5.20 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto B06 , pol. Horizontal	84
Figura 5.21 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto B07 , pol. Vertical	85
Figura 5.22 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto B07 , pol. Horizontal	85
Figura 5.23 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto B08 , pol. Vertical	86
Figura 5.24 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto B08 , pol. Horizontal	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dimensão relevante em função da polarização do campo incidente	60
Tabela 5.1 – Comparação da maior dimensão da abertura com o comprimento de onda	78

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados o contexto, o problema motivador, os objetivos, metas, proposta de solução e o escopo da dissertação. Ao final é mostrado o modo como estão organizados os próximos capítulos e o conteúdo que será abordado nos mesmos.

1.1 Contexto

Após a invenção do transistor e subsequentemente do circuito integrado, os dispositivos eletrônicos têm ocupado cada vez mais espaço em todos os seguimentos possíveis presentes em nosso cotidiano. Atualmente é impensável poder conviver sem o auxílio de determinados aparelhos ou equipamentos eletrônicos, tais como os computadores, sistemas de comunicação, marca passo (para cardíacos), equipamentos médicos de diagnóstico por imagens, etc.

Não muito diferente dessa tendência do emprego intensivo da eletrônica está a indústria automobilística. Fazendo um retrospecto comparando os atuais automóveis com seus precursores, facilmente observa-se que ambos assemelham-se apenas pelo fato de ainda possuírem a convencional forma de se locomoverem sobre rodas. Sistemas encarregados de supervisão de funcionamento, controle eletrônico de injeção de combustível, freios anti-bloqueio, controle inteligente de tração, sistemas radares anti-colisão, posicionamento via satélite, sistemas de comunicação interna por rádio frequência, chaves eletrônicas criptografadas, controle de emissão de poluentes, sistemas de alarme e imobilização e outros aparatos tecnológicos que são cada vez mais comuns nos automóveis atuais. Automóveis em que são empregados intensamente os recursos tecnológicos, como uma Mercedes, BMW, Alfa Romeo, podem conter mais de 48 microprocessadores, 62 motores elétricos, conexão via rádio frequência de curta distância (*bluetooth*), computador de bordo, sistema de posicionamento global (GPS), sistema de tração, suspensão adaptativa, sistema radar anti-colisão e outros recursos totalmente integrados. Esses recursos tecnológicos têm a finalidade de proporcionar as mais variadas funções de conforto, confiabilidade, segurança, além de minimizar os impactos ambientais com a melhoria da eficiência no uso do combustível. A

Figura 1.1, a título ilustrativo, apresenta a visível evolução tecnológica dos veículos automotores desde seus primórdios até atualmente. Os veículos apresentados nessa figura são de fabricação Fiat, o primeiro de 1899 e o segundo fabricado 109 anos após.

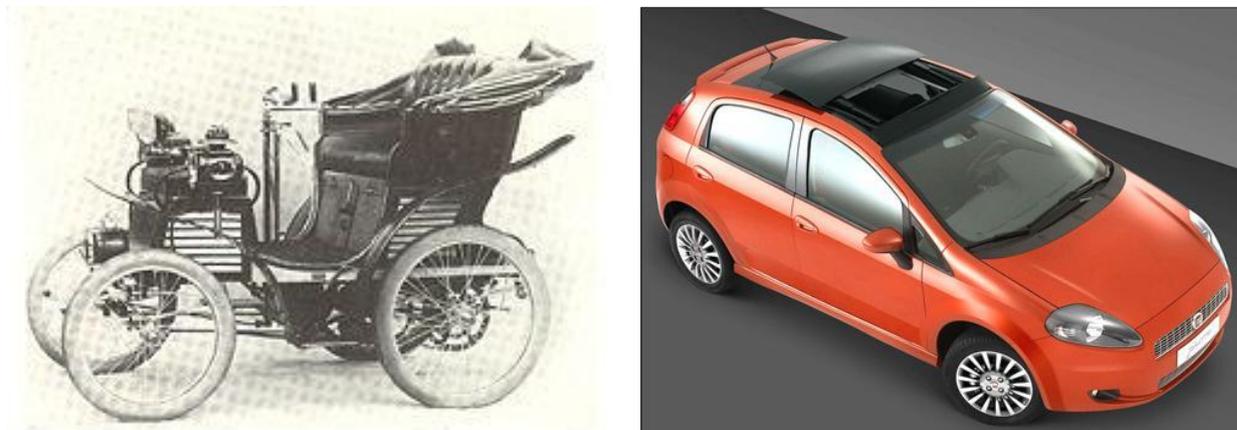


Figura 1.1 – Figura comparativa de um Fiat 3 ½ HP de 1899 e um Fiat Punto 2008¹

O emprego intensivo de aparatos tecnológicos em veículos é uma realidade e em franca expansão. No entanto a não observância de determinados fatores pode levar todo esse aparato tecnológico a funcionar ineficientemente ou mesmo ficar inoperante por determinado tempo. Pequenas falhas ou inoperância nos sistemas de conforto e entretenimento podem ser toleráveis ou mesmo nem serem percebidas pelo usuário de um veículo, tal como uma interferência no rádio ou o controle do ar condicionado. Mas, em se tratando de pequenas falhas ou inoperância dos sistemas relacionados à segurança desses veículos, as falhas podem se tornar um desastre com graves conseqüências. A título de exemplo de dispositivos onde as falhas não podem ser toleradas, podemos citar as bolsas de ar para amortecimento de impacto (*air bags*), freios anti-bloqueio (*ABS*), etc. O grau de confiança em itens de segurança faz com que alguns países permitam em suas autovias velocidades superiores a 220 km/h. A essa velocidade e em uma determinada situação de emergência os freios com sistema anti-bloqueio deixassem de funcionar devido à proximidade de uma estação rádio base de telefonia celular (*ERB*), o resultado final poderia ser trágico.

Logo um fabricante poderia adotar dois caminhos diferentes para problemas dessa natureza do exemplo citado: o primeiro seria colocar um aviso em letras chamativas proibindo o uso dos freios próximo a fontes de campos elétricos com determinada intensidade, o que

¹ Fonte: Fiat 3 ½ HP – <http://www.wikipedia.com>; Fiat Punto – <http://www.fiat.com.br>

não seria nem um pouco confortável para os condutores mais distraídos. O segundo caminho, mais lógico, seria sistematizar para que toda a eletrônica embarcada fosse imune as interferências eletromagnéticas (IEM) dessa natureza e também imune às próprias fontes de interferência eletromagnéticas embarcadas. Nesse último caso, em outras palavras, seria tornar a eletrônica embarcada compatível eletromagneticamente ao ambiente eletromagnético ao qual se destina o veículo.

No sentido de garantir a confiabilidade e eficiência da eletrônica embarcada em termos de Compatibilidade Eletromagnética (CEM), a indústria automobilística realiza constantes testes balizados por normas, procedimentos próprios e oriundos de organismos nacionais e internacionais. A engenharia relacionada a CEM tem sido, desde sua origem até então, uma atividade predominantemente experimental. Normalmente, em sistemas automotivos, a CEM aplica metodologias de ensaios nos estágios mais avançados do desenvolvimento de novos produtos com a utilização de protótipos. A estrutura laboratorial necessária à condução dos testes demandam elevada carga de homens-hora altamente especializada e empregam sofisticados e onerosos instrumentos e equipamentos, tais como as câmaras semianecóicas, geradores de sinal, amplificadores, antenas etc.

O projeto CNPq², “Correlação entre Medições de Campos Eletromagnéticos Gerados em Câmaras Semianecóicas de Grande Porte e de Dimensões Reduzidas” proposto pela FIAT Automóveis, foi elaborado com o objetivo de capacitar profissionais na área de EMC em veículos, além de potencializar seu Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética (LACE) no desenvolvimento de provas veiculares. O objetivo da proposta de metodologia de testes de suscetibilidade irradiada é criar uma montagem, de dimensões reduzidas – câmara semianecóica de pequeno porte. Essa montagem seria capaz de submeter os componentes elétricos e eletrônicos embarcados nos veículos às mesmas solicitações eletromagnéticas que sofreriam se estivessem sendo avaliados em uma montagem internacionalmente definida, câmara semianecóica de grande porte padrão ISO, eliminando assim a necessidade de envio de veículos ao exterior para serem submetidos a testes (SANTOS, 2007).

Para a solução do problema proposto no escopo do projeto, houve a formação de uma equipe interinstitucional dividida em: Equipe de Medições e Equipe de Cálculo de Campo. A equipe de medições, constituída por professores e alunos da UFMG, CEFET-MG e

² CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Projeto nº 55025-2003/3

UNB responsáveis pela realização e análise de testes experimentais. A equipe de Cálculo de Campo, constituída por professores e alunos da UFMG, PUC-Minas e CEFET-MG responsável pela análise computacional dos experimentos (SANTOS, 2007).

1.2 Problema Motivador

Como citado no contexto, em função da complexidade da eletrônica embarcada nos veículos automotores atuais, exige-se grandes investimentos em laboratórios para atender as mais diferentes normas com o intuito de submeter o veículo e seus diversos componentes a provas eletromagnéticas. A FIAT Automóveis por sua vez possui vários laboratórios especializados na condução de provas de CEM. Os centros especializados de testes da FIAT Automóveis localizados na Europa são os seguintes:

1. *CENTRO DI RECERCA FIAT MIRAFIORI* situado em Torino, Itália, realiza teste de EMC em componentes elétricos eletrônicos, na faixa de 10kHz a 18GHz;
2. *CENTRO DI RICERCA FIAT* situado em Torino, Itália, com capacidade de realização de testes de EMC em componentes elétricos e eletrônicos.
3. *ELASIS* situado em *Pomigliano D'Arco* Nápolis, que tem capacidade de realizar testes em veículos conforme a (ISO 11451-2, 2001).

No Brasil, em sua fábrica em Betim-MG, a FIAT Automóveis foi pioneira ao construir o Laboratório de *Antenas e Compatibilidade Eletromagnética (LACE)*. Esse laboratório é constituído de uma câmara semianecóica de pequenas dimensões e é destinado principalmente para testes em componentes isolados e também em veículos na condição estática. A Figura 1.2 apresenta o interior da câmara semianecóica do LACE na FIAT Automóveis em Betim, Minas Gerais.



Figura 1.2 – Câmara semianecóica, laboratório *LACE* da FIAT Automóveis em Betim³

A Figura 1.3 apresenta detalhe do interior da câmara semianecóica (CSA) do ELASIS em *Pomigliano D'Arco*, Nápolis com os equipamentos de acordo com a (ISO 11451-2, 2001).



Figura 1.3 – Detalhe do interior da CSA do ELASIS em *Pomigliano D'Arco*, Napolis³.

Para os testes de emissões irradiadas utilizando o veículo completo, os protótipos são normalmente enviados para o laboratório de experimentação ELASIS situado em Nápoles – Itália, Figura 1.3. Tanto o envio de protótipos como a construção de centros de testes nos moldes daqueles existentes na Europa exigem altos investimentos. Logo com a

³ Foto cedida pelo Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética da FIAT – Betim/MG - Brasil

potencialização do LACE para provas de imunidade eletromagnética em veículos, a FIAT poderia atingir a possibilidade de desenvolver testes preliminares, reduzindo ou até mesmo eliminando a necessidade de envio de protótipos ao exterior para serem submetidos a testes.

1.3 Objetivos e Metas

1.3.1 Objetivo Geral

O foco principal do projeto é o de avaliar e correlacionar os testes de suscetibilidade eletromagnética entre uma estrutura veicular simplificada completa com outra similar seccionada de forma a manter apenas a parte frontal de um veículo. Espera-se com os resultados dar subsídios para a implantação de novas metodologias de testes a serem realizadas na CSA de dimensões reduzidas, que somados às simulações computacionais, possibilitarão uma redução substancial em investimentos laboratoriais e de demanda de tempo experimental. A contribuição dessa dissertação no contexto geral do projeto é o de validar os resultados experimentais, além de gerar experiência no uso das ferramentas computacionais de simulação em CEM em ambientes automotivos, particularmente quando aplicadas nos estágios iniciais de um projeto de um veículo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Objetivos específicos no contexto da dissertação:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre o tema da pesquisa;
- Discussão dos métodos de testes de emissões irradiadas conforme ISO 11451;
- Discussão da CEM em ambientes automotivos;

- Estudo de cavidade eletromagnética e aberturas a fim de compreender o comportamento de uma estrutura veicular iluminada por campos eletromagnéticos;
- Aplicação do software de cálculo de campo HFSS para validar e correlacionar os campos resultantes de uma estrutura veicular simplificada nas configurações completa (veículo inteiro) e seccionada (veículo cortado).

1.3.3 Metas

As metas são os resultados esperados nas simulações em que se apontam:

- Definição de modelos para simulação;
- Validação das medições realizadas pela equipe da UFMG/FIAT;
- Correlação dos resultados;
- Estabelecimento de conclusões, recomendações e propostas futuras.

1.4 Organização da Dissertação

Na introdução, Capítulo 1, são apresentados o contexto, o problema motivador, os objetivos e metas.

No Capítulo 2 é apresentada uma conceituação básica sobre o tema de CEM voltada ao ambiente automotivo. Também são abordadas as questões relativas à normalização relacionada a CEM aplicada a indústria automotiva e os procedimento de testes para emissões irradiadas conforme (ISO 11451-2, 2001). É apresentado, de forma breve, o esquema adotado pelas equipes da UFMG/FIAT nas medições utilizando a câmara semianecóica do laboratório LACE da FIAT Automóveis em Betim.

O Capítulo 3 é dedicado a dar uma visão geral sobre os principais métodos numéricos utilizados no cálculo de campos eletromagnéticos. Uma ênfase maior é dada ao Método de Elementos Finitos (FEM), por ser o método usado pelo programa *High Frequency Structure Simulator* (HFSS) da *Ansoft*, que foi o programa utilizado nesta dissertação. Uma visão geral sobre a aplicação de métodos numéricos aplicados em CEM em veículos é abordada no final do capítulo.

O Capítulo 4 apresenta a interpretação física do fenômeno de penetração de campo em aberturas e cavidades ressonantes eletromagnéticas. Essa análise foi realizada sob o aspecto da interpretação da estrutura veicular como sendo similar a uma cavidade ressonante magnética com aberturas. Isso permitiu o desenvolvimento de um modelo veicular simplificado que foi utilizado tanto no processo de medições quanto nas simulações computacionais.

No Capítulo 5 é sumarizado o trabalho como um todo apresentando os resultados obtidos nos cálculos de campo e confrontando com aqueles obtidos nas medições. Também são discutidos os resultados dentro da ótica dos temas pesquisados como comportamento de aberturas e cavidades ressonantes.

No Apêndice – A são apresentadas as normas relacionadas à compatibilidade eletromagnética em automóveis.

2 CONCEITUAÇÃO BÁSICA

2.1 Compatibilidade Eletromagnética

Compatibilidade Eletromagnética (CEM) é a habilidade de um equipamento ou sistema eletrônico de funcionar satisfatoriamente em um determinado ambiente, sem introduzir níveis intoleráveis de interferência eletromagnética (IEM), permanecendo imune às IEM presentes no ambiente e ou àquelas produzidas por ele próprio. Ou seja, um equipamento compatível eletromagneticamente deve atender aos seguintes critérios:

- a) Não causar IEM a níveis intoleráveis no ambiente ao qual se destina;
- b) Não ser susceptível a IEM de sistemas ou equipamentos vizinhos;
- c) Ser imune a suas próprias fontes de IEM.

CEM é um termo cada vez mais presente no cotidiano devido à massiva utilização da eletrônica em todos os setores industriais, comerciais, residenciais, além da proliferação dos meios de comunicação em geral. Isso tem tornado o assunto cada vez mais explorado, inclusive despertando constantes indagações a respeito da influência sobre os fatores biológicos. Em (A. Kumar, 2001), a título ilustrativo, pode ser visto um estudo onde é analisada a influência da exposição a campos eletromagnéticos no DNA de determinadas cobaias. O alto grau de dependência da sociedade moderna em relação à eletrônica de uma maneira geral, conduz também importantes estudos a respeito de possíveis atentados terroristas se utilizando da vulnerabilidade à IEM de determinados sistemas de segurança (RADASKY; WILK, 2000). Essas questões estão, naturalmente, fora do escopo do presente trabalho.

Devido ao peso de regulamentações impostas por muitos países, a CEM tem se tornado um fator cada vez mais relevante para os fabricantes dos mais diversos ramos de atividade. A não observância nas medidas que estabelecem níveis de tolerância para emissões e suscetibilidade eletromagnéticas, imposta pelas regulamentações, levam inclusive a restrições mercadológicas, fato que tem se tornado comum em muitos países.

É muito importante que no desenvolvimento de novos produtos a preocupação com a CEM deva ser uma tarefa a ser incluída desde o início do processo de desenvolvimento. Pois na fase de projeto o projetista tem em mãos uma série de ferramentas, que se observadas preliminarmente, farão com que ações corretivas nas fases de produção sejam reduzidas ou eliminadas.

Ações aplicadas nas fases preliminares de um projeto minimizam custos posteriores com correções e adequações, uma vez que a prevenção é a melhor opção nesses casos. Correções de problemas decorrentes da CEM, em muitos casos, podem ser bastante complicadas e geralmente onerosas, dependendo da fase de desenvolvimento que se encontra o produto ou equipamento. No geral para as fases iniciais há uma grande gama de recursos para a mitigação de problemas de CEM, basicamente sem agregar custos. À medida que o desenvolvimento avança, passando para fases de testes e de produção em diante, a tendência é de uma redução das técnicas disponíveis e com um alto custo para implantação. A Figura 2.1 apresenta um gráfico ilustrativo com as etapas de desenvolvimento de um produto, fazendo um paralelo entre as técnicas disponíveis para controle da CEM com o impacto de custo para sua implantação (PAVÃO, 2008).

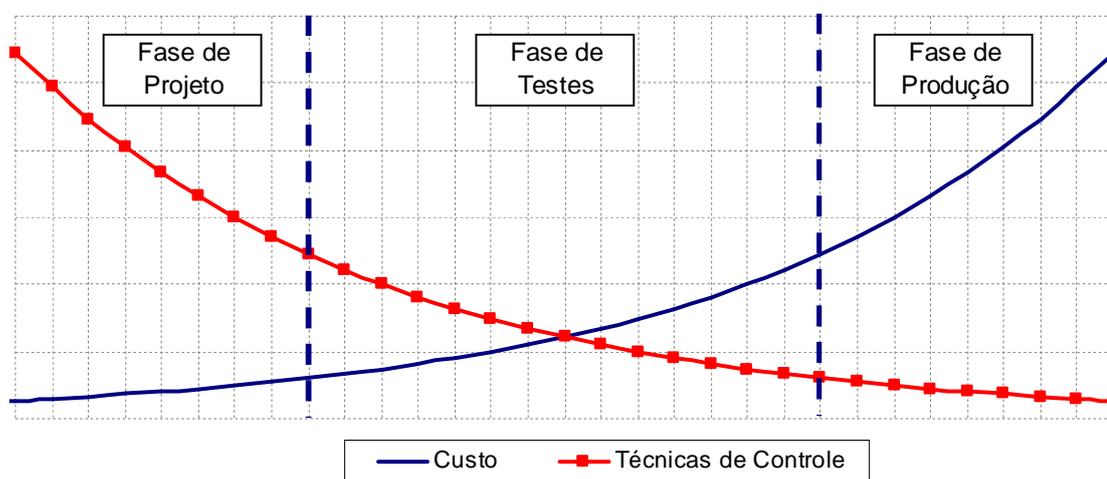


Figura 2.1 – Comparativo disponibilidade de recursos versus custos, sob o aspecto da CEM

A título de exemplo, de como pode ser oneroso correções nas fases de produção e pós venda, imaginemos um fabricante de celular ter de fazer um *recall*⁴ de um produto após

⁴ *Recall* é uma convocação feita pelos fabricantes para substituir ou reparar algum de seu produto que tenha apresentado defeitos. Geralmente ocorre pela descoberta de problemas relativos à segurança do produto.

serem vendidos algo em torno de um milhão ou mais de exemplares em todo mundo. Não é uma tarefa fácil e nem barata. Outro exemplo, mais crítico, seria um cardíaco descobrir que seu marca-passo pode não funcionar adequadamente toda vez que alguém atender um celular ou dê partida em um carro próximo a ele, nesse caso chamar o paciente para um *recall* pode ser uma tarefa nem um pouco agradável.

O processo de desenvolvimento de equipamentos, sob o ponto de vista da CEM, está relacionado ao conhecimento do ambiente eletromagnético ao qual se destinam os produtos e ou equipamentos. Técnicas simples podem ser aplicadas no desenvolvimento, mas que poderão ser cruciais no desempenho final do produto. Cuidados no arranjo de componentes eletrônicos e condutores, com o posicionamento e dimensões de aberturas nas blindagens metálicas dos equipamentos são algumas das técnicas que podem ser aplicadas.

2.1.1 Fontes de Interferência

As fontes de IEM são usualmente classificadas de acordo com sua origem, podendo ser subdividida em fontes de origem natural e artificial.

a) Fontes de IEM de origem natural

As fontes naturais normalmente provêm de descargas atmosféricas que ocorrem em tempestades e também de ruídos cósmicos. Estes tipos de fonte além de poderem causar interferências podem causar outros tipos de manifestações. Esse é o caso, por exemplo, de uma incidência direta de uma descarga atmosférica, que pode causar danos térmicos e mecânicos ao atingir determinados equipamentos (PLOUMAN, 1996). Uma descarga atmosférica possui valores de corrente que varia de 50 kA a 100 kA e frequências caracteristicamente elevadas, normalmente com um tempo de subida da ordem de 0,5 μ s a 8 μ s e uma duração da ordem de 30 μ s a 200 μ s (WHITE; MARDIGUIAN, 1992).

b) Fontes de IEM de origem artificial

As fontes de interferências artificiais são aquelas produzidas por atividade criadas pelo homem e podem ser do tipo intencional ou não intencional.

As fontes intencionais são aquelas que foram desenvolvidas para emitir alguma forma de energia propriamente dita com uma finalidade específica. Dentre essas fontes intencionais estão os sistemas de transmissão de rádio e televisão, comunicação em geral e outras. Normalmente essas fontes têm a característica de possuírem um espectro de frequência mais estreito, cobrindo uma faixa de frequência bem definida e condicionada em padrões de amplitude. O espectro de frequência para essas fontes intencionais de IEM compreendem faixa de kilohertz a Gigahertz, com intensidade de campo variando desde alguns milivolts/m à alguns volts/m. Uma fonte intencional passa a ser considerada como uma interferência a partir do momento em que uma determinada emissão de energia intencional passa a interferir em sistemas que não necessariamente o alvo receptor das mesmas. Um exemplo seria um sinal de rádio difusão interferir em algum sistema de comunicação e vice versa.

As fontes não intencionais são produzidas por todo o tipo de equipamentos e dispositivos elétricos e eletrônicos e são propriamente características intrínsecas de algum sistema ou dispositivo, tais como linhas de transmissão, transformadores, motores elétricos, computadores, processos de soldagens industriais, chaveamento de inversores de frequência, sistemas de ignição dos automóveis, etc. Essas fontes de IEM têm um espectro de frequência que abrange uma grande faixa. Vale ressaltar que uma fonte não intencional é uma interferência somente se a energia acoplada ao equipamento vítima for de magnitude suficiente que provoque um comportamento não desejável no mesmo (PAUL, 1992).

2.1.2 Mecanismos de Acoplamento

Os efeitos das interferências eletromagnéticas causadas pelas mais diversas fontes intencionais ou não podem propagar de diversas formas em um determinado equipamento ou sistema. Esse mecanismo de absorver ou conduzir uma determinada forma de interferência refere-se aos modos de acoplamento da energia eletromagnética.

