

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE AMORTECEDORES NAS VIBRAÇÕES DE
PORTAS DE VEÍCULOS AUTOMOTIVOS ATRAVÉS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA
DE ENERGIA**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Na Área de Concentração RUÍDO E VIBRAÇÕES

RODRIGO GUSTAVO GIAROLA

Florianópolis, Dezembro de 2003.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE AMORTECEDORES NAS VIBRAÇÕES DE PORTAS DE
VEÍCULOS AUTOMOTIVOS ATRAVÉS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ENERGIA**

RODRIGO GUSTAVO GIAROLA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Roberto Jordan, Dr. Eng. - Orientador

Prof. José Antonio Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Samir N. Y. Gerges, Ph. D. – Presidente.

Arcanjo Lenzi, Ph. D.

Lauro César Nicolazzi, Dr. Eng.

Marcelo Krajnc Alves, Ph. D.

“ A ação da empresa na formação profissional, pela amplitude, diversidade e importância que assume no estágio atual no desenvolvimento Brasileiro pode ser considerada como um dos fatores preponderante para os objetivos da aprendizagem, de qualificação, do aperfeiçoamento e da especialização dos recurso humanos visualizado, devendo ser incentivada pelos poderes públicos. ”

Oliver Gomes Cunha

Dedico esta dissertação, a minha família, a meus pais, Paulo José Giarola e Maria Trindade de Campos Giarola pelo exemplo de caráter, dedicação e simplicidade, especialmente pelo incentivo nos momentos mais difíceis durante as diversas etapas da vida e ao meu irmão Igor Gustavo Giarola pelo incentivo.

Dedico em especial, a minha esposa Alessandra C. S. Giarola, pela compreensão, pela paciência e pela ajuda incondicional na busca deste sonho que é a obtenção do título de Mestrado.

AGRADECIMENTOS

A Fiat Automóveis, por ter me proporcionado a realização de um trabalho como este.

A D. Silvana Rizzioli, pela ajuda e disponibilidade as quais foram dedicadas a mim para que pudesse ir até Santa Catarina realizar os experimentos para Mestrado e, conseqüentemente, concluir a dissertação.

Ao setor de pintura da Fiat Automóveis, sua gerência, por ter contribuído diretamente na realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Jordan, pela orientação, pela presteza a mim dedicada na etapa em que estive na Universidade e acima de tudo pelo apoio constante dedicado na realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Catarina, na pessoa do Prof. Dr. Samir Gerges, pelo acolhimento e disponibilização de equipamento durante a etapa experimental.

Ao fornecedor de TORO, pela disponibilização de informações referentes ao seu produto e também ao seu laboratório em São Paulo por realizar experimentos necessários na conclusão deste trabalho.

Ao setor de Acústica e Vibração da FIAT Automóveis pela ajuda e disponibilização dos equipamentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiv
NOMENCLATURA.....	xvi
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II – AMORTECEDORES (INSONORIZANTE).....	5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Características Físico-Químicas.....	6
2.3 - Processo de Fabricação.....	7
2.4 - Necessidade de ensaios para aprimoramento dos Amortecedores.....	11
2.5 - Especificação técnica do produto.....	14
2.5.1 - Prescrição para a Qualificação do Produto.....	18
2.5.2 - Características gerais do material.....	18
2.5.3 - Testes de laboratório com os insonorizantes (amortecedores).....	18
2.5.3.1 - Adesão à placa na temperatura ambiente.....	19
2.5.3.2 - Escorrimento de superfícies verticais.....	20
2.5.3.3 - Escorrimento de superfícies verticais.....	21
2.5.3.4 - Eficiência do poder magnético.....	22
2.5.3.5- Poder do Insonorizante.....	23
2.5.3.6 - Eficiência do Tratamento Anti-Blocante.....	25

2.5.4 - Características Gerais de seus Componentes	25
2.5.4.1 - Dimensão e Tolerância	25
2.5.4.2 - Exame Visual	26
2.5.4.3 - Adesão à Temperatura Ambiente	26
2.5.4.4 - Escorrimento em Superfície Vertical.....	26
2.6 - Prescrição para a escolha do Fornecedor.....	26
2.6.1 - Fornecimento para a Qualificação do Produto	27
2.6.2 - Fornecimento para a produção.....	27
2.7 - Procedimento para determinação de parâmetros do material (betume)	28
2.7.1 - Densidade (ρ).....	28
2.7.2 - Módulo de Elasticidade (E).....	29
2.7.3 - Coeficiente de Poisson (ν).....	33
CAPÍTULO III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
3.1 - Análise Estatística de Energia (SEA)	35
3.1.1 - Histórico	35
3.1.2 - Introdução ao SEA	36
3.1.3 - Fundamentos da Análise Estatística de Energia – SEA	39
3.2 - Equações Básicas Utilizadas em SEA	40
3.2.1 - Energia	40
3.2.2 - Fluxo de energia entre dois subsistemas	41
3.2.2.1 - Fator de perda por amortecimento.....	41
3.2.2.2 - Fator de perda por acoplamento	42
3.2.3 - Balanço de Energia	43
3.2.4 - Densidade Modal	44
3.2.5 - Mobilidade.....	46
3.2.6 - Amortecimento Estrutural	46
3.2.6.1 - Método do Decaimento.....	47
3.2.6.2 - Método da Potência de Entrada.....	48
3.3 - Tratamentos Viscoelásticos	50
3.3.1 - Materiais Viscoelásticos.....	50
3.3.2 - Propriedades mecânicas dos materiais viscoelásticos.....	51

3.3.3 - Efeitos da temperatura nos materiais viscoelásticos	52
3.3.4 - Efeitos da frequência nos materiais viscoelásticos	52
CAPÍTULO IV – MODELAGEM EXPERIMENTAL	53
4.1 - Introdução	53
4.2 - Métodos de Trabalho	54
4.2.1 - Método de Decaimento para Placa Plana (Amortecimento)	54
4.2.2 - Método do Decaimento para Porta (Amortecimento).....	59
4.2.3- Instrumentação Utilizada para o Método de Decaimento	63
4.2.4 - Representação esquemática dos experimentos	64
4.2.5 - Método da Potência de Entrada	65
4.2.5.1 -Calibração	67
4.2.5.2 Execução do Experimento.....	69
4.2.5 - Instrumentação utilizada para o Método de Potência de Entrada.....	74
4.2.6 - Representação esquemática do experimento	74
4.3- Modelagem <i>AUTOSEA</i>	75
4.3.1 - Construção do Modelo	75
4.3.2 - Construção dos Subsistemas.....	76
4.3.3 - Junção dos Subsistemas em SEA.....	79
4.3.4 – Cálculo do fator de amortecimento para estrutura metálica	80
4.3.5 - Definição de Materiais em SEA	81
CAPÍTULO V – ANÁLISE DE RESULTADOS	82
5.1 - Introdução	82
5.2 - Obtenção dos Resultados	82
5.2.1 - Dados para a Potência de Entrada.....	82
5.2.2 - Dados para o cálculo da Energia Cinética.....	88
5.3 - Parâmetro em SEA	103
5.3.1 - Configuração do Modelo.....	103
5.3.2 - Validação do Modelo	105
5.3.2.1 – Densidade Modal	113

5.3.2.2 – Número de modos por faixa