Portanto, fontes de IE com frequências elevadas possuem uma disposição maior para acoplarem nos equipamentos vítimas. Esse acoplamento não intencional de energia pode

ser através da fiação elétrica e trilhas de circuitos impressos de forma direta, por condução, ou indiretamente pelo acoplamento do campo eletromagnético de uma onda irradiada .

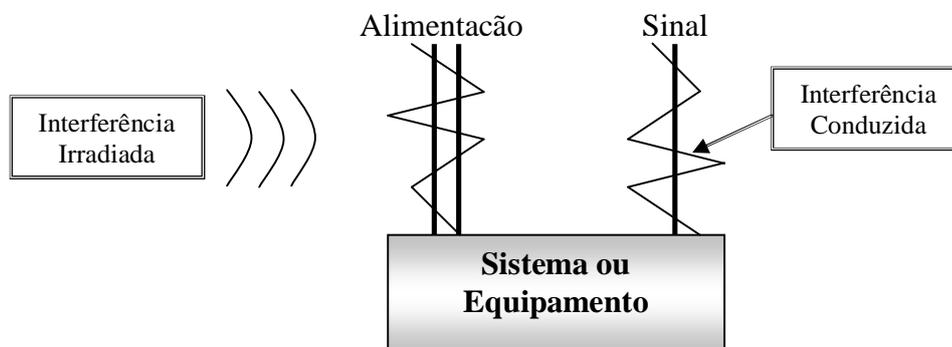


Figura 2.2 – Esquema dos caminhos de acoplamento da IEM em um sistema

Como pode ser visto no esquema apresentado na Figura 2.2, o acoplamento da IEM até o receptor ou equipamento vítima pode ser considerado como uma complexa combinação de acoplamentos por condução e irradiação. Lembrando que o acoplamento da energia é fortemente dependente da relação entre comprimentos de onda da frequência da IEM, dimensões elétricas do problema, características dos materiais, dimensões das aberturas, posicionamento e orientação de cabeamento, trilhas de circuitos impressos, polaridade dos campos, etc. O que torna o modelamento bastante complexo sendo necessária a utilização de métodos numéricos e outras ferramentas para uma análise adequada de problemas desta natureza.

2.2 CEM em Automóveis

O fenômeno de CEM em automóveis são os mesmos que acontecem em qualquer outro equipamento eletrônico, porém o ambiente eletromagnético no qual um veículo estará submetido difere-se bastante em comparação ao ambiente doméstico ou industrial (NOBLE, 1994). O ambiente eletromagnético ao qual o veículo estará sujeito pode variar em uma grande faixa de frequência e amplitude, pois a mobilidade própria dos veículos expõe os mesmos às mais diferentes situações e possibilidades de fontes de IEM. O veículo, em determinado momento, pode estar próximo às ERB's (estações rádio base de celular), linhas

de transmissão de energia, próximo ou imerso em tempestades com incidência de descargas atmosféricas, ter sinais de telefonia celular e rádio comunicação a partir de seu interior ou muito próximo, etc.

O fenômeno de CEM de um modo geral pode ser dividido em duas categorias básicas:

- a) Emissões e susceptibilidade conduzidas
- b) Emissões e susceptibilidade irradiadas

A eletrônica embarcada em um veículo não tem conexões físicas, como cabos e fiações elétricas, com o meio externo. Logo uma IEM conduzida nos dispositivos embarcados deve ocorrer ou por distúrbios causados pelos próprios dispositivos ou pelo acoplamento de uma IEM irradiada na fiação ou trilhas de circuitos impressos. As IEM conduzidas geradas pelos componentes embarcados dos veículos podem também ser irradiadas de forma a interferir nos dispositivos vizinhos, como o caso do sistema de ignição.

Os transientes conduzidos gerados pelos componentes elétricos embarcados ao se propagarem através dos condutores, sejam fios ou trilhas de circuito impresso, podem irradiar em forma de onda eletromagnética. Como regra geral um condutor poderá irradiar energia eficientemente como uma antena se o comprimento deste condutor for menor que um décimo do comprimento de onda do sinal que o mesmo conduz (PAUL, 1992). Ou seja, a frequência do sinal de interferência e as dimensões físicas do condutor em termos de comprimento de onda é que irão determinar a possibilidade de ocorrer emissão de uma IEM irradiada. A expressão (2.1) apresenta a relação entre o comprimento do condutor L e o comprimento de onda λ onde um condutor começa a apresentar um comportamento de uma antena eficiente:

$$L \leq \frac{1}{10} \cdot \lambda \quad (2.1)$$

De forma inversa, pode-se fazer uma análise para o caso do acoplamento de uma IEM irradiada através das trilhas de circuito impresso e da fiação. Nesse caso os condutores atuam como uma antena que “capta” o ruído de forma a converter a IEM em uma tensão ou corrente elétrica conduzida. Um condutor torna-se uma antena receptadora eficiente, a medida que seu comprimento L passe a ter um tamanho próximo ou maior que $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda λ (PAUL, 1992), expressão (2.2) apresenta essa relação:

$$L \geq \frac{1}{4} \lambda \quad (2.2)$$

A grande maioria de problemas observados em testes de imunidade a campos eletromagnéticos em veículos automotores ocorre na faixa de 20MHz a 200MHz (NOBLE, 1994). A fiação elétrica contida em um veículo em grande parte possui comprimentos compreendidos entre 0,30 a 4,0 metros. Observa-se que esses comprimentos são próximos a um quarto do comprimento de onda para a faixa de frequência de 20MHz a 200MHz . A expressão (2.3) sumariza a faixa de frequência em que os comprimentos dos condutores se situam.

$$\frac{1}{4} \lambda_{20Mhz} \leq L \leq \frac{1}{4} \lambda_{200Mhz} \quad (2.3)$$

Acima de 200 MHz a fiação passa a ser uma antena com muitas perdas, no entanto as trilhas de circuitos impressos, presentes nos circuitos eletrônicos embarcados, passam a ser vista pela fonte IEM como uma antena, pelas mesmas questões citadas. Logo existem possibilidades de acoplamento de energia diretamente aos circuitos eletrônicos para frequência acima de 200 MHz.

Ao analisar o ambiente eletromagnético no qual o veículo estará imerso, observa-se que as fontes de IEM podem ocorrer a curta distância, menores de 2 metros, ou mesmo no interior da carroceria propriamente dito como aparelhos de telefonia celular, rádios de comunicação, computadores, etc. Porém a mobilidade característica dos veículos os expõem à fontes de IEM que podem estar a algumas dezenas de metros ou quilômetros, como ERB's (estações rádio base de telefonia celular), estações de rádio e televisão, descargas atmosféricas etc. De forma geral, as fontes de IEM de menor potência ou intensidade de campo podem estar mais próximas da eletrônica embarcada do que aquelas com maior potência. Portanto, levando-se em conta a distância da fonte ao equipamento vítima, fontes de baixa potência podem ser mais agressivas em termos eletromagnéticos que fontes de maior potência localizadas a grandes distâncias.

Para ilustrar os efeitos entre a potência de uma fonte de campo em relação à distância da mesma ao equipamento vítima, consideraremos uma antena isotrópica sem perdas

irradiando uma potência (P_T) em todas as direções. A intensidade do campo elétrico a uma distância (d) dessa antena pode ser dada pela expressão (2.4) (PAUL, 1992):

$$|\vec{E}| = \frac{\sqrt{60P_T}}{d} \quad (2.4)$$

Onde a potência (P_T) é dada em Watts, a distância (d) em metros e a intensidade de campo elétrico (\vec{E}) em V/m.

A equação (2.4) é válida para a condição de campo distante (distâncias maiores que um sexto do comprimento de onda irradiada), com o campo comportando-se como uma onda plana uniforme. Para distâncias menores o campo é mais complicado e geralmente com uma intensidade maior do que a expressa pela equação (2.4). Essa última situação caracteriza uma condição de campo próximo, com predomínio ou do campo elétrico ou do campo magnético, que podem ser então tratados de forma desacoplada, que não é o foco desse desenvolvimento.

Em (NOBLE, 1994) é apresentado um exemplo que será aplicado na expressão (2.4) para ilustrar a relação de potência e distância de uma fonte de IEM. Para o primeiro exemplo consideraremos o caso da antena isotrópica a uma distância de 1 km, com potência de 100 W. Nessa situação, verifica-se que a intensidade de campo elétrico experimentado pelo o veículo será aproximadamente 0,08 V/m, como apresentado na expressão (2.5).

$$|\vec{E}| = \frac{\sqrt{60 \cdot 100}}{1000} = 0,08 \text{ V / m} \quad (2.5)$$

Agora considerando outra fonte de IEM com 25 W de potência, a uma distância de 1 metro, nesse caso a eletrônica embarcada estará sujeita a uma intensidade de campo elétrico de 38,73 V/m, como visto na expressão (2.6).

$$|\vec{E}| = \frac{\sqrt{60 \cdot 25}}{1} = 38,73 \text{ V / m} \quad (2.6)$$

Logo observa-se que a proximidade da eletrônica à fonte de IEM pode submeter os sistemas eletrônicos a intensidades consideráveis de campo elétrico, mesmo a potência da fonte de IEM sendo relativamente baixa. Isso demonstra que o ambiente eletromagnético de um veículo em síntese é bastante complexo, pois o mesmo pode estar muito próximo a fontes de amplitudes elevadas ou mesmo ter em seu interior fontes de baixa intensidade, mas não menos agressivas sob o aspecto eletromagnético.

Para garantir a funcionalidade de todos os sistemas embarcados as indústrias automobilísticas fazem testes tanto individualmente nos componentes quanto nos veículos completos com todos os dispositivos montados e operantes. Os testes de imunidade nos veículos são normalmente conduzidos em grandes câmaras semianecóicas, com campos eletromagnéticos da ordem de 100 V/m, com o veículo a uma distância variando de 3 a 9 metros da antena e com frequências de 200 MHz a 1 GHz de forma a simular condições mais severas que aquelas que um veículo pode verdadeiramente encontrar quando em serviço. Os testes realizados pelas indústrias são balizados por sistemas normativos onde são definidos critérios padronizados para a realização dos experimentos.

2.2.1 Legislação Sobre CEM na Indústria Automobilística

Os esforços relacionados à CEM na indústria automotiva tiveram seu início a partir do dia em que foi instalado o primeiro rádio em um automóvel (ANDERSEN, 2006). O SAE (*Society of Automobile Engineers*), em 1947, publicou um documento de uma página onde o foco era a redução do ruído do sistema de ignição que interferia na recepção dos rádios (ANDERSEN, 2006). O surgimento da televisão fez com que historicamente os automóveis fossem os primeiros produtos industriais a serem submetidos a uma regulamentação de CEM. Em 1952 o parlamento britânico determinou que os sistemas de ignição dos veículos daquela época não causassem interferências em aparelhos de televisão em um raio de 10 metros a partir do veículo (NOBLE, 1994). A partir da década de 70, com a introdução de sistemas eletrônicos embarcados nos veículos, surgiu a necessidade de compreender melhor os fenômenos eletromagnéticos e buscar medidas sistemáticas de controlar a CEM, uma vez que a eletrônica estava cada vez mais atrelada às questões de segurança.

As normas de CEM no setor automotivo podem ser classificadas em industriais, nacionais, internacionais e governamentais. As normas nacionais e internacionais são feitas por organizações não governamentais onde o foco é estabelecer procedimentos padrões de testes e estabelecer critérios de aceitação de normas industriais dos próprios fabricantes. Os fabricantes, dentro de sua experiência na condução dos projetos de novos produtos, podem criar procedimentos adequados para testes, não fugindo de certas recomendações da normalização padrão. As normas governamentais surgem como imposições para que os produtos industriais estejam obrigatoriamente dentro de condições previamente estabelecidas. Um exemplo de normalização governamental é a diretiva 72/245/EEC e complementada pela 94/54/EC de 2002, vigentes na Comunidade Européia. Essa diretiva visa estabelecer critérios e níveis de suscetibilidade a campos eletromagnéticos. O não cumprimento às exigências expressas nessas diretivas implica no impedimento da comercialização dos veículos e de seus componentes nos territórios cobertos pelas diretivas.

Muitos países possuem suas próprias organizações de desenvolvimento de normalização de CEM para o setor automotivo. Dentre as organizações mais expressivas nesse setor e que muitas vezes ditam regras que são incorporadas por outros países está o SAE, que é uma organização dos Estados Unidos da América com atividade no ramo automotivo desde a década de 40.

Internacionalmente duas organizações têm uma relevância mais expressiva: a Organização Internacional de Padronização (ISO) e a Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC). Dentro do IEC existe o Subcomitê Internacional em Rádio Interferência (CISPR/D) que tem como finalidade, dentre outras, estabelecer métodos de medição de interferências do sistema de ignição e de outros componentes elétricos embarcados nos veículos automotores e também equipamentos industriais que utilizam motores e geradores com combustão interna. A ISO tem as atribuições de estabelecer metodologia de testes mais focados no produto em si, como o que acontece para testes de suscetibilidade eletromagnética nos veículos.

Muitas outras normas têm sido publicadas ao longo dos anos por várias agências regulamentadoras. No apêndice A, de forma sumarizada, são citadas as principais normas relacionadas a CEM em automóveis de vários países e de órgãos internacionais. Atualmente no Brasil, pela inexistência de normalização específica relacionada a CEM no âmbito automotivo, seguem-se as normas ISO 11451 e 11452. Em função do objetivo do projeto de pesquisa ao qual esta dissertação está submetida, será focado no item seguinte, a norma ISO 11451 – (*Road Vehicle – Vehicle teste methods for eletrical disturbance from narrowband*

radiated electromagnetic energy – Part 2), que normaliza os testes de imunidade eletromagnética a campos irradiados.

2.3 Metodologia de Teste ISO 11451-2, 2001

A norma ISO-11451 se subdivide em 04 partes, sendo elas:

Parte 01: Especifica as definições gerais, tais como terminologias, procedimentos, métodos de testes, classificação de desempenho etc.;

Parte 02: Especifica os métodos para testes de imunidade eletromagnética para distúrbios provenientes de fontes externas ao veículo;

Parte 03: Define os testes relacionados a fontes de irradiação internas ao veículo;

Parte 04: Especifica um teste que consiste na indução direta de um sinal de distúrbio na fiação elétrica do veículo para avaliar a susceptibilidade a interferências conduzidas.

Os critérios de testes dependem das características construtivas dos subsistemas e das funções os quais desempenham. Por exemplo, um componente que está relacionado diretamente a questões de segurança ou operação do veículo será testado tanto em relação à susceptibilidade eletromagnética quanto a emissão de interferências irradiadas (BIENERT, 2004). Os componentes eletrônicos embarcados em um veículo são testados isoladamente e também integrados aos demais dispositivos, onde são submetidos a severas condições de exposição aos campos eletromagnéticos irradiados.

A (ISO 11451-2, 2001) recomenda que o veículo completo, com todos os aparatos eletrônicos embarcados e operantes, seja submetido à incidência de um campo eletromagnético, simulando uma condição extremamente severa de exposição. Isso expõe os dispositivos eletrônicos a níveis intensos de campo elétrico, com uma larga faixa frequência. A (ISO 11451-2, 2001) recomenda níveis de campos eletromagnéticos de até 100 V/m com varredura de frequência entre 200 MHz a 1 GHz. O fabricante pode adotar valores tanto de amplitude quanto de faixa de frequência dentro dos limites recomendados dependendo das

instalações, do tipo de teste específico e experiências passadas adquiridas, desde que sejam registrados os valores adotados nos relatórios pertinentes.

O teste de incidência de campo pode ser realizado em duas formas de ambientes: a primeira fazendo o uso de um campo aberto (OATS) e a segunda utilizando câmaras semianecóicas (CSA).

a) OATS – Teste em Campo Aberto (*Open Area Test Site*)

A utilização de OATS, teste realizado em área aberta, na grande maioria dos casos é restringida pelo fato de que a geração de campos eletromagnéticos intencionais em ambientes abertos está sujeita a limites impostos por organizações regulamentadoras. No Brasil, a resolução da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) restringe a emissão de ondas eletromagnéticas intencionais em campo aberto para faixa de frequência de 200 MHz a 1 GHz a amplitudes máximas entre 150 $\mu\text{V/m}$ a 500 $\mu\text{V/m}$, logo valores muito abaixo dos 100 V/m recomendados pela (ISO 11451-2, 2001). Para contornar os limites regulamentados de emissão de campos eletromagnéticos, utiliza-se uma câmara semianecóica (CSA).

b) CSA - Câmaras Semianecóicas

A CSA constitui-se de um ambiente de teste blindado, que é basicamente uma estrutura fechada composta de uma parte externa metálica e com as paredes e o teto recoberto internamente por material absorvedor de sinais de rádio frequência (RF). Esse material normalmente tem a forma piramidal, mas podendo ter tamanhos e formas geométricas diferentes em função da frequência e potência dos campos a serem absorvidos e da normalização a ser seguida para o projeto da CSA. Uma CSA basicamente tem o objetivo de fazer com que campos elétricos gerados em seu interior não “vazem” para o ambiente externo e simule as características de propagação em um campo aberto por não permitir reflexões de onda, devido à absorção do revestimento absorvedor. Uma vantagem da CSA em relação ao OATS é o fato de que o ambiente interno da CSA está imune às interferências do meio externo, possibilitando que os experimentos sejam realizados sem a interferência de sinais espúrios e indesejados. Os materiais absorvedores de RF utilizados no recobrimento das paredes internas da CSA podem ser dos seguintes tipos (Martin Wiles, 2007):

- a) Absorvedor de Microondas Piramidal
- Constituído de espuma grafitada com o intuito de promover perdas elétricas na onda incidente;
 - Utilizado para altas frequências, entre 100 MHz – 18 GHz;
- b) Cobertura de Ferrite
- Camada de ferrite de 5 a 6 mm para promover perdas magnéticas;
 - Aplicado, normalmente, para baixas frequências;
- c) Absorvedores Híbridos
- Utilizado tanto para a absorção de campos elétricos quanto magnéticos;
 - Aplicado em frequências entre 30 MHz – 18 GHz

A Figura 2.3 apresenta de forma ilustrativa uma câmara semianecóica tendo em seu interior um veículo e uma antena para irradiação do campo eletromagnético.

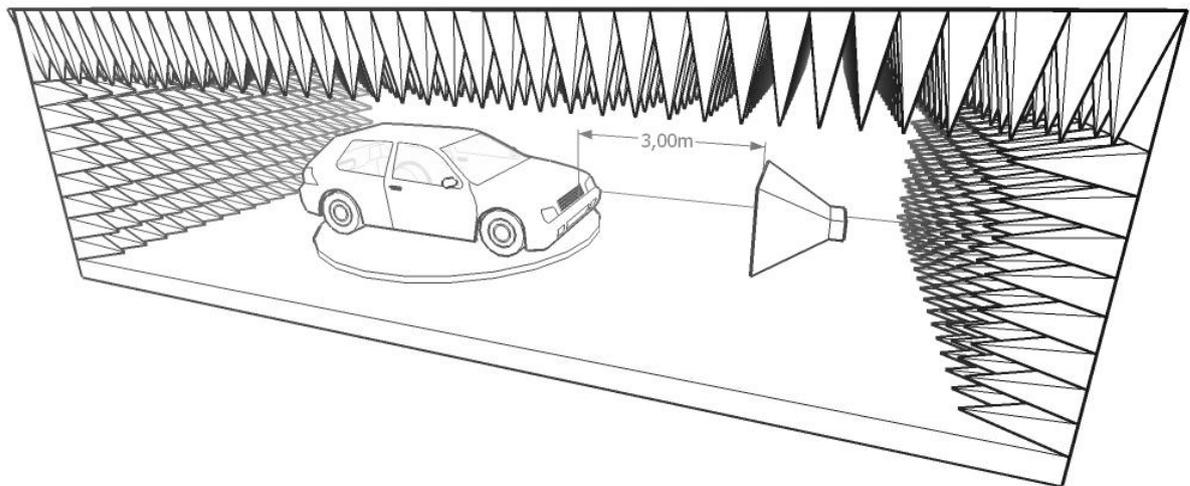


Figura 2.3– Desenho ilustrativo em corte de uma CSA conforme ISO-11451

2.3.1 Procedimento dos Testes Conforme ISO-11451 – Parte 2

O procedimento de teste da (ISO 11451-2, 2001), basicamente, consiste em testar sob a incidência de campos eletromagnéticos o funcionamento de todos os dispositivos e sistemas do veículo, tais como: fechamento de vidros, aceleração, freios, comunicação, computadores de bordo e outros mais que estiverem incorporados, além de testar o veículo em condição dinâmica de funcionamento. Sistemas de roletes hidráulicos e de exaustão do ar são responsáveis para que o veículo simule condições de marcha e de frenagens dentro da câmara semianecóica simulando seu movimento, porém de maneira estática. O veículo nessas condições experimenta uma intensidade de campo elétrico da ordem de 100 V/m variando a faixa de frequência entre 200 MHz e 1 GHz. Como a amplitude do campo elétrico no interior da CSA é elevada, sistemas de circuito fechado de imagem e controle remoto dos dispositivos embarcados auxiliam o especialista na execução dos testes.

A partir da observação do comportamento dos sistemas durante e após serem submetidos à exposição dos campos, o funcionamento dos dispositivos são então classificados em cinco classes que vão de A a E, onde cada classe refere-se ao comportamento operativo de cada sistema testado como se segue:

- Classe A: Todas as funções de um dispositivo ou sistema tiveram seu desempenho conforme projetado durante e após ser submetido ao distúrbio.
- Classe B: Todos os dispositivos desempenharam suas funções conforme o esperado durante a exposição ao campo, sendo que um ou mais estiveram no limite da tolerância especificada;
- Classe C: Um ou mais dispositivos ou funções apresentaram deficiência em seu desempenho, voltando ao normal automaticamente com o fim da exposição aos distúrbios;
- Classe D: Um ou mais dispositivos funcionaram devidamente com a exposição aos campos. Os mesmo dispositivos tiveram que ter intervenção para o retorno de suas funções com o fim dos testes;

- Classe E: Um ou mais dispositivos não desempenharam suas funções durante e após a exposição aos campos. Após os testes os mesmos tiveram que ser definitivamente reparados ou substituídos.

2.4 Esquema do Projeto de Pesquisa

2.4.1 Características do LACE

O LACE é um laboratório de provas eletromagnéticas composto por uma câmara semianecóica e uma série de equipamentos como antenas, moduladores de frequências, amplificadores etc. De forma geral a seguir estão relacionados alguns dos itens que compõem essa estrutura laboratorial e que foram utilizados pelas equipes de medição UFMG/Fiat (SANTOS, 2007):

a) Câmara semianecóica:

- Dimensões externas: 6,5 m comprimento x 5,5m largura x 3,3m altura;
- Espaço útil com absorvedores: 5m comprimento x 3,8m largura x 2,4m altura;
- 1 porta blindada de 0,9m largura x 2,1m altura operada manualmente;
- 1 porta blindada de 3 m largura X 2,5 m altura operada pneumáticamente;

b) Conjunto de Susceptibilidade Irradiada:

Composto por antenas e amplificadores com capacidade de irradiar campos eletromagnéticos de até 200 V/m a um metro do ponto de medição na faixa de 200 MHz a 1 GHz. A Figura 2.4 apresenta a figura da antena corneta utilizada nos experimentos de medição realizados pela equipe da UFMG/Fiat (SANTOS, 2007).

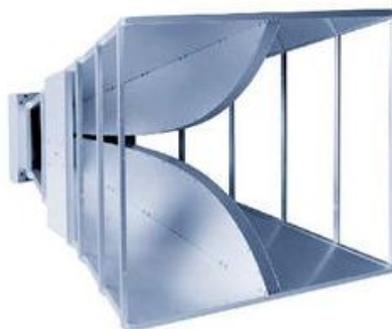


Figura 2.4 – Detalhe da antena corneta 3106 da ETS-Lindgren

c) Conjunto de Medição

Composto por medidores isotrópicos de campos eletromagnéticos capaz de identificar qualitativamente e quantitativamente um campo eletromagnético no espaço. A antena isotrópica utilizada é a FP 5000, Figura 2.5.



Figura 2.5 – Detalhe da antena isotrópica FP-5000 da ETS-Lindgren

A antena isotrópica FP-5000 é uma ponta de prova para medição de campo elétrico isotrópico de 1 a 300 V/m operando numa ampla banda de rádio frequência entre 10kHz a 1GHz. Essa ponta de prova utiliza isolamento ótica para não haver interferências na transmissão do valor de campo medido. A FP-5000 mede o campo nos três eixos x, y, z e realiza um cálculo adicional com os valores lidos de forma a fornecer um valor de campo pontual. Os valores de campo medidos individualmente nos três eixos também são possíveis de serem obtidos.

2.4.2 Características da Eletrônica Embarcada em Veículos

Um automóvel, independente do fabricante e do modelo, tem uma concentração de sensores e centrais eletrônicas de processamento na parte frontal. Pode-se considerar de forma geral que um total de 95% de toda eletrônica embarcada fica situada nessa região. São centrais de injeção, auto-rádios, centrais eletrônicas e outros dispositivos que em sua maioria ficam na parte frontal do veículo. Vale ressaltar ainda que no geral as centrais de processamento e outros dispositivos relacionados à segurança ficam confinados em sua maioria no compartimento do motor. Essas observações e características serão fundamentais para justificar a utilização dos modelos de veículos propostos para o projeto de pesquisa.

A fim de ilustrar a forma como está distribuída a eletrônica embarcada nos veículos é apresentada a Figura 2.6, onde é visível a concentração dos mais diversos componentes na região frontal de uma estrutura veicular convencional.

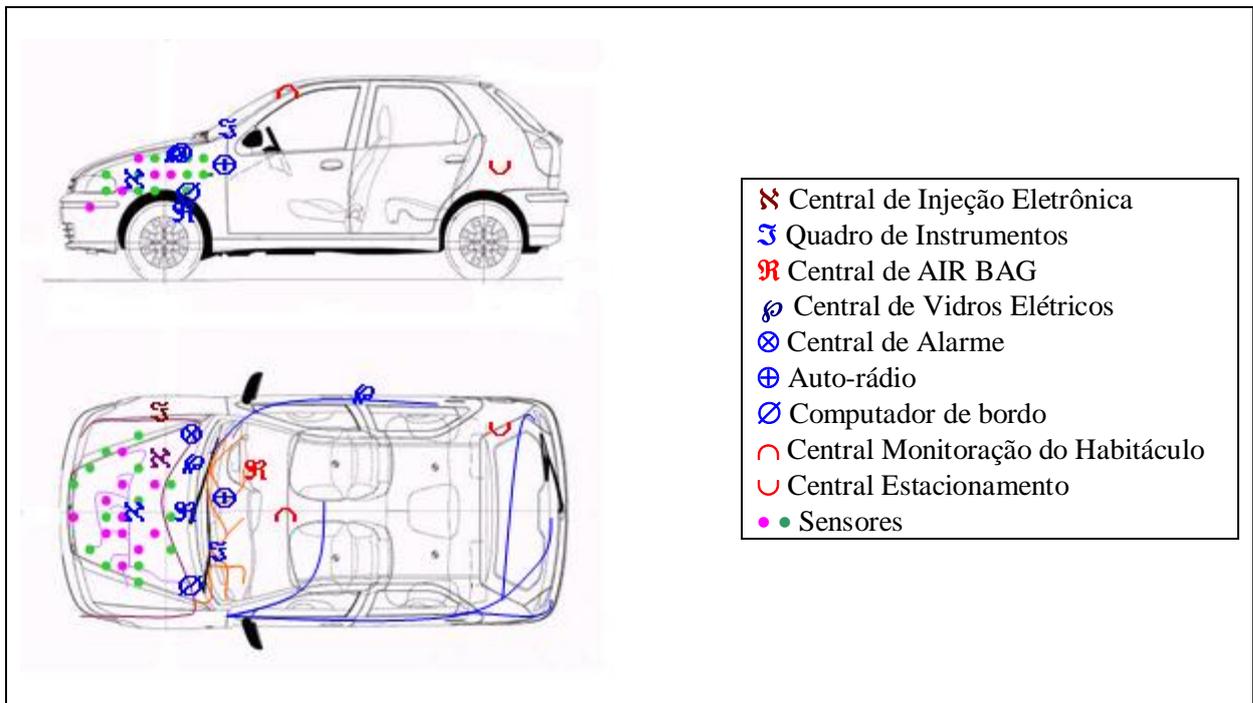


Figura 2.6 – Esquema da disposição dos sensores e centrais eletrônicas em um veículo⁵

⁵ Figura utilizada na proposta de pesquisa apresentada ao CNPq pela Fiat Automóveis – Betim/MG - Brasil

2.4.3 Configuração de Teste Proposta pelo Projeto de Pesquisa

Tendo-se em vista que a câmara semianecóica do LACE não suporta um veículo completo juntamente com todos os dispositivos necessários para realização de provas de imunidade eletromagnética, foi necessário estudar adaptações. Essas adaptações no arranjo tanto do objeto sob teste, o carro, quanto de outros equipamentos, como a antena, são basicamente o foco principal no qual se basearam o trabalho conjunto no projeto de pesquisa.

Como apresentado no tópico 2.4.2, a maioria dos dispositivos eletrônicos fica concentrada na parte frontal do veículo e mais precisamente e com uma maior quantidade no compartimento do motor. Isso é importante de ser ressaltado porque a metodologia aplicada no projeto de pesquisa como um todo, consiste em aproveitar essa filosofia de distribuição da eletrônica nos veículos de forma que se pudesse idealizar a utilização de um veículo seccionado. Esse veículo seccionado preservaria em tese a parte frontal do veículo e de forma funcional, inclusive com possibilidade de dinamismo do sistema de tração. O ganho com essa adaptação ao protótipo sob teste seria uma redução substancial no volume físico do veículo. Isso permitiria que tanto o veículo seccionado quanto outros equipamentos, como a antena, pudessem ser comportados no interior da câmara semianecóica de tamanho reduzido.

Ainda sim com a redução do volume do protótipo sob teste, ainda foi necessário reduzir a distância efetiva entre esse e a antena. Na configuração da prova de imunidade da (ISO 11451-2, 2001) a distância entre o veículo e a antena é de 3 metros. No arranjo proposto pelo projeto de pesquisa, essa distância passou para 1,5 metros. Essa proximidade da antena com o objeto espalhador inclusive foi tema do trabalho (ADRIANO, 2005) e (ADRIANO, 2007), frutos do projeto de pesquisa. Em linhas gerais concluiu-se nesses trabalhos que não é relevante, neste caso, o acoplamento entre a antena e o objeto espalhador (o veículo), e que, portanto, essa proximidade não afetaria as medições. O não acoplamento entre fonte e objeto espalhador também foi fundamental para que os trabalhos de cálculo de campo pudessem ser conduzidos com o uso de uma onda plana uniforme como fonte, como poderá ser visto mais adiante.

Na Figura 2.7 está apresentada a comparação entre o esquema de testes proposto pela (ISO 11451-2, 2001) com o que é proposto pelo projeto de pesquisa no qual se baseia essa dissertação, onde a câmara semianecóica de dimensões reduzidas do LACE acomodaria a parte frontal do veículo e a antena posicionada a uma distância de 1,5 metros.

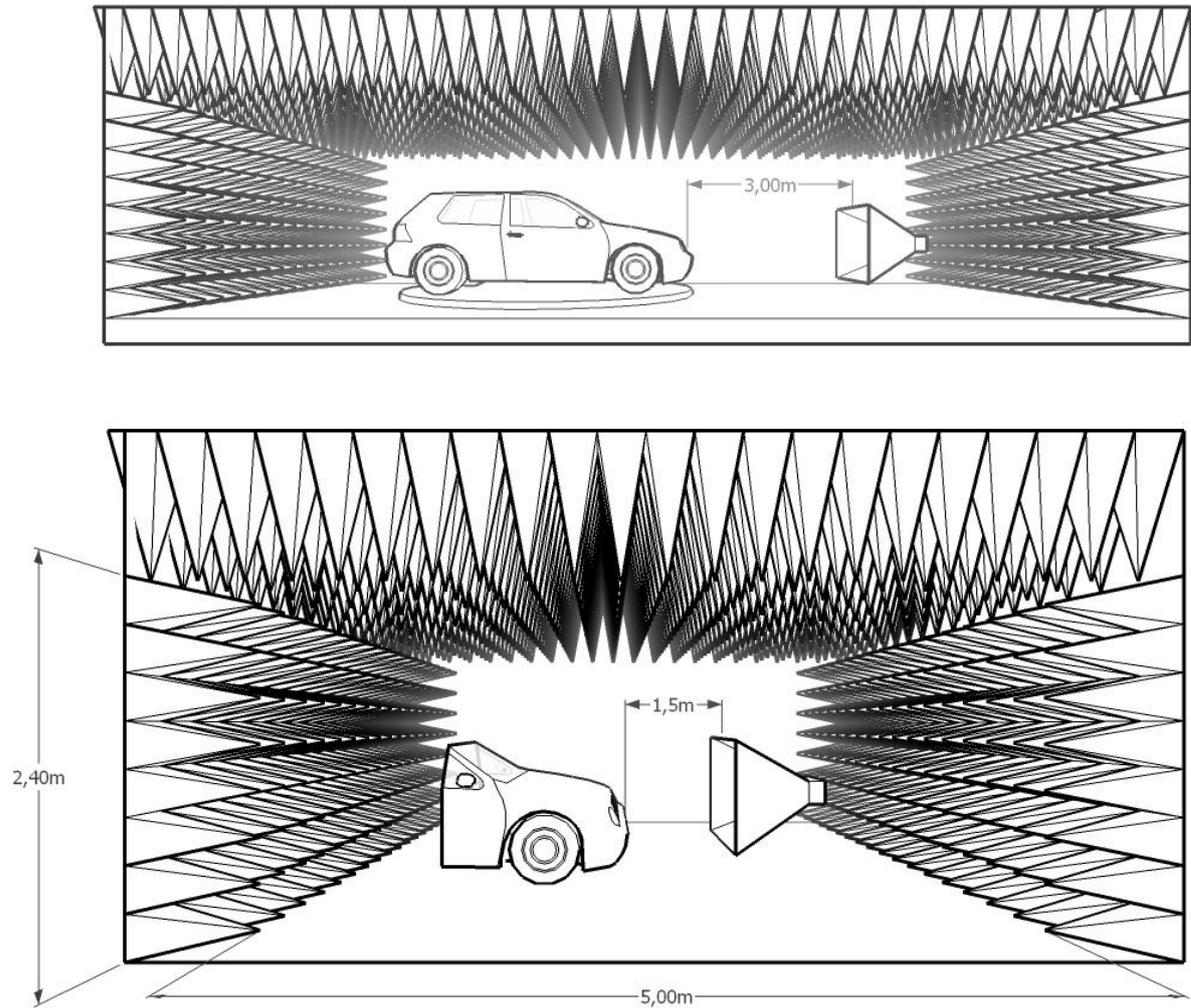


Figura 2.7 – Comparação entre o esquema ISO e o proposto pelo projeto de pesquisa no LACE

Dentro do que foi exposto nesse item em específico foram desenvolvidas todas as atividades das entidades envolvidas no projeto, incluindo este trabalho.

3 METODOS NUMÉRICOS APLICADOS A CEM

Os métodos numéricos são aplicados em várias disciplinas da indústria automotiva, como no caso de deformações mecânicas, simulações aerodinâmicas e outras especialidades mais concentradas na área de mecânica. Essas ferramentas surgem como importantes laboratórios virtuais e são uma alternativa tecnológica de auxílio na composição das práticas laboratoriais (LIMA, 2007). Basicamente os métodos numéricos podem ser vistos como ferramentas de simulação – que consiste em um programa de computador que modela alguns aspectos do mundo real. Os simuladores apresentam resultados para análise que podem ser comparados com experimentos reais. Possibilita a demonstração de experiências com resultados, pode envolver equipamentos de alto custo e reduz significativamente o custo de determinados experimentos (LIMA, 2007).

Não diferente das outras disciplinas onde o cálculo numérico é aplicado, os avanços em CEM têm sido um aliado na redução de demanda de tempo experimental e promovendo redução de custos com correções em projetos nas fases mais preliminares do desenvolvimento.

A possibilidade de antever os fenômenos eletromagnéticos, utilizando modelos virtuais, é fundamental para a averiguação de problemas que só seriam constatados através dos testes convencionais com a utilização de protótipos. Porém os protótipos de um veículo só surgem nas fases avançadas do desenvolvimento (DE LEO e outros, 2001) o que tornam as correções dos problemas difíceis e onerosas. O conhecimento prévio do comportamento eletromagnético de uma estrutura veicular nas fases iniciais de um projeto possibilita aos projetistas identificar as concentrações de campo em regiões em que um determinado dispositivo seria instalado (P. Young, 1999_2). Isso torna possível adotar medidas corretivas como blindagens mais eficientes, alterar rotas de cabearmentos e posições de dispositivos de importância relevante, como aqueles destinados à segurança.

3.1 Visão Geral dos Métodos de Cálculo de Campo

3.1.1 Testes de Suscetibilidade e a Teoria Eletromagnética

Os testes de suscetibilidade eletromagnética caracterizam-se pela incidência de um campo eletromagnético no objeto sob teste. No caso dos testes automotivos o veículo sob teste é iluminado por uma fonte de campo gerada a partir de uma antena. Esse tipo de problema, sob o ponto de vista da teoria eletromagnética, caracteriza-se por dois fenômenos distintos, irradiação e espalhamento de onda.

Irradiação:

Na teoria qualquer dispositivo que esteja conduzindo uma corrente elétrica variável no tempo desprende de forma eficiente ou não uma parcela da energia conduzida através de ondas eletromagnéticas para o ambiente.

Espalhamento:

O fenômeno de espalhamento pode ser visto como a perturbação ou uma variação da impedância do meio onde a onda eletromagnética irradiada está se propagando. Uma onda eletromagnética é a interação dos campos elétricos \vec{E}_i e dos campos magnéticos \vec{H}_i variando no tempo. Essa onda ao sofrer uma perturbação na impedância do meio, não é dada mais por \vec{E}_i e \vec{H}_i , mas sim pelos campos resultantes \vec{E}_R e \vec{H}_R . Isso decorre em função da onda incidente interagir com o objeto espalhador de forma que o campo resultante satisfaça as condições de contorno entre o meio e o objeto. Essa perturbação da onda viajante é o fenômeno de espalhamento. A relação entre os campos incidente, resultante e espalhado é a seguinte:

$$\vec{E}_R = \vec{E}_i + \vec{E}_s \quad (3.1)$$

$$\vec{H}_R = \vec{H}_i + \vec{H}_s \quad (3.2)$$

Onde \vec{E}_i e \vec{H}_i são os campos incidentes; \vec{E}_s e \vec{H}_s os campos espalhados; \vec{E}_R e \vec{H}_R os campos resultantes.

3.1.2 Métodos Numéricos de Cálculo de Campo

Como pôde ser observado no tópico anterior, o teste de suscetibilidade eletromagnética irradiada consiste em um problema de irradiação e espalhamento de onda, onde o foco, sob o ponto de vista de cálculo de campo, é encontrar o valor do campo resultante dessa interação. O comportamento de problemas dessa natureza resulta em equações diferenciais parciais de segunda ordem cuja solução analítica só é possível para uma pequena gama de problemas. Normalmente soluções analíticas se aplicam a problemas de geometria simples que apresentam alguma simetria e condições de contorno bastante definidas, o que se distâcia em muito de problemas reais. Para problemas reais são raros aqueles que podem ser resolvidos por métodos analíticos (SADIKU, 2001). Normalmente os problemas eletromagnéticos do mundo real caem nas seguintes condições:

- As equações parciais diferenciais que regem o problema não são lineares;
- A região ou a geometria são complexas e sem simetria;
- As condições de contorno são dependentes do tempo;
- O meio não é homogêneo nem isotrópico.

Os métodos numéricos surgem então como uma alternativa para a solução dos problemas complexos tais como acontecem na realidade. Porém as técnicas numéricas exigem grandes recursos computacionais como capacidade de processamento, memória para armazenar as sucessivas soluções do problema e grande demanda de tempo de processamento. Essa exigência computacional acontece em maior ou menor grau dependendo do tipo de método numérico utilizado, da complexidade geométrica do problema e dimensões do modelo em relação à frequência ou comprimentos de onda dos campos envolvidos. Com o constante avanço tecnológico dos recursos computacionais os métodos numéricos têm permitido uma grande aplicação em CEM, com excelentes e promissores resultados.

Em função da necessidade de grandes recursos computacionais por parte das técnicas numéricas tem sido cada vez mais abordado a utilização de processamentos paralelos, onde vários processadores ficam encarregados de efetuar os cálculos demandados na solução dos problemas de maior complexidade. Um trabalho com excelentes resultados é apresentado em (Rubinstein et al, 2003), em que o programa de cálculo de campo *Numerical Electromagnetic Code* (NEC), baseado no método dos momentos (MoM), é otimizado para se trabalhar com vários processadores paralelos. Observa-se em (Rubinstein et al, 2003) que o processamento paralelo reduz enormemente a demanda de tempo para simulação, a medida que se aumenta a quantidade de processadores para efetuar o mesmo cálculo de uma estrutura veicular complexa.

Existem várias técnicas numéricas aplicadas na solução de equações diferenciais parciais que regem os problemas eletromagnéticos. Cada método possui particularidades que são ideais na solução de determinadas classes de problemas, não tendo por sua vez como considerar de forma generalizada que um método específico seja melhor e mais eficiente. Em função da particularidade de um método em se mostrar mais eficiente na solução de determinados problemas surgem técnicas numéricas híbridas. Os métodos híbridos são a combinação de dois ou mais métodos numéricos na expectativa de se buscar soluções utilizando o melhor de cada metodologia na solução de partes específicas do domínio do problema e concomitantemente reduzindo a demanda computacional, tempo de processamento e aumentando a exatidão e confiabilidade dos resultados. As técnicas de forma geral podem ser divididas em dois grupos principais (JITHESH; PANDE, 2003):

- a) Técnicas aplicadas a partir das equações integrais
- b) Técnicas aplicadas a partir das equações diferenciais

3.1.3 Técnicas Integrais

As técnicas numéricas integrais foram desenvolvidas para solucionarem os problemas físicos a partir da modelagem em termos de equações integrais. Entende-se por equações integrais aquelas que envolvem uma função desconhecida sob o sinal de integral (SADIKU, 2001). Os métodos numéricos baseados na modelagem de equações integrais mais

utilizados são o Método dos Momentos (MoM) e o Método das Equações Integrais de Fronteira (BEM).

Método dos Momentos (MoM)

Esse método consiste basicamente em transformar a equação integral que governa o problema em análise em um sistema de equações algébricas através da aproximação da incógnita usando funções de base, as quais são multiplicadas escalarmente por funções de ponderações. O MoM tem sido amplamente aplicado a problemas de radiação (antenas) e espalhamento.

Método das Equações Integrais de Fronteira (BEM)

O BEM é uma derivação do MoM aplicado na solução de equações integrais de superfície, a diferença básica entre ambos é que no BEM as funções de base e ponderação são definidas apenas na superfície da fronteira.

3.1.4 Técnicas Diferenciais

As técnicas diferenciais ou métodos de domínio são técnicas numéricas muito utilizadas na solução de problemas fechados por apresentarem uma formulação simples, mesmo para problemas compostos por materiais heterogêneos, não lineares ou anisotrópicos. Para solução de problemas abertos utilizam-se fronteiras fictícias onde é imposta uma condição de contorno absorvedora ou materiais perfeitamente casados. Os principais métodos que utilizam as técnicas diferenciais são o Método de Diferenças Finitas (FDM) e o Método dos Elementos Finitos (FEM).

Método de Diferenças Finitas (FDM)

O FDM baseia-se na aproximação dos operadores de diferenciação por uma simples operação de subtração dos valores da função nos pontos de interesse seguida de

uma divisão pelo intervalo de separação dos pontos utilizados. Este procedimento permite transformar uma equação diferencial com finitos graus de liberdade em um sistema de equações algébricas cuja solução representa uma aproximação para a solução do problema original.

Método dos Elementos Finitos (FEM)

O FEM é um método bastante eficiente na solução de equações diferenciais parciais. Esse método possui muitas vantagens, como por exemplo, o fato de permitir uma representação mais eficiente de domínios compostos por vários materiais diferentes. O programa HFSS utilizado nas simulações deste trabalho utiliza o FEM.

O FEM baseia-se na minimização de um funcional energético que representa a energia total associada a um sistema em particular. Uma forma simples de representar o funcional energético pode ser visto na expressão (3.3). (PORTER; DAWSON, 1994):

$$F = \int_V \frac{\epsilon |\vec{E}|^2}{2} + \frac{\mu |\vec{H}|^2}{2} - \frac{\vec{J} \cdot \vec{E}}{2j\omega} dV \quad (3.3)$$

Onde (ω) é a frequência de oscilação dos campos, (V) é o volume espacial do problema.

Os dois primeiros termos na equação (3.3) representam a energia associada com os campos elétricos \vec{E} e magnéticos \vec{H} , respectivamente, enquanto o terceiro termo refere-se a perda de energia associada à densidade de corrente elétrica \vec{J} no material. Qualquer solução usando o funcional energético, como o apresentado na equação (3.3), requer que a energia do sistema seja minimizada.

A dinâmica do FEM baseia-se na discretização do espaço em pequenas regiões e então resolver as equações de Maxwell em cada ponto e sub-regiões do domínio do problema. De forma geral a utilização do FEM em qualquer problema pode ser resumida conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.1:

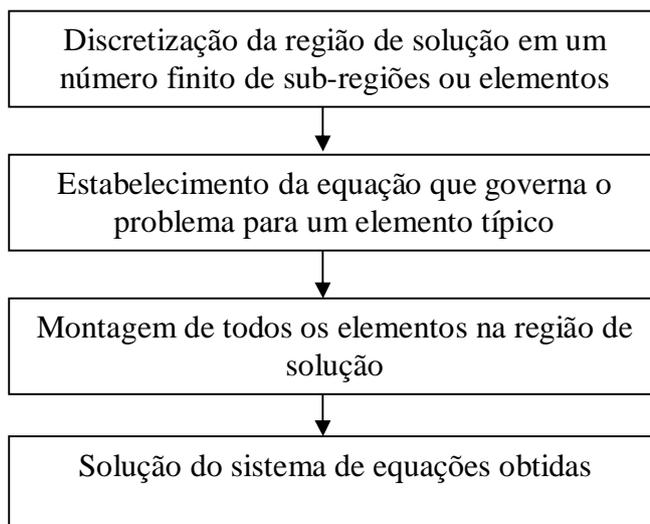


Figura 3.1 – Fluxograma dos passos de solução empregando o FEM

3.2 Programa de Cálculo de Campo HFSS

Nas simulações realizadas neste trabalho, foi utilizado o programa de cálculo de campo *High Frequency Structure Simulator* (HFSS) da *Ansoft*, que utiliza o FEM. No HFSS a geometria do problema é automaticamente dividida em um grande número de tetraedros, onde cada tetraedro é um elemento que consiste em uma pirâmide de quatro faces. Esse conjunto de elementos refere-se à malha dos elementos finitos. Nesses elementos as funções vetoriais do campo são aplicadas e interpoladas de forma a determinar o comportamento do campo em toda geometria do problema em análise.

O ponto chave para obter uma solução estável e com maior exatidão está no processo de malhamento e nas definições dos critérios de convergência estabelecidos para a convergência da solução do problema. A exatidão de uma solução depende do tamanho dos tetraedros na região em análise. Em termos gerais, soluções baseadas em malha densas, com milhares de elementos, apresentam resultados mais exatos que aquelas baseadas em um malhamento mais esparsa e com relativamente poucos elementos. Para gerar uma descrição precisa dos campos eletromagnéticos, cada elemento deve ocupar uma determinada região de forma que o processo de interpolação não introduza erros significativos nos resultados finais. No entanto, a geração da solução no FEM envolve a inversão de matrizes com tantos elementos quanto o conjunto de nós de cada tetraedro que forma a malha. Para malha com

números elevados de elementos, a inversão da matriz resultante do processo de malhamento exige grandes recursos de processamento e memória.

Para obter um malhamento otimizado, o HFSS utiliza um processo iterativo, chamado de análise adaptativa em que a malha é automaticamente refinada nas regiões identificadas como críticas pelo programa. As regiões críticas são aquelas onde o programa identifica como tendo uma grande concentração de energia a ser minimizada. O HFSS, nesse processo, gera uma malha inicial esparsa que vai sendo refinada nas regiões com grande concentração de erro. O processo iterativo (solução – análise de erro – refinamento adaptativo nas regiões críticas) é repetido a cada passo de solução até que os critérios de convergência sejam satisfeitos. O critério de convergência pode ser definido em função do tamanho máximo dos tetraedros, número máximo de passos de refinamento, quantidade de elementos e variação máxima de erro a cada passo. Esses critérios podem ser utilizados isoladamente ou em combinação para alguns casos.

No HFSS, ao se trabalhar especificamente com problemas de onda incidente, é utilizado um parâmetro de convergência denominado por $\Delta MagE$ ou “*Maximum Delta E Per Pass*”, ou erro máximo de energia por passo de solução para todos os tetraedros que compõem a malha. O $\Delta MagE$ é a diferença relativa do erro da energia entre uma solução e a solução subsequente para um determinado problema. Esse critério é uma medida da estabilidade dos valores de campo calculados entre cada passo de solução. O ajuste do $\Delta MagE$ é um dos critérios de convergência de uma solução, onde no momento em que a solução atinge o valor estabelecido a seqüência de cálculo é interrompida, significando que houve uma convergência. De modo geral não há regras específicas para determinar qual o valor ideal do $\Delta MagE$, isso dependerá da experiência no processo de cálculo de campo e na identificação da necessidade de se obter uma malha mais refinada com o propósito de atingir soluções mais exatas. No processo de cálculo desse trabalho utilizou-se o *default* apresentado no HFSS de $\Delta MagE$ igual a 0,1, não se observou a necessidade de reduzir ainda mais esse valor. Salienta-se que na medida em que $\Delta MagE$ é reduzido mais tempo de processamento é gasto. Pois o HFSS necessita realizar tantos passos de simulação quantos forem necessários para que o parâmetro seja atingido e a cada passo de simulação a malha do problema aumenta em quantidade de elementos. Ao passo que não se consegue atingir a meta estabelecida o HFSS identifica o problema como não convergente.

O processo adaptativo do HFSS é uma ferramenta bastante eficiente, porém quando aplicado em problemas de grandes dimensões, como o caso do veículo, pode levar a quantidades elevadas de elementos na malha do problema. Outro fator observado na utilização

do processo adaptativo é que ao tentar estabelecer limites para a densidade de malha (quantidade ou tamanho de tetraedros) pode ocorrer uma degradação da exatidão dos resultados da solução. Isso acontece porque o HFSS, ao refinar a malha nas regiões críticas, de forma a atender os parâmetros de convergência, leva a uma alta densidade numérica extrapolando recursos computacionais disponíveis. Acontece que nem sempre as regiões mais críticas são aquelas de real interesse, logo um malhamento denso nessas regiões muitas das vezes não leva a uma exatidão nas regiões onde se pretende observar o comportamento eletromagnético.

No decorrer das simulações, observou-se que o limite máximo de malhamento possível de ser resolvido com os recursos computacionais disponíveis era uma malha de aproximadamente 50.000 elementos. Porém com o uso do malhamento adaptativo obtinham-se malhas com mais de 90.000 elementos e na maioria das vezes apresentando resultados degradados e sem exatidão nas regiões de interesse. Isso decorria do fato de que embora houvesse uma densidade de elementos elevada, o refinamento acontecia nas regiões onde o HFSS identificava como críticos e não necessariamente naquelas onde era foco de observação.

Em contra-partida o HFSS oferece também a possibilidade de utilizar um processo de malhamento em que somente as regiões de interesse são refinadas. Nesse processo pode se conciliar os recursos computacionais disponíveis com as regiões do modelo onde de fato há o interesse em analisar o comportamento eletromagnético. Utilizando essa ferramenta pode-se instruir o HFSS para refinar a malha em uma determinada região com quantidades de tetraedros ou tamanhos máximos dos elementos de forma a se obter um resultado com maior exatidão. Ao restante do problema pode-se atribuir uma malha constituída por elementos de tamanhos maiores ou limitada a uma determinada quantidade de tetraedros. Com isso é possível controlar o malhamento de forma que haja a convergência da simulação e com uma exatidão maior onde realmente pretende-se analisar. Os critérios de convergência de $\Delta MagE$ nessa forma de malhamento são os mesmos utilizados para o malhamento adaptativo, com a diferença que nesse caso são delimitadas regiões onde há o real interesse por uma malha mais refinada. Essa forma de malhamento foi aplicada neste trabalho para otimizar os recursos computacionais disponíveis. O processo de malhamento foi controlado através de variação máxima de erro, tamanho máximo e quantidade limite de elementos, de forma que a quantidade total não ultrapassasse 50.000 tetraedros.

3.3 Simulações Numéricas

As normas e procedimentos de testes surgem com o intuito de verificar, sob condições severas, o funcionamento adequado dos dispositivos e sistemas em um veículo. No entanto, esses testes são realizados em um estágio bastante avançado do produto final, quando as correções dos sistemas são em muitas vezes difíceis e caras de serem resolvidas (J. Teune, 1999). Os testes além de serem realizados nos estágios mais avançados de um projeto requerem grandes investimentos na construção e manutenção de CSA juntamente com todos os aparatos eletrônicos que complementam, como amplificadores, geradores de sinal, antenas, calibrações etc. Logo ferramentas capazes de antecipar determinados fatos seriam de fundamental importância e, nesse sentido, grandes esforços por partes de pesquisadores são realizados com o intuito de poder prever determinados comportamentos ainda nos estágios iniciais de um projeto.

A grande vantagem de se prevenir determinados problemas de CEM, ainda nos estágios iniciais de um produto, é o fato de soluções e mudanças no projeto poderem ser realizadas sem um aumento significativo nos custos finais. Além do mais, poder-se-ia inclusive reduzir significativamente os tempos necessários nos testes reais em uma CSA, uma vez que poderiam ser focadas as medições em determinados pontos com maior possibilidade de problemas previstos nas simulações numéricas.

A utilização de métodos de cálculos numéricos aplicados a CEM em sistemas automotivos é uma área que ainda está em uma fase inicial e que ainda não foi amplamente utilizada. As normas relacionadas a CEM definem apenas procedimentos de testes reais e não existem citações para a utilização de auxílio por parte de recursos computacionais para a exploração do problema em fases iniciais e muito menos nos estágios mais avançados de um projeto ou produto. Um paralelo importante a ser destacado são os testes de deformação mecânica em chassis automotivos. No passado testes de colisão para verificar a deformação de um chassi só eram realizados já com o protótipo em fase final, onde modelos reais do veículo eram submetidos a vários tipos de colisões na expectativa de se determinar pontos vulneráveis e falhas de projeto. Esse teste é uma das etapas mais caras em termos de testes em automóveis, mas de extrema importância, considerando a velocidade que se pode atingir atualmente em um veículo. Atualmente a indústria automobilística utiliza suporte computacional para verificar deformação de chassis e estruturas utilizando programas

baseados no Método de Elementos Finitos (FEM). Com tais recursos, antes mesmo do protótipo vir a existir, os engenheiros podem simular deformações e adotar medidas técnicas para corrigir uma potencial falha. Dessa forma, ao se fazer os testes reais os engenheiros buscam apenas conferir a eficácia das soluções adotadas, o que certamente reduz drasticamente tempo com testes além de promover economias substanciais em recursos financeiros.

Portanto, a utilização de modelamentos numéricos será uma importante ferramenta aplicada no processo de desenvolvimento de CEM automotiva e permitirá que os projetistas avaliem problemas de CEM antes mesmo da construção dos protótipos (D.D. Ward, 1995). Porém, a solução de problemas de CEM com modelos de grandes dimensões e em alta frequência, ainda é um desafio em termos computacionais. A quantidade de memória e poder de processamento exigido para determinados problemas frequentemente é que determinam os limites máximos em complexidade a serem resolvidos. Para métodos numéricos baseados no FEM a memória necessária tende a aumentar com o cubo das dimensões do problema e o tempo computacional de 6ª a 9ª potência (S.J. Porter, 1994). Mas a crescente evolução da capacidade de processamento dos computadores atuais a um custo acessível, somado ao processamento paralelo tem tornado mais factível a execução de problemas mais complexos e com grandes dimensões.

3.4 Cálculo de Campo em Estrutura Automotiva Simplificada

Aplicar o HFSS para simular as condições reais de testes recomendados pela (ISO 11452-2, 2001) representa enormes desafios sob o ponto de vista computacional. As grandes dimensões e complexidade geométricas do veículo, volume da CSA e o campo irradiado pela antena, representam um esforço computacional de grandes proporções (DE LEO e outros, 2001), em termos de recursos como capacidade de processamento, tempo de processamento e alocações de memórias.

Como poderá ser acompanhado adiante o processo de cálculo de campo na estrutura veicular simplificada adotada para o projeto foi alcançado passo a passo, a partir de formas geométricas simplificadas que pudessem retratar alguns fenômenos físicos que por ventura poderiam acontecer em uma estrutura veicular real. Primeiramente buscou-se

compreender o aspecto de estruturas ressonantes, posteriormente o comportamento de aberturas nessas estruturas para, finalmente, com os subsídios adquiridos desta análise, poder extrair as informações de uma estrutura similar, porém com as dimensões e formas de um veículo.

4 MODELAMENTO DA ESTRUTURA VEICULAR

4.1 Considerações Iniciais da Modelagem

O modelamento de um problema para análise da CEM envolve muitos aspectos que se não forem bem definidos pode tornar o problema ainda mais complexo sob o ponto de vista da simulação numérica. De forma geral, o processo de análise de problemas dessa natureza envolve basicamente quatro fases:

- a) Análise física do problema
- b) Modelamento
- c) Simulação
- d) Análise dos Resultados

Cada fase citada acima será discutida nos itens subseqüentes.

4.2 Análise Física do Problema

Para o caso do projeto de pesquisa em questão observou-se que uma estrutura veicular poderia de algum modo funcionar tal como uma cavidade eletromagnética ressonante com aberturas. Primeiramente, entende-se por cavidades eletromagnéticas ressonantes toda e qualquer estrutura metálica que esteja envolvendo um dielétrico. As aberturas nesse caso seriam a forma por onde ocorreria a excitação eletromagnética interna da cavidade por meio de uma fonte de campo externa.

Ao observar uma estrutura veicular percebe-se que se trata de uma estrutura metálica, envolvendo um dielétrico que no caso é o ar e que ao longo dessa estrutura encontram-se inúmeras aberturas. Analogamente, pode-se aproximar uma estrutura veicular à uma cavidade eletromagnética ressonante.

4.2.1 Estudo das Cavidades Ressonantes e das Aberturas

Para compreender melhor a interação entre aberturas e cavidades ressonantes buscou-se analisar um modelo simples que pudesse retratar o mesmo comportamento físico que uma estrutura veicular mais complexa. Em (ROBINSON e outros, 1998) é apresentada uma formulação matemática de uma cavidade retangular de dimensões de $(300 \times 300 \times 120)$ mm³ com uma abertura retangular em uma das faces nas dimensões (100×5) mm², sendo iluminada por uma onda plana. A Figura 4.1 apresenta a cavidade ressonante retangular utilizada em (ROBINSON e outros, 1998) e (DESHPANDE, 2000).

O problema de cavidades ressonantes eletromagnéticas cúbicas com aberturas retangulares, a exemplo da apresentada na Figura 4.1, é um tema frequentemente abordado na literatura técnica e acadêmica. Isso decorre fundamentalmente por ser um modelo onde o resultado é conhecido tanto por experimentos práticos quanto por formulações matemáticas, como a que é apresentada em (ROBINSON e outros, 1998) e (DESHPANDE, 2000). O modelo apresentado na Figura 4.1 é uma importante ferramenta para verificar a convergência de metodologias numéricas aplicadas no cálculo de campos eletromagnéticos e também fundamental para o desenvolvimento do trabalho proposto por essa pesquisa.

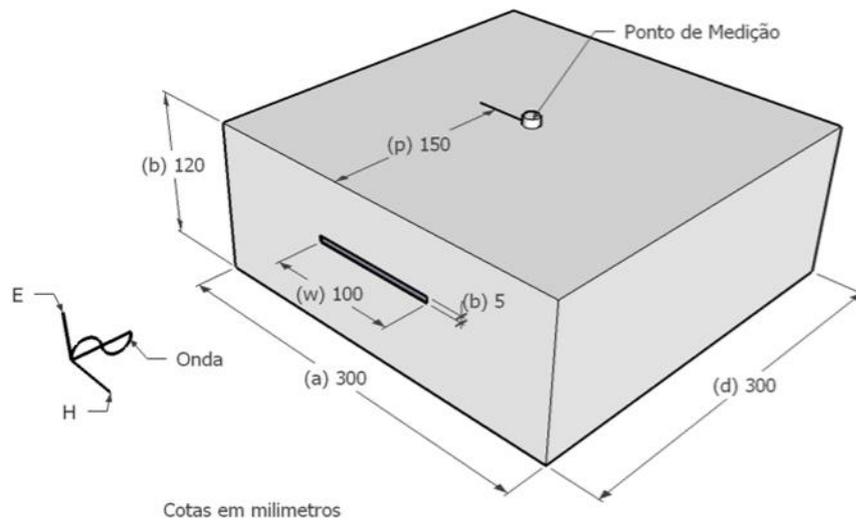


Figura 4.1 – Cavidade retangular simples com abertura

Para que ocorram ressonâncias eletromagnéticas no interior de uma cavidade ressonante é preciso que haja uma excitação ou uma fonte de campo em seu interior. Para o caso do objeto de pesquisa a fonte de campo é externa, sendo que a excitação no interior da cavidade ocorrerá em função da penetração de campo através da abertura presente na superfície do modelo. A penetração de campo pela abertura depende da relação entre as dimensões da abertura e o comprimento de onda da fonte de excitação. Em uma abertura retangular como a apresentada na Figura 4.1 a dimensão referente ao comprimento (w) tem uma relevância sob o ponto de vista da penetração de campo. O princípio de Babinet (PAUL, 1992) estabelece que uma abertura em que o comprimento (w) é da ordem de meio comprimento de onda, a abertura pode passar a funcionar como uma antena dipolo de meia onda.

$$w \cong \frac{\lambda}{2} \quad (4.1)$$

Pode então ser interpretado que a abertura sendo iluminada por uma onda poderá permitir uma maior penetração de campo se essa abertura possuir uma dimensão da ordem de meio comprimento de onda da fonte em questão ou múltiplos inteiros desse mesmo comprimento de onda. Essa relação entre o tamanho físico da abertura e a frequência da fonte de excitação significa que a dimensão da abertura apresenta uma impedância menor para a onda incidente sob determinadas condições.

Ao haver a penetração de campo para o interior da cavidade outro fenômeno poderá ocorrer. Trata-se do efeito de cavidade ressonante, que depende da relação entre as dimensões da caixa e comprimento de onda do campo presente em seu interior. Nesse fenômeno de ressonância eletromagnética, para determinadas frequências, a cavidade apresentará uma impedância mínima o que implicará em uma amplificação do campo eletromagnético. Para a caixa apresentada na Figura 4.1 a primeira frequência de ressonância acontecerá para a frequência de 706 MHz, conforme a equação de Ott (Ott, 1988) apresentada na equação (4.2).

$$f = \frac{212}{l} \quad (4.2)$$

Onde:

f é a primeira frequência de ressonância da cavidade dada em MHz

l é a maior dimensão da estrutura dada em metros (0,30m)

Em (ROBINSON e outros, 1998) a caixa da Figura 4.1 é modelada em um circuito equivalente onde tanto a abertura quanto a cavidade é representada por impedâncias em termos de linhas de transmissão. A Figura 4.2 apresenta o circuito equivalente para o modelo da caixa.

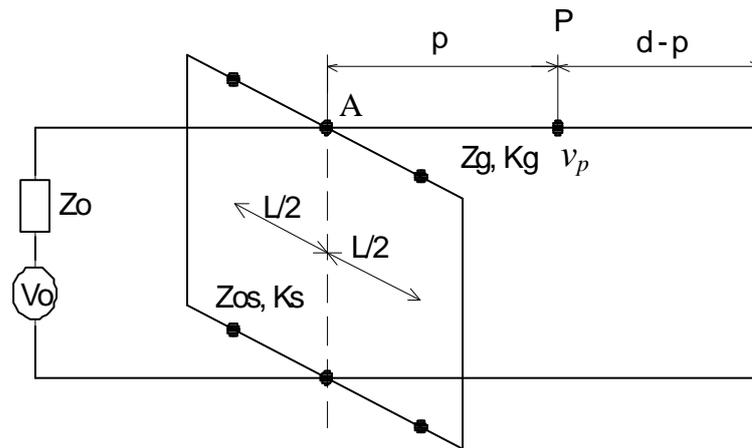


Figura 4.2 – Circuito equivalente para a cavidade retangular

No circuito equivalente, apresentado na Figura 4.2, a fonte de campo é representada por uma tensão (V_o) e a impedância do meio de propagação por (Z_o) de valor 377Ω . A caixa é modelada como sendo um guia de onda curto circuitado onde a impedância e constante de propagação, são respectivamente, (Z_g) e (kg). A abertura é representada por uma linha de transmissão coplanar curto circuitada nas extremidades, cuja impedância característica é dada por:

$$Z_{os} = 120\pi^2 \left[\ln \left(\frac{1 + \sqrt[4]{1 - \left(\frac{\omega_e}{b}\right)^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - \left(\frac{\omega_e}{b}\right)^2}} \right) \right]^{-1} \quad (4.3)$$

$$\omega_e = \omega - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi\omega}{t} \right) \quad (4.4)$$

$\omega_e \leq b/\sqrt{2}$, que é válido para a maioria das aberturas.

A impedância da abertura no ponto A do circuito equivalente é dada por:

$$Z_{ap} = \frac{l}{2a} jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (4.5)$$

Onde a e l dimensões da caixa e:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.6)$$

A impedância da abertura (Z_{ap}) varia de zero (curto circuito), quando o comprimento de onda é muito maior que o comprimento (l), ao infinito (circuito aberto) quando (l) é equivalente a meio comprimento de onda.

Para o modo de propagação (TE_{10}), o guia de onda tem sua impedância característica conforme a expressão abaixo:

$$Z_g = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (4.7)$$

E a constante de propagação é dada pela expressão:

$$k_g = \frac{k_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (4.8)$$

A eficiência de blindagem pode ser usada como uma medida da penetração de campo para o interior da cavidade. A eficiência de blindagem resultante para o campo elétrico, para o modelo em questão, pode ser calculada pela expressão (4.9):

$$SE_e = -20 \text{Log} \left| \frac{2v_p}{v_o} \right| \quad (4.9)$$

Onde v_o é a tensão no ponto P sem a presença da cavidade.

A Figura 4.3 refere-se ao resultado, em termos de eficiência de blindagem, para uma variação da frequência da onda incidente entre 200 MHz a 1 GHz. Observa-se a estrutura apresenta um comportamento ressonante em torno de 700 MHz, como previsto anteriormente com a aplicação da equação (4.2). Em síntese, na frequência de ressonância a impedância da cavidade se torna muito menor que a impedância da abertura fazendo com que ocorra uma amplificação da amplitude do campo no interior.

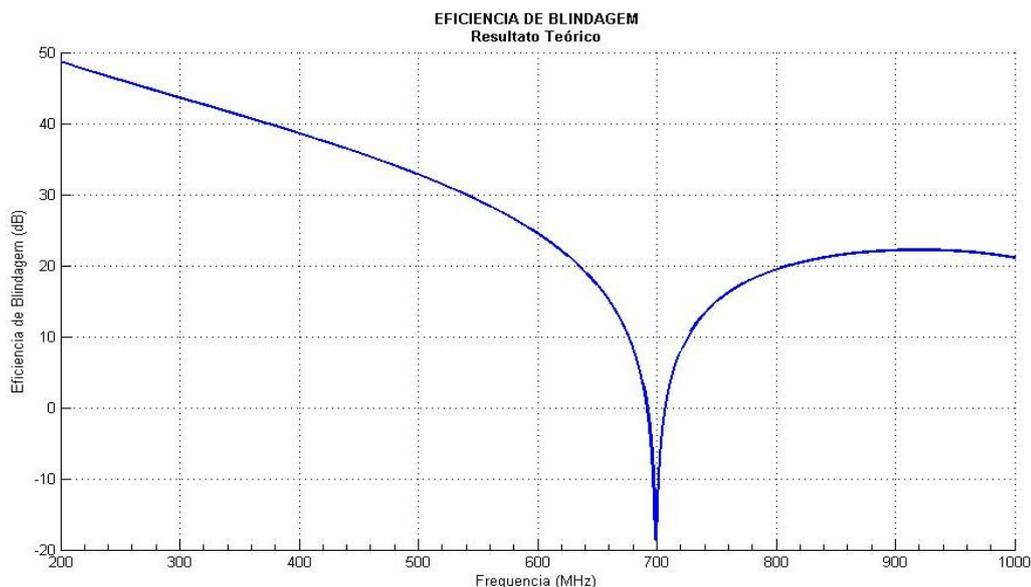


Figura 4.3 – Comportamento ressonante da cavidade, resultado analítico

A utilização desse modelo permitiu avaliar que em uma estrutura veicular pode haver amplificações do valor do campo e que a penetração de campo está condicionada às dimensões das aberturas em relação ao comprimento de onda da fonte de excitação. Essa compreensão da relação entre dimensões da abertura e a frequência inclusive são fundamentais para a simplificação da modelagem de estruturas mais complexas como o veículo. Pois as simulações e os experimentos foram conduzidos com a utilização de campos com frequência de 200 MHz até 1 GHz, o que corresponde a comprimentos de onda entre 1,5 a 0,3 metros, respectivamente. De forma geral, pode-se desconsiderar em um modelamento as aberturas que tenham tamanhos inferiores a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda da maior frequência, logo aberturas com tamanhos inferiores a 75 mm não permitem a penetração de campo e logo podem ser desconsideradas no modelo.

Uma característica importante em relação às aberturas e a penetração de campo é o fato de que a polarização do campo está fortemente ligada com as dimensões e orientações das principais dimensões da abertura. Esse fato não pode ser observado no modelamento matemático proposto em (ROBINSON e outros, 1998), porém é de suma importância para a análise dos resultados no item 5 mais adiante.

Considerando os extremos, um campo poderá estar polarizado horizontalmente e verticalmente, uma abertura posicionada na trajetória de propagação deste campo também poderá ter uma orientação referente à polarização do campo incidente. A Figura 4.4 apresenta uma abertura retangular de 500 x 100 mm² e sua posição em relação a um campo polarizado

incidente. Na primeira figura o campo está polarizado horizontalmente, enquanto que na segunda a polarização é vertical.

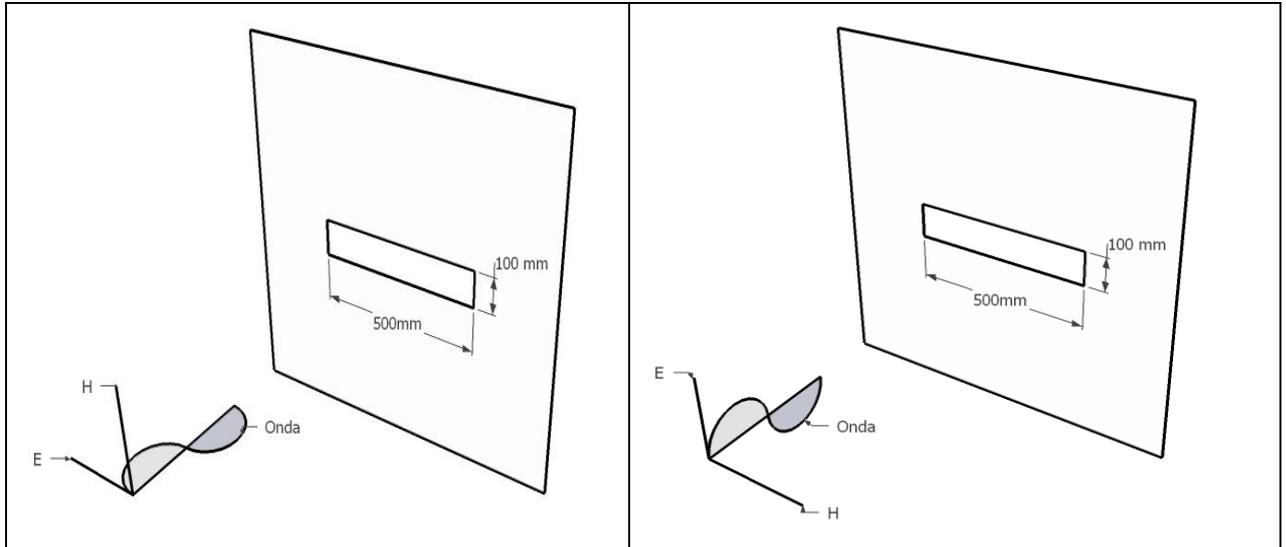


Figura 4.4 – Detalhe da polarização do campo em relação às dimensões de uma abertura retangular

A relação entre a polarização e as dimensões principais de uma abertura estão fortemente ligadas, o que traduz em termos eletromagnéticos em valores de impedância completamente diferentes. Para exemplificar essa relação foram realizadas simulações, utilizando o programa HFSS onde os resultados são os gráficos apresentados na Figura 4.5. Nesse caso está sendo apresentado o comportamento do campo na interface de uma placa com abertura, como visto na Figura 4.5, em função da polarização do campo incidente.

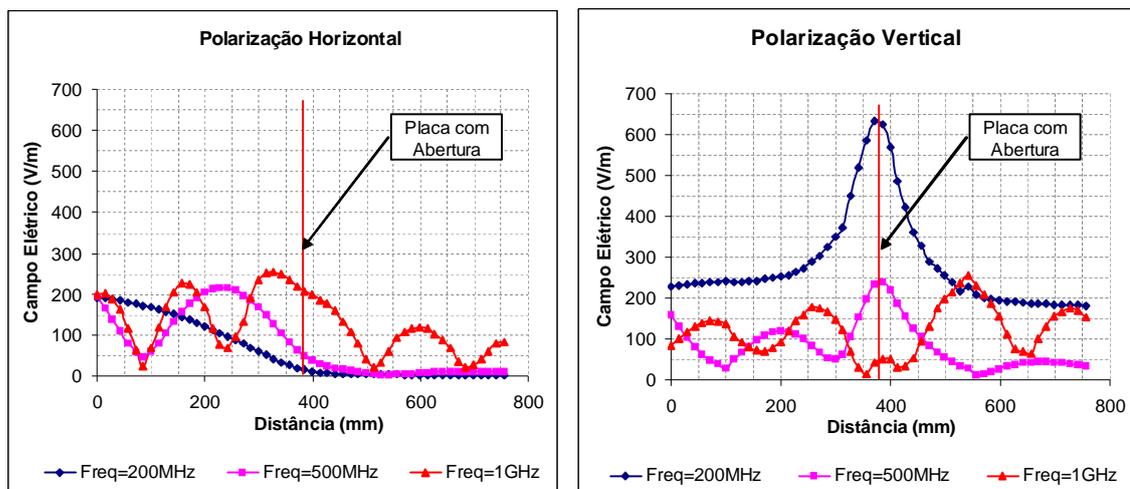


Figura 4.5 – Detalhe da influência da polarização do campo com as dimensões de uma abertura retangular

A linha vertical nos gráficos refere-se à posição da placa com abertura, sendo o primeiro gráfico para uma polarização horizontal do campo incidente e o segundo para uma polarização vertical. Observa-se que para as frequências apresentadas com a polarização horizontal que na medida em que se aumenta a frequência há uma correspondente penetração de campo através da abertura. Já para o segundo caso, além de haver a penetração do campo pela abertura há também uma amplificação do valor do campo nas imediações da placa.

Acontece que para um campo com uma determinada frequência e polarizado em uma direção, a dimensão da abertura mais importante é aquela que está perpendicular à sua polarização. Para o caso da abertura apresentada na Figura 4.5, a Tabela 4.1 faz um resumo do que seria a dimensão relevante em função da polarização do campo incidente.

Tabela 4.1 – Dimensão relevante em função da polarização do campo incidente

Frequência (MHz)	$\lambda/2$ (mm)	Dimensão relevante da abertura (mm)	
		Polarização Horizontal	Polarização Vertical
200	750	100	500
500	300	100	500
1000	150	100	500

Observa-se na Tabela 4.1 que para a polarização horizontal a dimensão relevante é a altura da abertura (100 mm). A altura de 100 mm é pequena quando comparada à metade do comprimento de onda para as frequências de 200 MHz e 500 MHz, que restringe a passagem do campo. Para 1 GHz o mesmo não acontece, observando que para essa frequência há penetração de campo através da abertura. Porém fazendo a mesma análise, mas com a polarização vertical, observa-se que existe uma proximidade maior entre a largura da abertura (500mm) e a metade do comprimento de onda dos campos incidentes, o que permite em maior ou menor grau uma penetração de campo como apresentado na Figura 4.5.

Em síntese as dimensões elétricas de um problema e como esse está orientado em relação às fontes eletromagnéticas são fundamentais para que sejam realizadas simplificações em modelagens e também interpretações de resultados obtidos em simulações, pois como visto pequenas variações podem caracterizar em domínios eletromagnéticos completamente diferentes.

4.3 Modelamento

O estudo prévio do comportamento de uma estrutura metálica com aberturas, como o abordado no item anterior, permitiu desenvolver uma estrutura veicular simplificada, porém mantendo algumas características essenciais para a análise eletromagnética. Nos tópicos seguintes serão apresentados os modelos adotados para o desenvolvimento da pesquisa.

4.3.1 *Fonte de Campo*

Nos trabalhos de medição (SANTOS, 2007) foi utilizada como fonte de campo uma antena corneta 3106 da ETS-Lindgren, como apresentado no tópico 2.4.1. Essa antena posicionada a 1,5 metros de distância do veículo seccionado foi responsável por gerar o campo eletromagnético necessário na prova de imunidade eletromagnética.

4.3.2 *Estrutura Veicular Simplificada*

A complexidade geométrica e as dimensões de um veículo real em relação aos comprimentos de onda são fatores complicadores em simulações computacionais de CEM. Tendo-se em vista o grau de dificuldade que os modelos realísticos poderiam impor ao entendimento básico do problema, buscou-se desenvolver uma plataforma automotiva simplificada. A simplificação da geometria do automóvel foi realizada de forma que as informações essenciais não fossem perdidas (PEREIRA e outros, 2006). Isso permitiria avaliar o problema de espalhamento e penetração de campo em aberturas em uma estrutura onde as formas geométricas pudessem levar ao entendimento físico do problema sem lançar mão de modelos realísticos complexos. Os modelos reais, utilizados para representar a plataforma veicular, consistem de estruturas metálicas e chaparia com aberturas nas dimensões compatíveis aos veículos reais representando os faróis, entrada de ar, pára-brisas e

janelas. Para a exploração do objeto do projeto de pesquisa foram construídos dois modelos, sendo um representando a estrutura veicular inteira, Figura 4.6, e o segundo, Figura 4.7, representado o mesmo veículo, porém seccionado de forma a resguardar somente a parte frontal. O modelo seccionado, como mencionado anteriormente, preserva a parte frontal do veículo onde se concentra em torno de 95% da eletrônica embarcada.

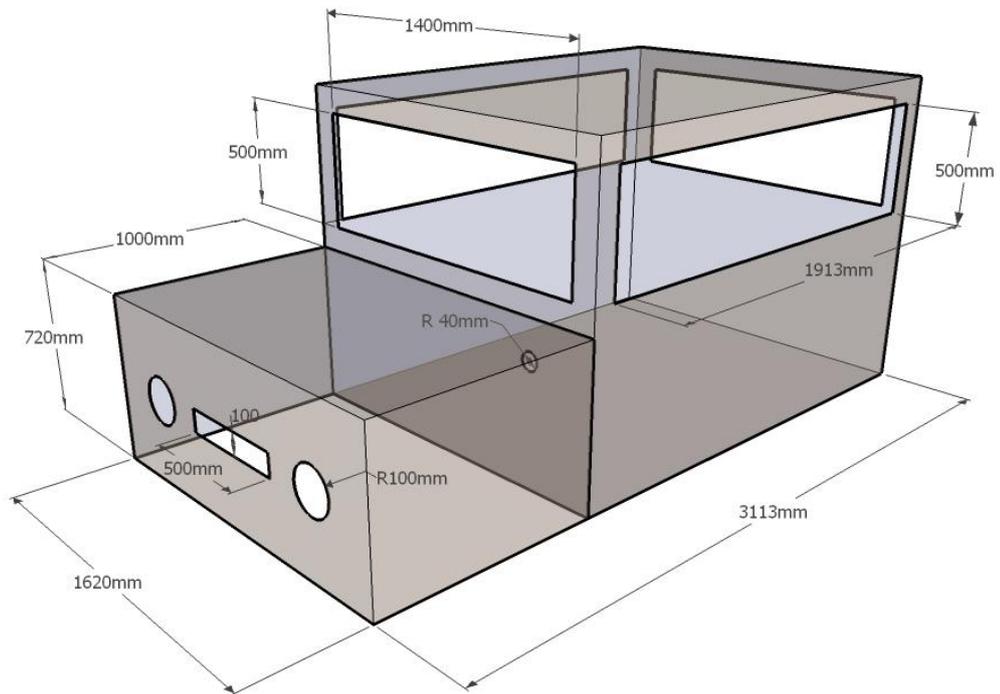


Figura 4.6 – Estrutura veicular completa utilizada nos experimentos e simulações

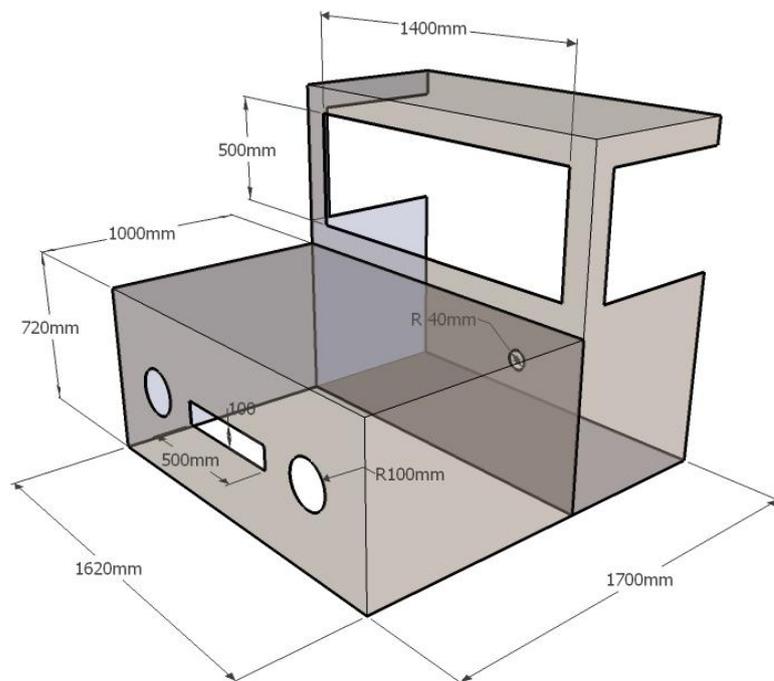


Figura 4.7 – Estrutura veicular seccionada utilizada nos experimentos e simulações

Os modelos simplificados adotados nos experimentos de medições realizados pelas equipes da UFMG/ FIAT, foram construídos em chapa de aço carbono 1010 com espessura de 1 mm, o mesmo material aplicado na estamparia da carroceria dos veículos reais.

Sob o ponto de vista do ensaio de suscetibilidade eletromagnética poderia haver penetração de campos para o interior da estrutura através de duas possibilidades: das aberturas presentes na geometria e pela penetração de campo através da chaparia. Porém para frequências adotadas nos testes e simulações não há penetração de campo suficiente capaz de vencer a espessura de 1 mm da chaparia utilizada na confecção dos modelos. Logo, não havendo a possibilidade de penetração de campo na chaparia para a faixa de frequências entre 200 MHz a 1 GHz, a geometria veicular simplificada foi modelada para as simulações adotando condutor perfeito (PEC) como material. A equação (4.10) é a expressão que apresenta a relação entre a frequência e a profundidade de penetração de uma onda eletromagnética em um determinado material, onde (δ) é a profundidade de penetração, (μ) permeabilidade eletromagnética, (f) a frequência da onda e (σ) a condutividade elétrica. Para a menor frequência (200 MHz) a penetração é da ordem de 10^{-6} metros.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f \cdot \pi \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (4.10)$$

4.4 Simulação

As simulações foram conduzidas utilizando o programa de cálculo de campo HFSS instalado em um computador pessoal com processador *Intel® Core™ Duo*, 3 GHz , *Windows™ NT* e 2 GB de memória *RAM*.

No item 3.2 foram apresentados os dois modos de malhamento do programa HFSS, sendo o primeiro denominado de processo adaptativo e um segundo, que utiliza um refinamento de malha em regiões de interesse, definido pelo usuário. O processo adaptativo, embora seja uma poderosa ferramenta para o malhamento, não foi o mais indicado para a solução da estrutura veicular simplificada. No malhamento adaptativo o HFSS enxerga o problema como um todo e busca refinar a malha nas regiões onde o programa identifica como tendo uma grande concentração de energia, como explicado na descrição do FEM no item

3.1.2. Com isso, sem delimitar a região de interesse, o programa atingia um malhamento com mais de 95.000 tetraedros para o modelo do veículo simplificado. Embora a malha possuísse uma quantidade considerável de elementos, os resultados eram na maioria das vezes instáveis, sem precisão e não condiziam com o esperado para o problema em questão nas regiões de interesse. Além da inconsistência dos resultados obtidos, os recursos computacionais disponíveis não eram capazes de resolver uma malha com a dimensão que o processo adaptativo normalmente conduzia. O malhamento adaptativo também demandava tempos proibitivos de simulação que se, para uma varredura de frequência entre 200 MHz a 1GHz, com intervalos de 50 MHz, situava entre 20 a 50 horas para atingir a convergência da solução.

Observou-se ao longo das simulações que, em função dos recursos computacionais disponíveis, tínhamos que limitar o malhamento de forma que não ultrapassasse 50.000 tetraedros ou elementos. Além da limitação em termos de tamanho de malha foi necessário otimizar o malhamento de forma a obter resultados coerentes nas regiões onde de fato havia o interesse. Para atingir esse objetivo buscou-se a utilização de ferramentas disponíveis no HFSS. Basicamente as ferramentas utilizadas consistiam em reduzir o tamanho do problema aplicando um plano de simetria longitudinalmente ao comprimento do veículo, o que reduzia a complexidade do problema pela metade em relação ao volume total. Outro recurso aplicado foi o de utilizar o malhamento manual, onde somente as regiões de real interesse passariam a ter uma malha mais refinada. Esse malhamento mais refinado nas regiões de interesse se traduziria em resultados mais precisos.

As regiões de interesse eram aquelas onde fisicamente a antena isotrópica foi disposta no processo de medição do valor do campo resultante, como pode ser observado em detalhes no trabalho (SANTOS, 2007). A Figura 4.8 apresenta o detalhe do refinamento de malha nas regiões de interesse. Nessas regiões o malhamento foi realizado de forma que os tetraedros tivessem seus tamanhos máximos com 50 mm, ou seja, $1/6$ do comprimento de onda da frequência de 1 GHz, maior frequência de simulação. No restante do problema a quantidade de tetraedros foi limitada em um máximo de 20.000 elementos. No decorrer do processo de malhamento sempre era observado para que os valores limite de quantidades de tetraedros não fossem ultrapassados. Depois de construída a malha todos os cálculos para cada passo de frequência é realizado utilizando-se essa malha, daí a necessidade de buscar uma malha que atendesse a maior frequência. Como a maior frequência de simulação é 1 GHz, $1/6$ do comprimento como sendo o tamanho máximo dos elementos na região de interesse, equivale a uma razoável discretização do problema e melhor ainda quando essa malha é aplicada para as frequências menores, que tem um comprimento de onda maior. Pois

os resultados são tão exatos quanto maior for a discretização do problema em relação ao comprimento de onda.

A Figura 4.8 apresenta em detalhe duas malhas distintas de serem observadas. A primeira de forma mais esparsa contornando o veículo e o volume ao redor do mesmo é a malha que fora limitada em torno de 20.000 tetraedros. A segunda, apresentada em destaque, trata-se das regiões que foram limitadas de forma a se obter uma malha mais refinada, onde o tamanho máximo dos tetraedros era de 50 mm.

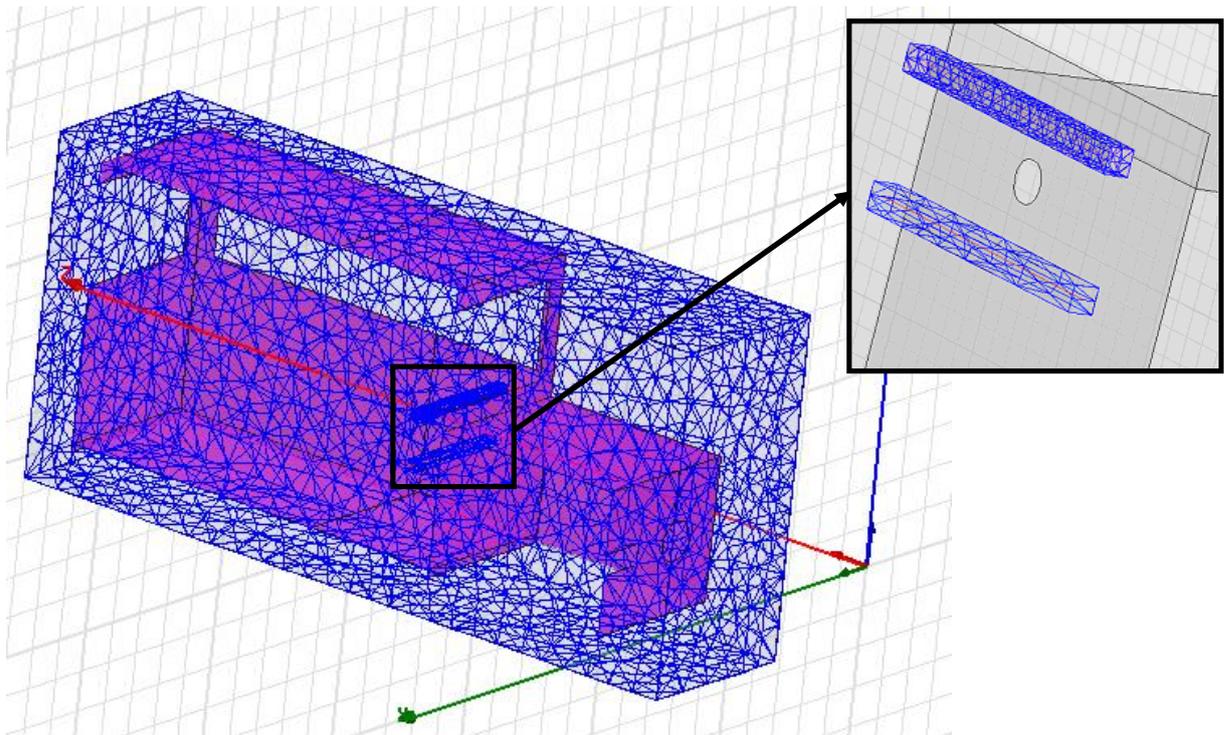


Figura 4.8 – Detalhe da geração de malha e da região com o refinamento

No tópico a seguir a região em destaque da Figura 4.8 será detalhada de forma a demonstrar os pontos exatos onde a antena isotrópica foi disposta nos experimentos laboratoriais e de simulação.

4.4.1 Pontos de Medição

Os pontos de medição adotados no cálculo de campo foram baseados no trabalho de medição apresentados em (SANTOS, 2007), de forma a poder obter resultados capazes de

serem comparados com aqueles obtidos de forma prática. A região adotada para as medições ficam situadas nas proximidades do painel do veículo, dentro do habitáculo de passageiros. Nessa região, onde concentra alguns componentes eletrônicos, em tese haveria uma maior ou menor influência eletromagnética em função do seccionamento do veículo. Embora o compartimento do motor concentre uma maior densidade de componentes eletrônicos, nesse local não foram realizadas medições. Isso se deve ao fato desse compartimento não ser afetado pelo seccionamento do veículo.

A simetria do modelo veicular adotado permitiu que fosse utilizado uma ferramenta disponível no HFSS, onde um plano de simetria longitudinal é aplicado como forma a reduzir a complexidade do problema em termos de volume numérico.

A Figura 4.9 apresenta em detalhe a forma como o plano de simetria foi aplicado aos modelos veicular simplificado inteiro e seccionado.

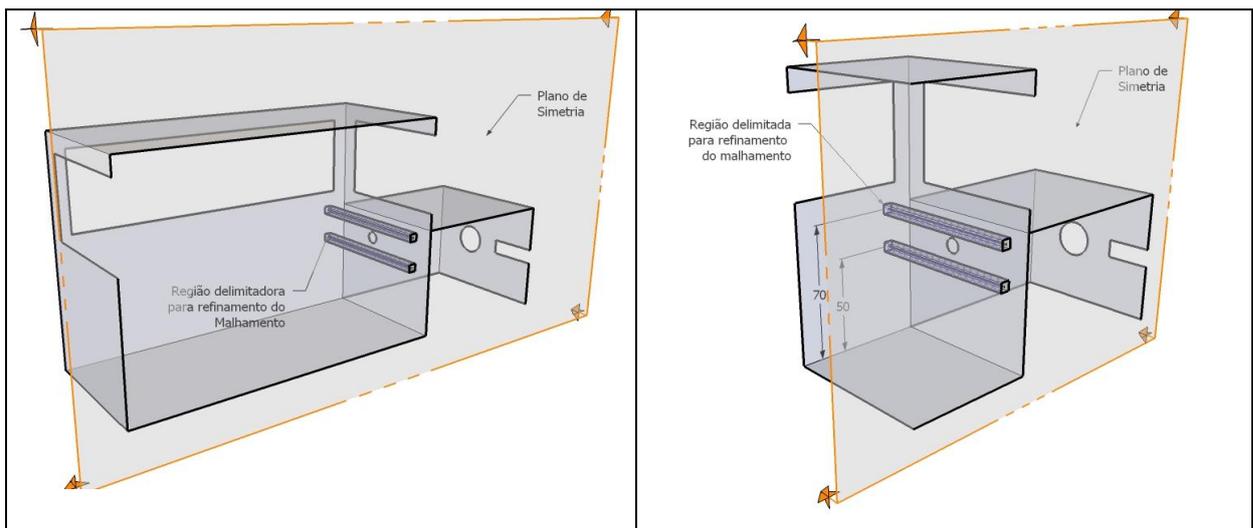


Figura 4.9 – Detalhe do plano de simetria aplicado aos modelos veiculares simplificados

A Figura 4.10 apresenta em detalhe ilustrativo os pontos nos quais a antena isotrópica foi posicionada nos experimentos de medição. Esses mesmos pontos foram também utilizados nas simulações para a computação dos campos elétricos resultantes. Os pontos de medição foram subdivididos em dois níveis, sendo os primeiros identificados como A06 a A08 (à 70 cm do assoalho do veículo) e no segundo nível B06 a B08 (à 50 cm do assoalho). Ambos os níveis estão distanciados 15 cm do pára brisa do veículo. Essa região corresponde ao painel em um veículo real, onde estão concentrados numerosos dispositivos eletrônicos, relacionados à instrumentação e entretenimento.

4.4.2 *Dados da Simulação*

Nas simulações foram considerados os seguintes parâmetros:

a. Excitação:	Onda Plana uniforme
b. Intensidade do Campo Elétrico:	30 V/m
c. Polarização do campo:	Vertical e Horizontal
d. Faixa de Frequência:	200 MHz a 1 GHz
e. Passo de Frequência:	50 MHz
f. Critério de Convergência:	$\Delta MagE = 0.1$

Como já mencionado o malhamento adotado foi definido manualmente nas regiões de interesse a fim de se obter um malhamento mais condensado e conseqüentemente maior exatidão e precisão onde é o foco das análises. Para aqueles pontos onde havia o interesse em se obter um resultado mais preciso definiu-se que os tetraedros tivessem tamanhos máximos de 50 mm (1/6 do comprimento de onda de 1 GHz, maior frequência de simulação) e para o restante do problema limitado em um número próximo a 20.000 tetraedros. Adotando esta medida foi possível limitar a quantidade de tetraedros abaixo de 50.000 elementos, consumindo um tempo de processamento médio de 1 hora e 50 minutos de simulação para cada região analisada. Os resultados serão apresentados a seguir.

As simulações tiveram o intuito de fazer as comparações entre a distribuição de campo utilizando as estruturas veiculares completa e seccionada, conforme apresentado nas figuras dos modelos. Essas distribuições de campo simuladas também foram comparadas com os valores obtidos através dos experimentos de medição realizados pela equipe da UFMG / FIAT (SANTOS, 2007).

5 RESULTADOS

5.1 Estruturação dos Resultados

Tal como nos testes de medição, a amplitude do campo elétrico incidente nas simulações foi de 30 V/m e com polarização vertical e horizontal. A estrutura veicular utilizada nos experimentos foi desenvolvida de forma que pudesse ser avaliada a influência das aberturas e do comportamento de cavidade ressonante. A análise desse comportamento é importante por se tratarem de dois fenômenos em particular onde podem ocorrer amplificações do campo incidente. Como um dos fundamentos do projeto de pesquisa é o uso de uma estrutura veicular seccionada, é importante avaliar, mesmo que qualitativamente, a influência de tais amplificações. Isso porque em termos eletromagnéticos uma estrutura completa de um veículo pode trazer implicações diferentes de um veículo seccionado sob a mesma fonte de campo. Vale ressaltar, por exemplo, que ao seccionar o veículo uma parte da estrutura veicular, que em teoria aproximava-se de uma cavidade ressonante, era completamente removida. Dessa forma, os resultados com os respectivos comentários foram estruturados da seguinte forma:

- No item 5.2 é realizada uma comparação entre os resultados das simulações com os valores obtidos nas medições apresentados no trabalho (SANTOS, 2007);
- No item 5.2.4 são comparados os resultados de simulação entre a estrutura veicular seccionada com a completa;

5.2 Veículo Seccionado: Comparação entre Medição e Resultados da Simulação

Neste tópico são apresentados os resultados das simulações numéricas e as comparações desses com dados de medição apresentados em (SANTOS, 2007) para o veículo seccionado. Os gráficos apresentarão os resultados tanto para a fonte polarizada verticalmente quanto horizontalmente.

5.2.1 Pontos A06, A07 e A08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente

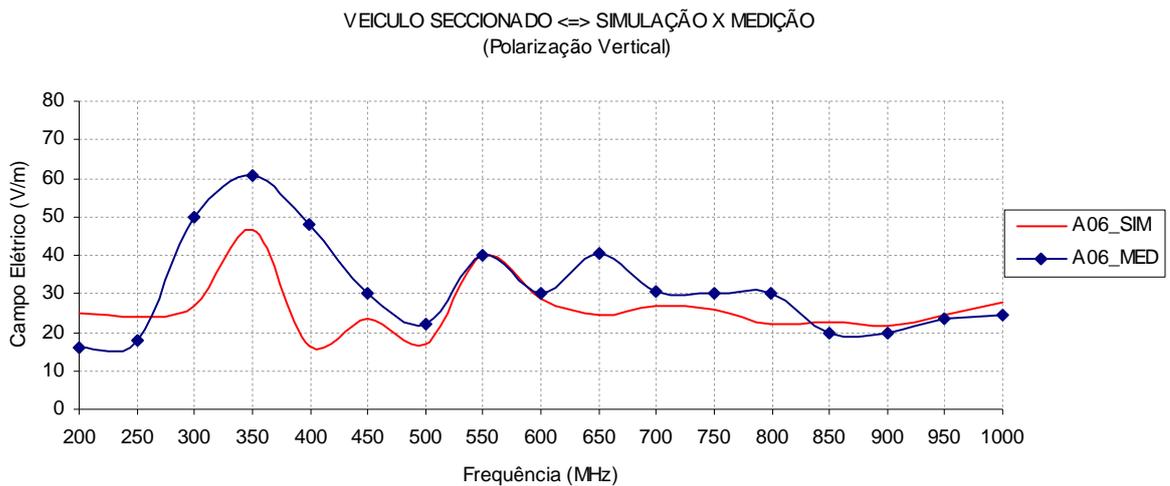


Figura 5.1 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **A06**, pol. Vertical

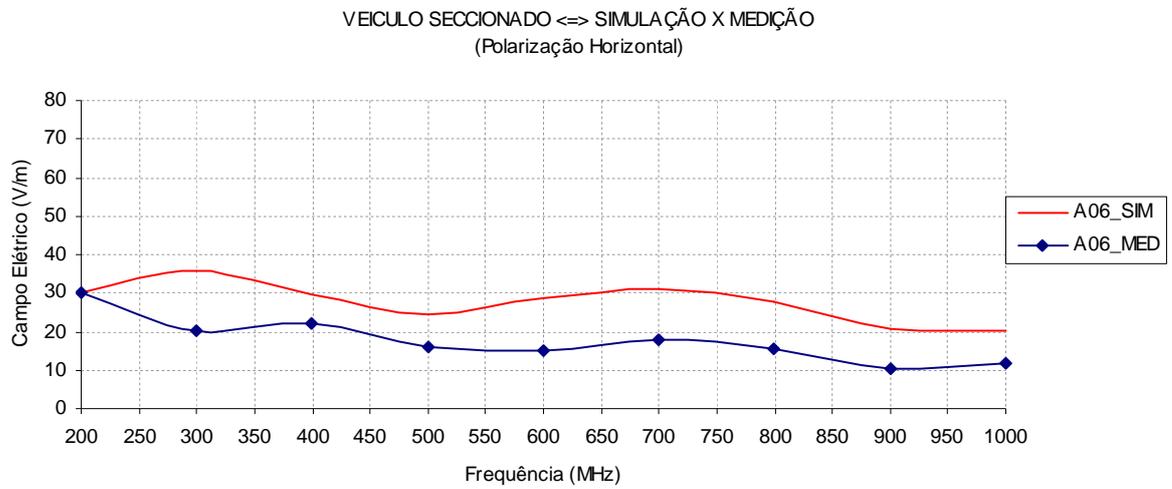


Figura 5.2 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **A06**, pol. Horizontal

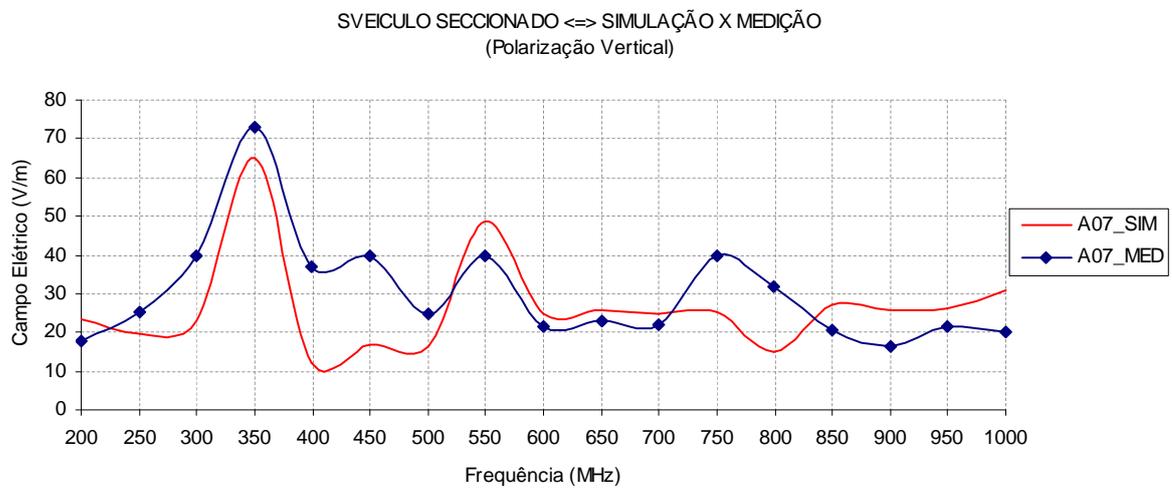


Figura 5.3 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **A07**, pol. Vertical

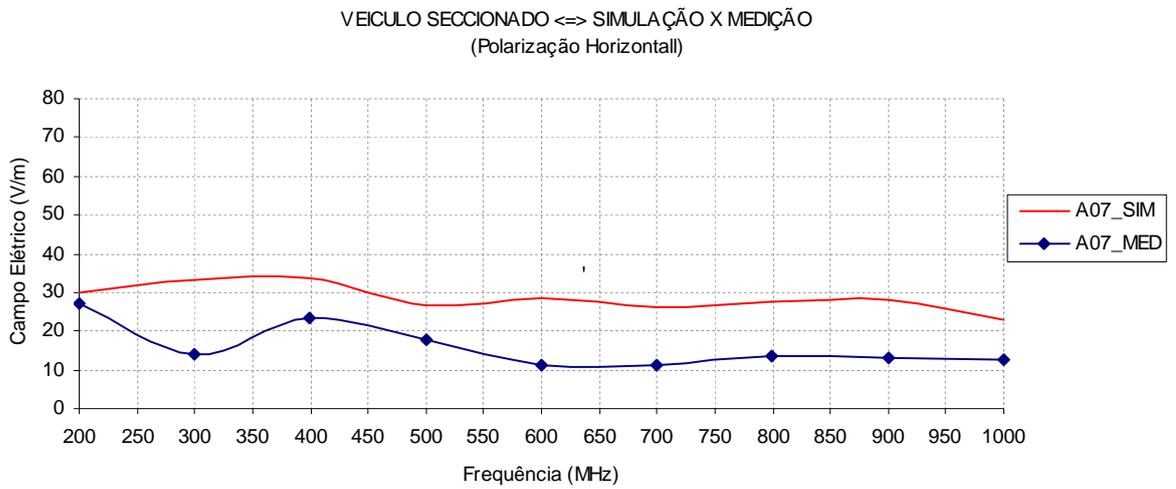


Figura 5.4 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **A07**, pol. Horizontal

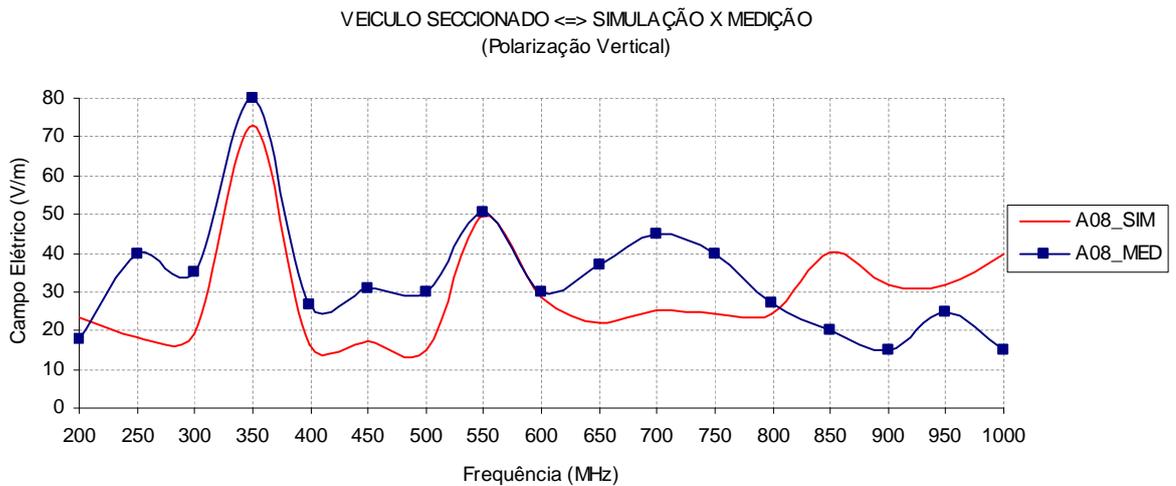


Figura 5.5 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **A08**, pol. Vertical

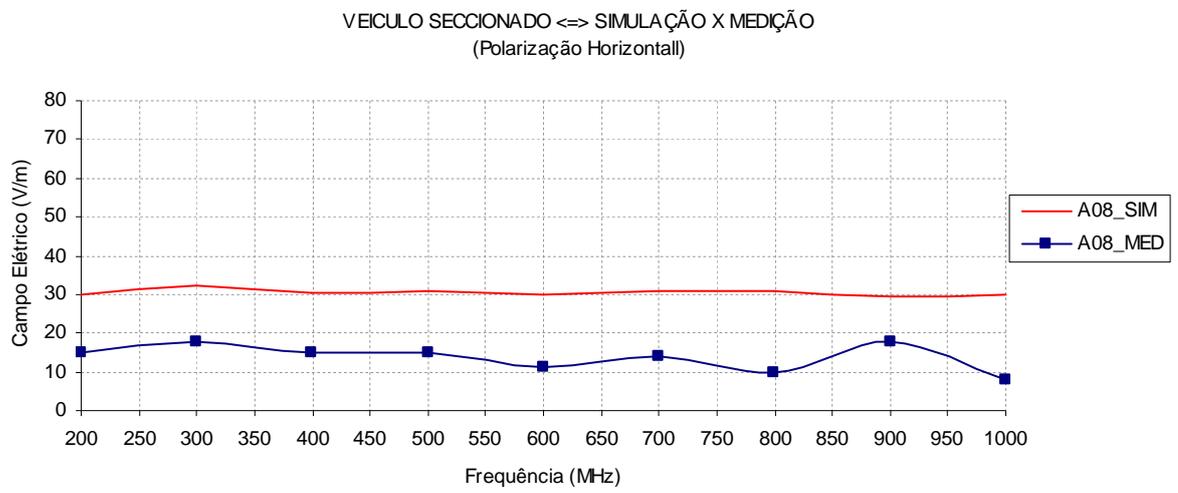


Figura 5.6 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **A08**, pol. Horizontal

5.2.2 Pontos B06, B07 e B08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente

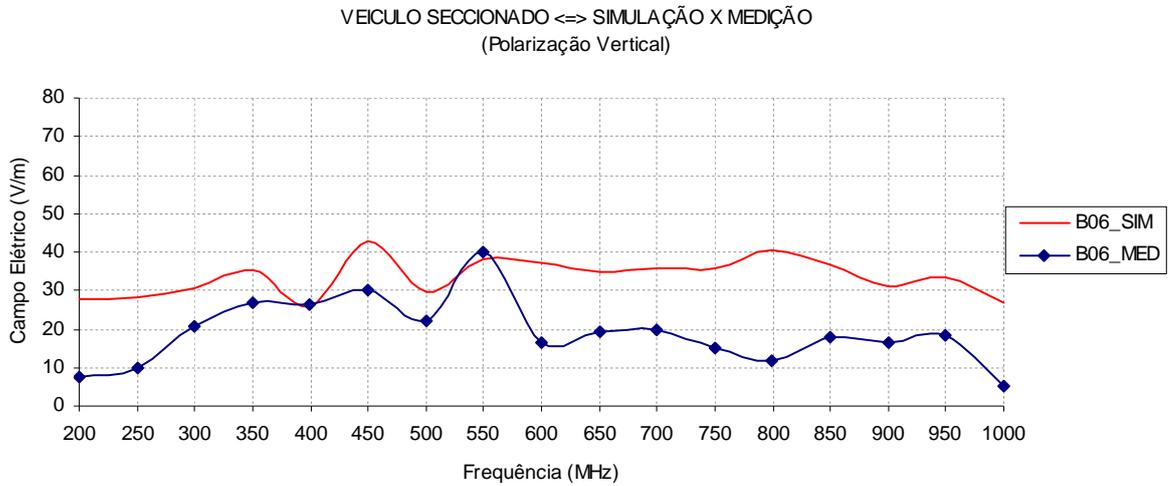


Figura 5.7 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **B06**, pol. Vertical

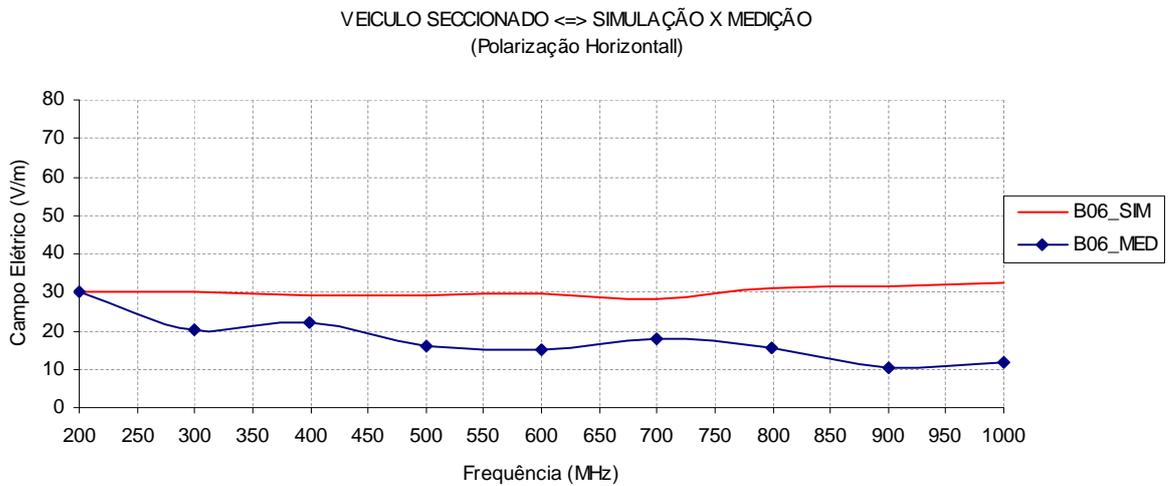


Figura 5.8 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **B06**, pol. Horizontal

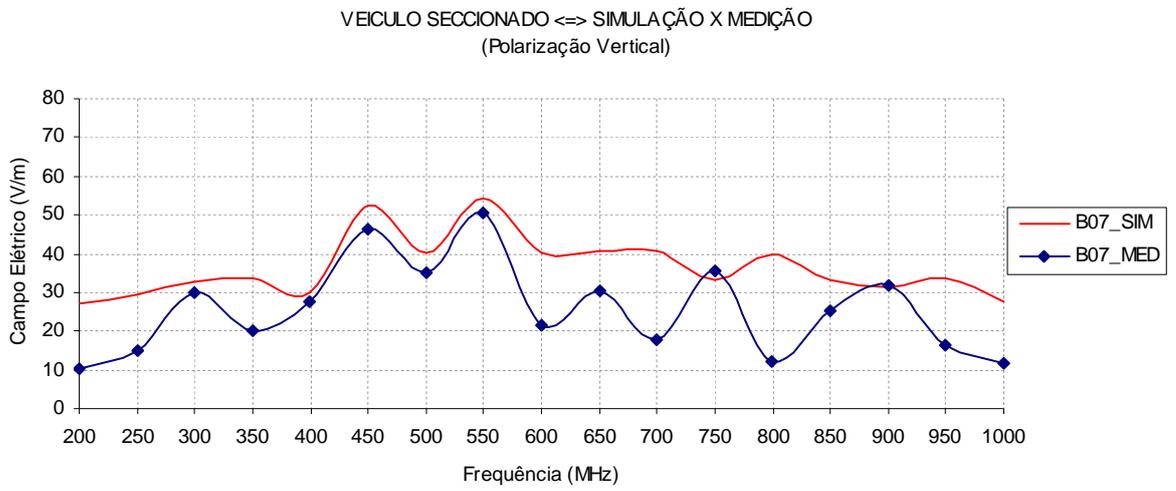


Figura 5.9 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **B07**, pol. Vertical

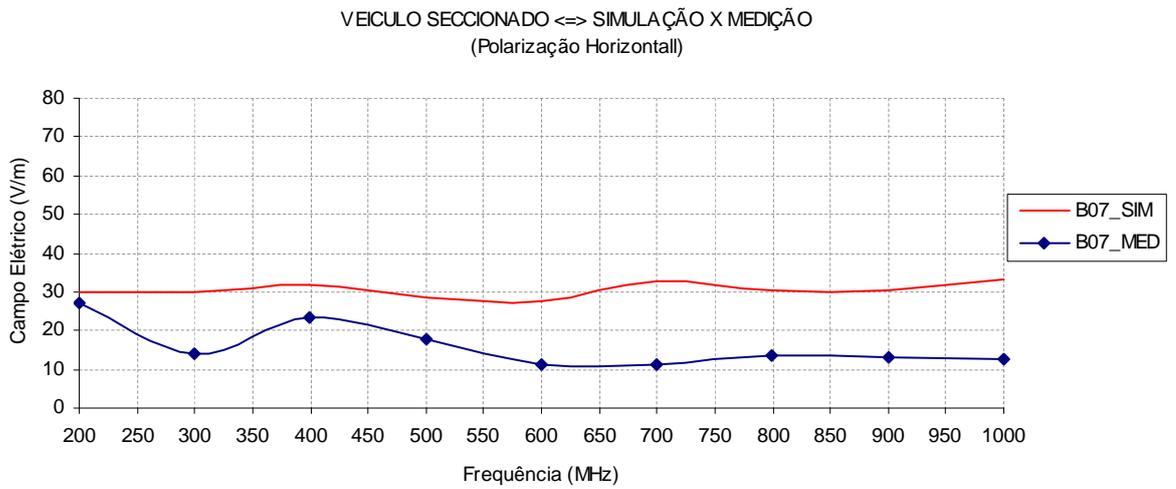


Figura 5.10 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **B07**, pol. Horizontal

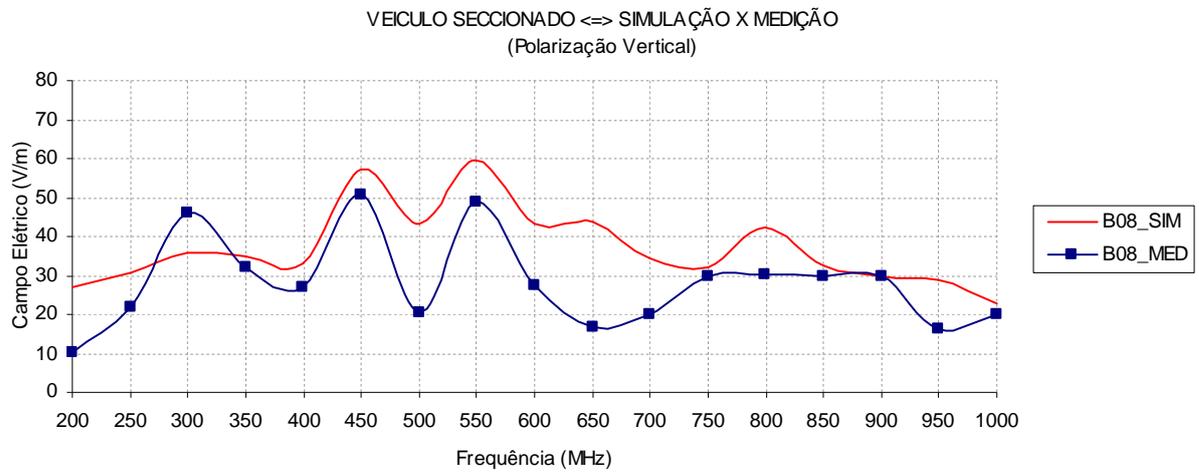


Figura 5.11 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **B08**, pol. Vertical

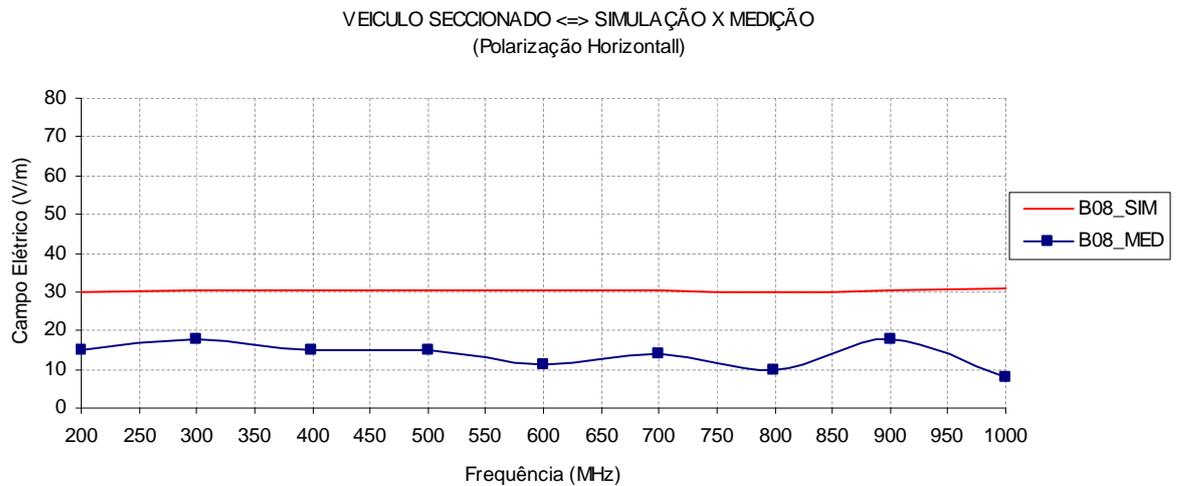


Figura 5.12 – Veículo Seccionado: Medição x Simulação, ponto **B08**, pol. Horizontal

5.2.3 Análise dos Resultados: Cálculo X Medição

Uma estrutura metálica com aberturas, como a estrutura veicular, disposta na trajetória de propagação de uma onda eletromagnética será vista por essa como uma impedância. Essa impedância por sua vez terá um valor dinâmico que será resultado da interação entre o tamanho físico da abertura em relação ao comprimento de onda do campo incidente. Como apresentado no item 4.2.1 para uma abertura retangular será mais importante aquela dimensão que esteja em um sentido tal que seja perpendicular à polarização do campo incidente.

Para os pontos de medição A06, A07, A08, nas figuras 5.1, 5.3, 5.5 respectivamente, situados à 70 cm do assoalho do veículo, com o campo polarizado verticalmente, observa-se mais nitidamente que para determinadas frequências há uma tendência de amplificação do campo resultante. Comportamento tal que pode ser observado tanto nos resultados de simulação quanto nas medições, o que em termos qualitativos representam uma razoável aproximação entre os valores simulados com os medidos.

A Tabela 5.1 apresenta as frequências onde há uma tendência de amplificação do campo resultante para uma incidência polarizada verticalmente. Nessa tabela há um comparativo para cada frequência, do quanto representa a maior dimensão da abertura do pára-brisa em termos de meio comprimento de onda do campo incidente.

Tabela 5.1 – Comparação da maior dimensão da abertura com o comprimento de onda

Frequência MHz	$\frac{\lambda}{2}$	$\frac{1,4m}{(\lambda / 2)}$
350	0,43	3,27
450	0,33	4,20
550	0,27	5,13
650	0,23	6,07
750	0,20	7,00
850	0,18	7,93
1000	0,15	9,33

Com o campo polarizado verticalmente, a dimensão do pára-brisa de 1400 mm (1,4 metros) é a que está perpendicular ao sentido de polarização do campo incidente. Ao compararmos essa dimensão em termos de meio comprimento de onda do campo incidente, Tabela 5.1, observamos uma razoável aproximação para números inteiros dessa grandeza.

Na polarização horizontal, observa-se claramente nas figuras 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.12, que o efeito da abertura é bastante atenuado. O campo resultante é pouco perturbado em relação ao campo incidente, não apresentando as ampliações observadas na polarização vertical. Além disto, para a polarização horizontal, a dimensão de interesse da ranhura (dimensão vertical do pára-brisa, com 500 mm) é bem menor que a outra dimensão de 1400 mm, não se aplicando a formulação simplificada que permite estimar os pontos de ressonância. Ainda, conforme item 4.2.1, Figura 4.5, a falta de ampliações (ressonâncias) no caso da polarização horizontal, se explica pelo comportamento da abertura.

Um fato observado praticamente em todos os resultados referentes à polarização horizontal foi uma diferença constante de aproximadamente 10 V/m entre os resultados medidos e simulados. Não foi possível identificar uma possível causa para esse comportamento.

Na região dos pontos de medição B06, B07, B08, figuras 5.7, 5.9, 5.11 respectivamente, situados a 50 cm do assoalho do veículo, observa-se que ainda se repetem alguns picos de ampliações. Porém essa região, já um pouco mais distante da abertura, as ampliações são menos pronunciadas como acontecem para os pontos A06, A07, A08 nas respectivas figuras 5.1, 5.3, 5.5, que se encontra muito próximo da periferia da abertura. Porém, ainda é possível se destacar a influência do efeito da abertura nessa classe de problema eletromagnético uma vez que as ampliações ainda estão presentes.

5.2.4 Veículo Seccionado X Veículo Inteiro: Comparação entre Resultados da Simulação

Nesse tópico são apresentadas as comparações entre os resultados das simulações numéricas entre o veículo seccionado e o veículo inteiro. Os gráficos apresentam os resultados tanto para a fonte polarizada verticalmente quanto horizontalmente.

5.2.5 Pontos A06, A07 e A08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente

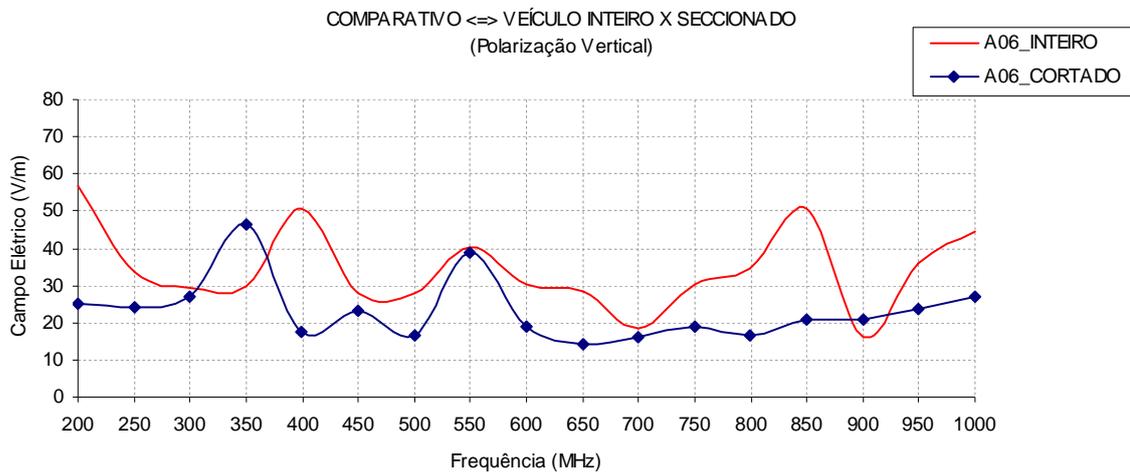


Figura 5.13 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto A06, pol. Vertical

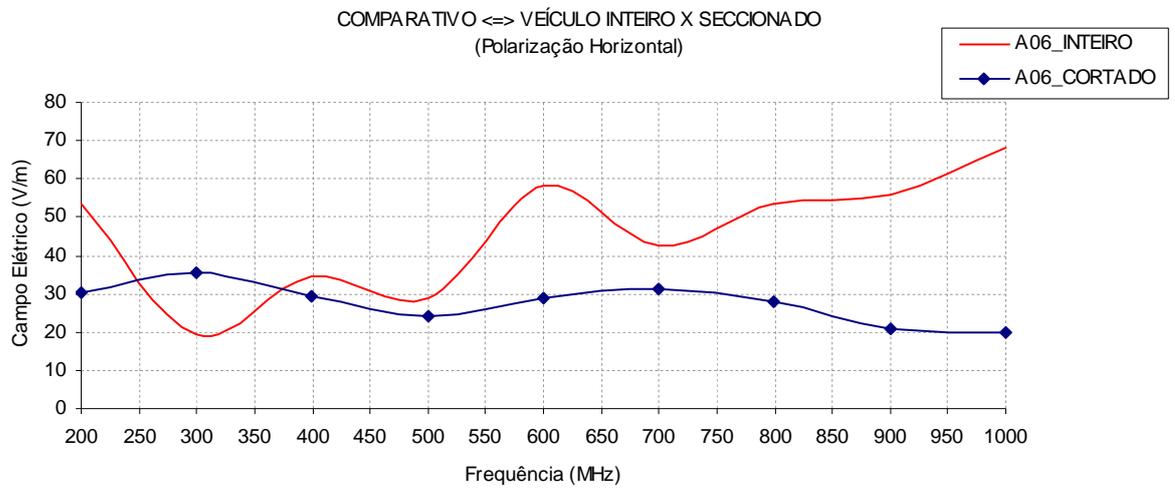


Figura 5.14 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **A06**, pol. Horizontal

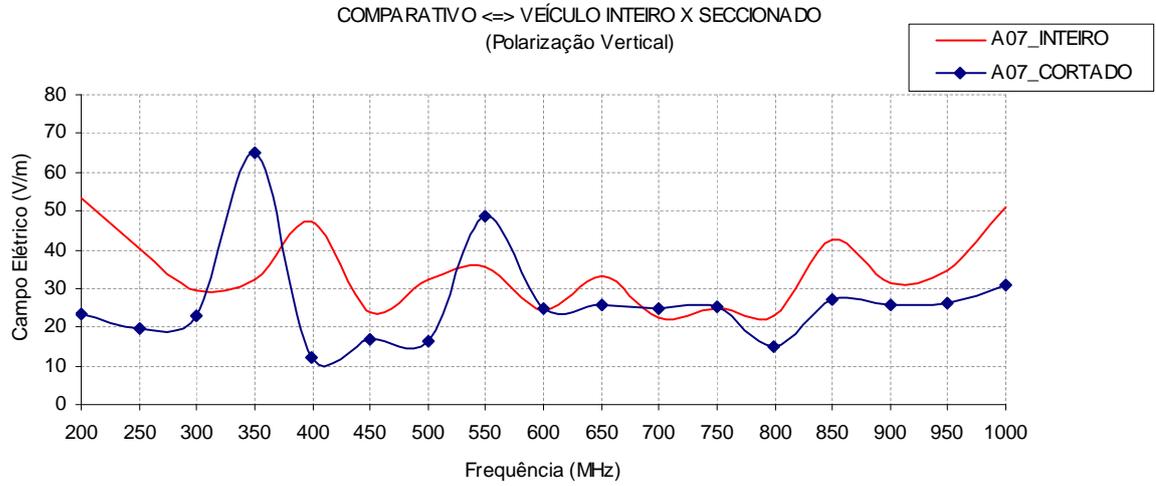


Figura 5.15 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **A07**, pol. Vertical

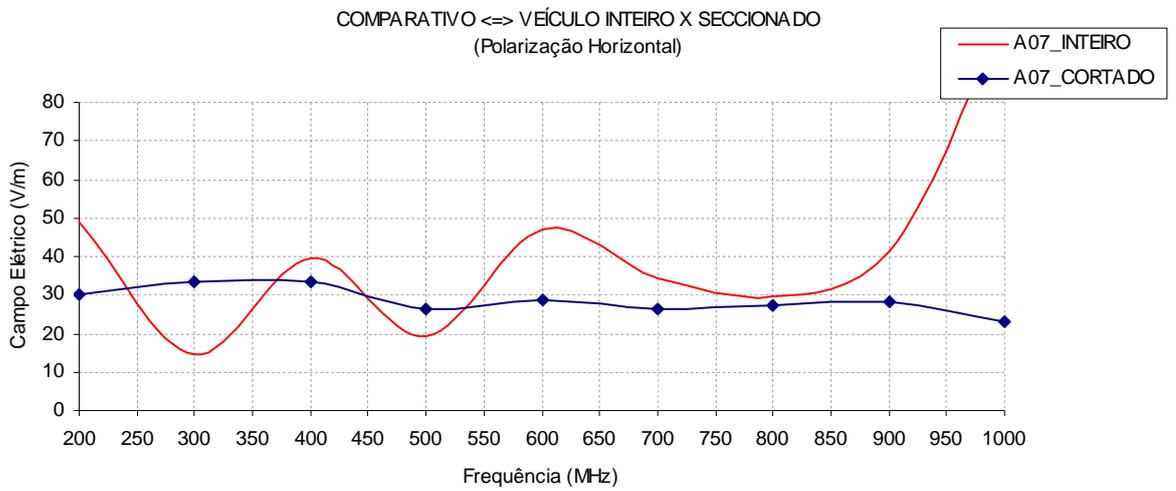


Figura 5.16 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **A07**, pol. Horizontal

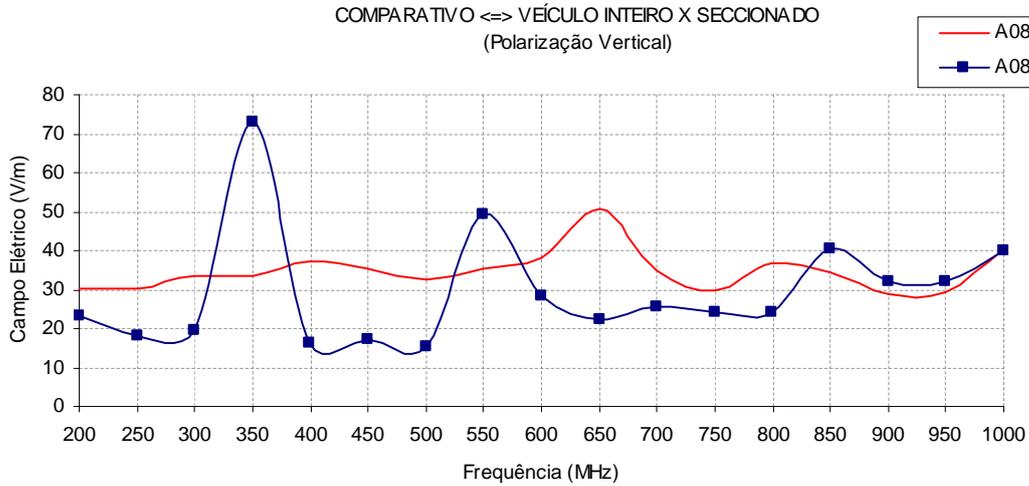


Figura 5.17 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **A08**, pol. Vertical

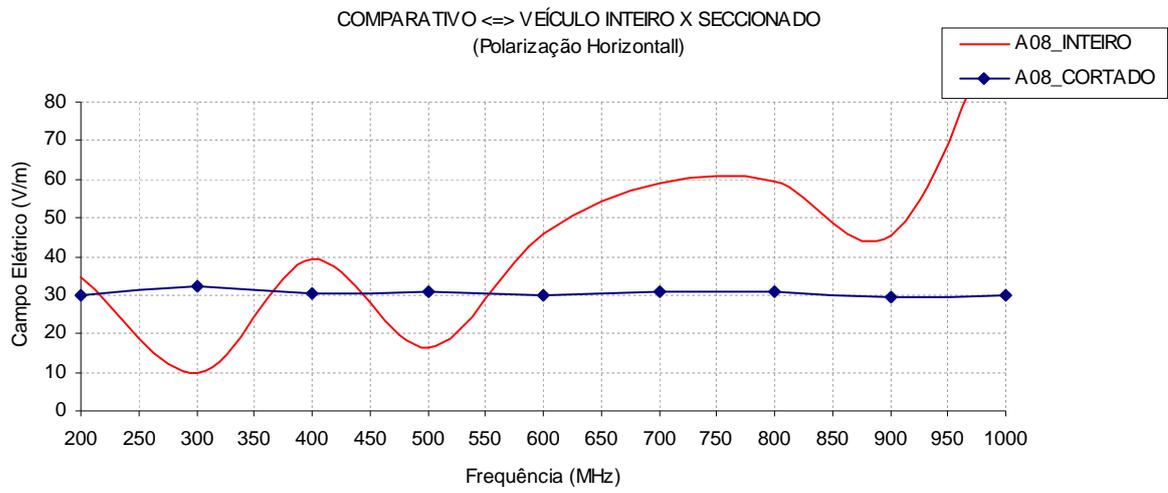


Figura 5.18 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **A08**, pol. Horizontal

5.2.6 Pontos B06, B07 e B08: Polarização vertical e horizontal do campo incidente

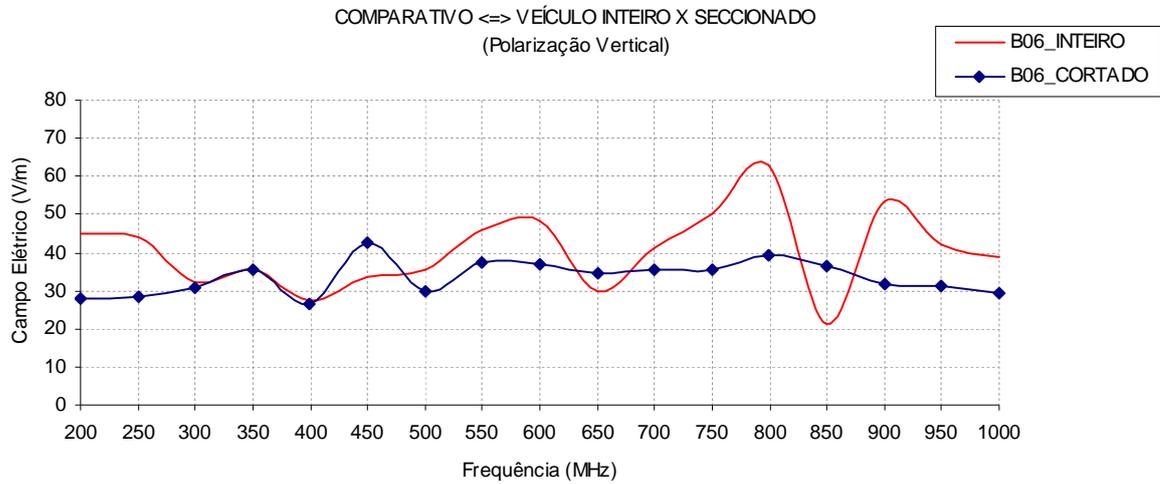


Figura 5.19 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **B06**, pol. Vertical

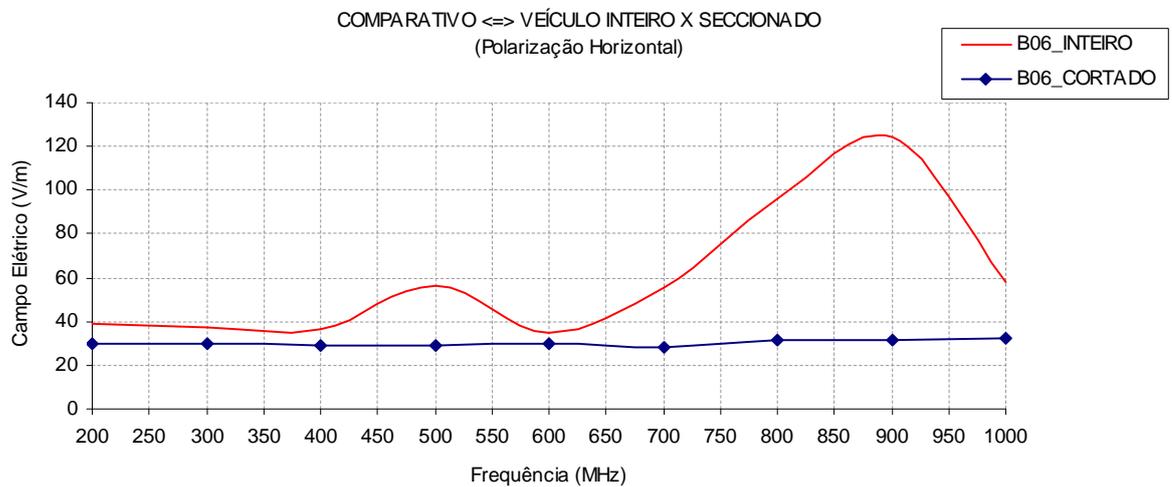


Figura 5.20 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **B06**, pol. Horizontal

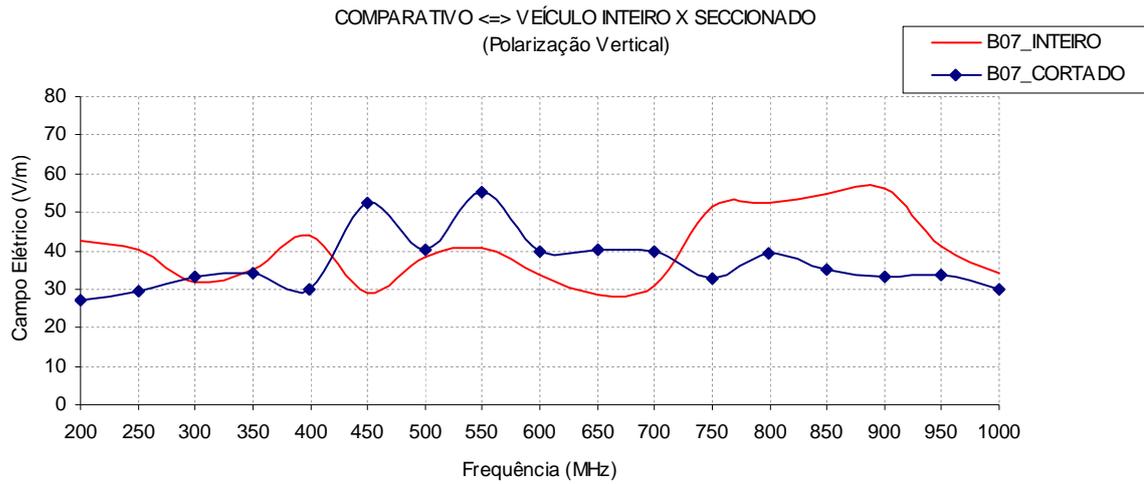


Figura 5.21 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **B07**, pol. Vertical

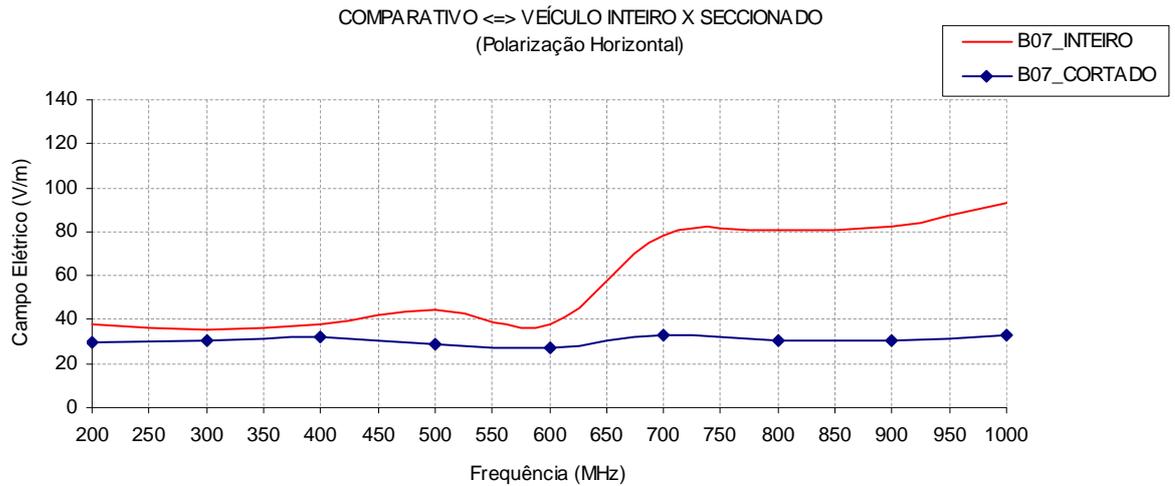


Figura 5.22 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **B07**, pol. Horizontal

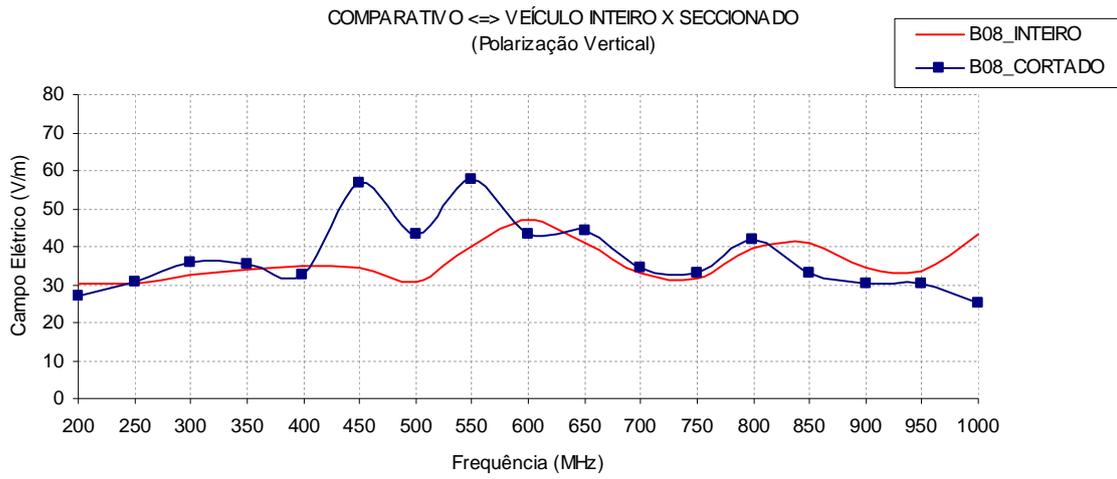


Figura 5.23 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **B08**, pol. Vertical

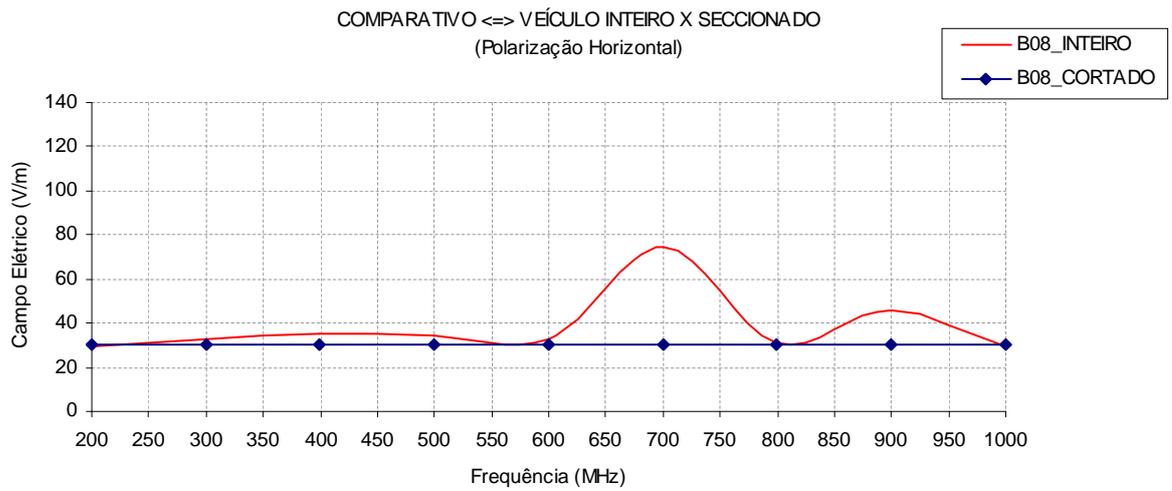


Figura 5.24 – Comparativo: Veículo Inteiro x Seccionado, ponto **B08**, pol. Horizontal

5.2.7 Análise dos Resultados: Veículo Inteiro X Veículo Seccionado

Neste item são comparados os resultados de simulação entre a estrutura cortada com a completa. A comparação entre simulação e medição para o caso da estrutura veicular completa não foi realizada pelo fato dos resultados de medição não terem sido abordados em (SANTOS, 2007), fonte de dados para esse trabalho. Mesmo se tratando de estruturas diferentes sob o ponto de vista eletromagnético, ainda é possível observar que os resultados são razoavelmente próximos, exceto para algumas frequências. O comportamento tendencioso de amplificação do campo também está presente para o caso da estrutura inteira, ora coincidindo com a estrutura seccionada ora para valores distintos de frequência.

No caso da estrutura veicular inteira, além das ressonâncias devidas às aberturas, existem outros fatores que irão influir nos resultados. As aberturas referentes ao pára-brisa traseiro e também das janelas laterais, não diferente do pára-brisa frontal, também terão uma parcela de influência na resultante final do campo.

Além disto, no caso da estrutura veicular completa o compartimento de passageiros funciona como uma cavidade ressonante, com a conseqüente amplificação do campo devido à ressonância. Esse comportamento de cavidade ressonante não está presente para o caso da estrutura veicular seccionada.

A combinação dos diversos modos ressonantes implica em condições de campos máximos distintos para o veículo inteiro ou cortado. Entretanto, os níveis de campo resultantes, na faixa de frequências de interesse, são em média razoavelmente próximos.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Os modelos dos veículos seccionado e inteiro utilizados nas simulações e experimentos são em síntese objetos distintos sob o ponto de vista eletromagnético. Levando-se em consideração o grau de dificuldade tanto na parte de simulação quanto ao processo de medição, observa-se de forma qualitativa, uma razoável similaridade entre os valores de campos simulados e medidos para a estrutura veicular seccionada.

O seccionamento do veículo proposto pelo projeto de pesquisa parece razoável sob o aspecto eletromagnético. Destaca-se, no entanto, que as estruturas em teoria são diferentes e passíveis de fenômenos eletromagnéticos distintos, como o caso da cavidade ressonante que poderá estar presente na estrutura completa. Como pôde ser observado nos resultados comparativos entre as estruturas existem diferenças entre os resultados, esses se aproximando mais ou menos de acordo com as faixas de frequência consideradas. Porém de acordo com o item 2.4.2, onde é apresentada a forma como é distribuída a eletrônica em um veículo, fica claro que a região onde há uma concentração maior da eletrônica não é modificada com o seccionamento da estrutura veicular. Logo o esquema de medição proposto pelo projeto de pesquisa é factível sob esse aspecto, visto que na região correspondente ao volume dos passageiros, foco principal dos cálculos e medições realizadas, os níveis de campo resultante submeterão os sistemas eletrônicos a valores comparáveis ao caso do veículo inteiro.

Para uma estrutura veicular realística, adotando as simplificações possíveis no modelo e com a utilização de ferramentas computacionais de simulação, seria possível avaliar qualitativamente e quantitativamente a diferença entre um modelo completo e outro seccionado. Isso possibilitaria avaliar quais os ajustes necessários em termos de ganho, amplitude de fonte e em que faixa de frequência poder-se-ia realizar os ensaios na câmara semianecóica de dimensões reduzidas com um modelo seccionado. Sob o ponto de vista prático, caso seja inviável o ajuste da instrumentação laboratorial para compensar a diferença entre os modelos, ainda seria válido o conhecimento de que para determinada faixa de frequência a eletrônica embarcada poderá estar sujeita a intensidades de campo maiores ou menores.

De forma geral o esquema proposto pelo projeto de pesquisa é uma importante ferramenta de análise preliminar para a eletrônica embarcada. O uso dessa proposta de ensaio,

levando-se em conta as observações já feitas, minimizaria o envio de protótipos para laboratórios conforme recomendado pela (ISO 11451-2, 2001), já que, tanto o envio para testes quanto a construção de instalações desse porte exigem altos investimentos. Pois somente após uma série de análises preliminares realizadas na câmara semianecóica de dimensões reduzidas, um protótipo seria enviado para testes nas condições recomendadas pela (ISO 11451-2, 2001). Portanto, sob o ponto de vista da validade de utilização da estrutura veicular seccionada em testes preliminares de CEM, podemos concluir que a proposição é válida, devendo possibilitar redução de tempo e custo no desenvolvimento de novos veículos.

Este trabalho faz considerações que ainda não são conclusivas e definitivas sobre o tema proposto. De forma a buscar resultados mais fidedignos seria preciso avaliar estruturas e condições mais realísticas nas simulações computacionais. Uma das contribuições desse trabalho foi o de demonstrar a importância da compreensão de como estruturas similares a um veículo podem comportar eletromagneticamente. Esse entendimento é fundamental para se reduzir a complexidade dos modelos realísticos de forma que informações relevantes e fundamentais sejam mantidas. A análise utilizando modelos simplificados com uma conseqüente redução da complexidade numérica permitiu uma melhor identificação dos fenômenos eletromagnéticos mais relevantes, neste complexo problema de uma estrutura veicular iluminada por uma onda plana incidente.

Muito ainda necessita ser feito para que se possa utilizar com maior eficiência as ferramentas de cálculo de campo para aumentar o grau de confiança na utilização de seus resultados no contexto do projeto em discussão. Destacamos três assuntos, que ficam como sugestão para trabalhos futuros:

- Utilização de processamento paralelo para o cálculo de campo, incluindo a possibilidade de se avaliar a iluminação com incidência lateral;
- Modelamento da antena fonte em lugar de uma simples onda plana;
- Utilização de estruturas veiculares realísticas, valendo-se da simplificação dos detalhes não relevantes sob o ponto de vista eletromagnético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIANO, R. L. S, **Modelagem Computacional Aplicada à Solução de Problemas de Interação Eletromagnética**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais.

ADRIANO, R. L. S. **Relatório Detalhado das Atividades Desenvolvidas** Trabalho de atividades desenvolvidas para o Projeto de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq n° 55025-2003/3, UFMG, 2005.

ANDERSEN, P. An Overview of Automotive EMC Standards, **IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, v. 3, p. 812 – 816, Aug. 2006.

AZARO, R., *et al.* A Circuitual Approach to Evaluating The Electromagnetic Field on Rectangular Apertures Backed by Cavities, **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 10, p. 2259-2266, Oct. 2002.

BIENERT, R. W. **EMC In Automotive Applications**, Disponível em: <http://www.conformity.com/artman/publish/article_125.shtml>. , Acesso em: 10 set. 2004.

CABRAL, S. W. A Survey of Commercially Available Electromagnetic Modeling Software, **IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, p. 244 – 248, Aug. 1993

COLLIN, R. E. **Foundations for Microwave Engineering** 2 ed. Singapore: McGraw-Hill International Editions, 1992.

DE LEO, R. *et al.* **Cars: Modeling The Electromagnetic Field for Radiate Immunity Tests**, Disponível em: <http://www.ce-mag.com/ce-mag.com/archive/01/03/0103CE_036.html>. Acesso em: 15 set. 2004.

DESHPANDE, M. D. **Electromagnetic Field Penetration Studies** NASA National Aeronautics and Space Administration, Document prepared for Langley Research Center under Contract NAS1-96013, Hampton, Virginia, Jun. 2000.

ISO 11451-2:2001: **Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 2: Off-vehicle radiation sources.**

JITHESH, V; PANDE D. C. A Review on Computational EMI Modeling Techniques, **8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility**, p. 159-

166, Dec. 2003.

KUMAR, A. Electromagnetic Radiation and Biological Effects. **IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, v. 2, p. 1048 – 1053, Aug. 2001.

LIMA, J. F. **Esquema de Classificação de Laboratório Aplicação em Laboratórios dos Cursos de Graduação em Engenharia Elétrica**. 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NOBLE, I. E. Electromagnetic Compatibility in the Automotive Environment. **IEE Proceedings Science, Measurements Technologies**, v. 141, p. 252-258, Mar. 1994.

OTT, H. W. **Noise Reduction Techniques in Electronic Systems** 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1988.

PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility** 1. ed. New York: Wiley Interscience, 1992.

PAVÃO, A. C. **Apresentação sobre Compatibilidade Eletromagnética**, Disponível em: <<http://www.abricem.com.br>>. Acesso em: 22 mar. 2008.

PEREIRA, C. M. et al. A New Proposal for EMI Testing of Automobiles: Calculation of Field Penetration inside the Vehicle. **Anais do MOMAG 2006 - 12 SBMO - Simpósio Brasileiro De Microondas E Optoeletrônica E 7 CBMAG Congresso Brasileiro De Eletromagnetismo**, ago. 2006.

PLOUMAN, R. J. **Lightning & EMC A Review and Introduction**. IEE Electromagnetic Compatibility, London, 1996.

PORTER, S.J.; DAWSON, J. F. Electromagnetic Modeling for EMC Using Finite Methods, **IEE Proceedings on Measurement and Technology**, v. 141, p. 303-309, Jul. 1994.

RADASKY, W. A.; WILK, M. W., Overview of the Threat of Intentional Electromagnetic Interference, **Proceedings, Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic**, p. 17 – 19, 2000.

ROBINSON, M. P. *et al.* Analytical Formulation for the Shielding Effectiveness of Enclosure with Aperture. **IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, p. 240–248, Aug. 1998.

RUBINSTEIN, A. *et al.* Parallel Implementation of NEC for the Analysis of Large

Structures, **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 45, p. 177 – 188, May 2003

SADIKU, M. N. O. **Numerical Techniques in Electromagnetics**. 1 ed. New York: CRC Press, 2001.

SANTOS, L. A. L. **Análise Experimental do Ensaio Veicular de Imunidade a Campos Eletromagnéticos Radiados em Câmara Semianecóica de Pequeno Porte**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

WARD, D.D.; LAWTON, S. Numerical Modeling for Automotive EMC, **IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, p 222-227, Aug. 1995.

WHITE, D. R. J.; MARDIGUIAN, M. **Electromagnetic Shielding**. 1 ed. Singapore: McGraw-Hill International Editions, 1992.

WILES, M. **Chambers, Choosing the Right Chamber Depends on the Application**, Disponível em: <<http://www.conformity.com>>. Acesso em: 15 out. 2007.

YOUNG, P. Electromagnetic Compatibility for Automotive Electronics **IEEE Seminar on Electromagnetic Compatibility for Automotive Electronics**, p. 1/1 - 1/5, 1999.

YOUNG, P. **Future Trends in EMC Testing of Automotive Systems**. IEE Electromagnetic Compatibility, London, 1999.

APÊNDICE A

Normas Aplicadas a Testes de CEM em Automóveis

Neste apêndice são listadas as principais normas e procedimentos de testes já publicados até então:

- GM9112P: Immunity to Radiated Electromagnetic Fields (BCI Method) EMC - Component Test Procedure.
- GM9120P: Immunity to Radiated Electromagnetic Fields - (Reverberation Method) EMC - Component Test Procedure.
- J1113/1_199507: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedures and Limits for Vehicle Components (except aircraft) 60 Hz to 18 GHz. (SAE)
- J1113/2_199609: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components (except aircraft) Conducted Immunity, 30 Hz to 250 kHz. All Leads. (SAE)
- J1113/3_199511: Conducted Immunity, 250 kHz to 500 MHz, Direct Injection of Radio Frequency (RF) Power. (SAE)
- J1113/4_199802: Immunity to Radiated Electromagnetic Fields. Bulk Current Injection (BCI) Method. (SAE)
- J1113/11_200003: Immunity to Conducted Transients on Power Leads. (SAE)
- J1113/12_200010: Electrical Interference by Conduction and Coupling - Coupling Clamp and Chattering Relay. (SAE)
- J1113/13_199710: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components - Part 13. Immunity to Electrostatic Discharge. (SAE)
- J1113/21_199801: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components - Part 21. Immunity to Electromagnetic Fields, 10 kHz to 18 GHz. Absorber-Lined Chambers. (SAE)
- J1113/22_199610: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components - Part 22. Immunity to Radiated Magnetic Fields from Power Lines. (SAE)

- J1113/23_199509: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components. Immunity to Radiated Electromagnetic Fields, 10 kHz to 200 MHz. Strip Line Method. (SAE)
- J1113/24_200005: Immunity to Radiated Electromagnetic Fields, 10kHz to 200 MHz, Crawford TEM Cell and 10 kHz to 5 GHz, Wideband TEM Cell. (SAE)
- J1113/25_199902: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components. Immunity to Radiated Electromagnetic Fields, 10 kHz to 1000 MHz, Tri-Plate Line Method. (SAE)
- J1113/26_200107: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components. Immunity to AC Power Line Electric Fields. (SAE)
- J1113/27_199502: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedure for Vehicle Components - Part 27. Immunity to Radiated Electromagnetic Fields, Reverberation Method. (SAE)
- J1113/41_200005: Limits and Methods of Radio Disturbance Characteristics of Components and Modules for the Protection of Receivers Used On-Board Vehicles. (SAE)
- J1113/42_200004: Electromagnetic Compatibility - Component Test Procedure - Part 42, Conducted Transient Emissions. (SAE)
- J1497_199404: Design Guide for Formed-in-Place Gaskets. (SAE)
- J1752/1_199703: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedures for Integrated Circuits. Integrated Circuit EMC Measurement Procedures, General and Definition. (SAE)
- J1752/2_199503: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedures for Integrated Circuits. Integrated Circuit Radiated Emissions Diagnostic Procedure, 150 kHz to 1000 MHz, Magnetic Field. Loop Probe. (SAE)
- J1752/3_199503: Electromagnetic Compatibility Measurement Procedures for Integrated Circuits. Integrated Circuit Radiated Emissions Measurement Procedure, 150 kHz to 1000 MHz. TEM Cell. (SAE)
- J551/1_199606: Performance Levels and Methods of Measurement of Electromagnetic Compatibility of Vehicles and Devices, 60 Hz to 18 GHz. (SAE)
- J551/2_199403: Test Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Vehicles, Motorboats, and Spark-Ignited Engine-Driven Devices. (SAE)

- J551/4_200005: Test Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Vehicles and Devices, Broadband and Narrowband, 150 kHz to 1000 MHz. (SAE)
- J551/5_199712: Performance Levels and Methods of Measurement of Magnetic and Electric Field Strength from Electric Vehicles, Broadband, 9 kHz to 30 MHz. (SAE)
- J551/11_200009: Vehicle Electromagnetic Immunity - Off-Vehicle Source. (SAE)
- J551/12_199609: Vehicle Electromagnetic Immunity - On-Board Transmitter Simulation. (SAE)
- J551/13_199403: Vehicle Electromagnetic Immunity - Bulk Current Injection. (SAE)
- J551/15_199505: Vehicle Electromagnetic Immunity - Electrostatic Discharge (ESD). (SAE)
- J551/17_199710: Vehicle Electromagnetic Immunity - Power Line Magnetic Fields. (SAE)
- J1812_199610: Function Performance Status Classification for EMC Immunity Testing. (SAE)
- ISO 11451-1:2001: Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 1: General and definitions.
- ISO 11451-2:2001: Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 2: Off-vehicle radiation sources.
- ISO 11451-3:1994: Road vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Vehicle test methods - Part 3: On-board transmitter simulation.
- ISO 11451-4:1995: Road vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Vehicle test methods - Part 4: Bulk current injection (BCI).
- ISO 11451-1:2005—Road vehicles—Electrical disturbances by narrow-band radiated electromagnetic energy—Vehicle test methods—Part 1: General and definitions.

- ISO 11452-1:2001: Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 1: General and definitions.
- ISO 11452-2:1995: Road vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Component test methods - Part 2: Absorber-lined chamber.
- ISO 11452-3:2001: Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 3: Transverse electromagnetic mode (TEM) cell.
- ISO 11452-4:2001: Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 4: Bulk current injection (BCI).
- ISO 11452-5:1995: Road vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Component test methods - Part 5: Stripline.
- ISO 11452/6: Road Vehicles - Electrical Disturbances by Narrowband Radiated Electromagnetic Energy - Component Test Methods - Part 6: Parallel Plate Antenna (ISO).
- ISO 11452-7:1995: Road vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Component test methods - Part 7: Direct radio frequency (RF) power injection
- CISPR 12, Ed. 5.0 (2005)—Vehicles, motorboats, and spark-ignited engine-driven devices—Radio disturbance characteristics—Limits and methods of measurement.
- ISO 7637-1:2002—Road vehicles—Electrical disturbance by conduction and coupling—Part 1: Passenger cars and light commercial vehicles with nominal 12-V supply voltage—Electrical transient conduction along supply lines only.
- ISO 10605:2001—Road vehicles—Electrical disturbances from electrostatic discharges.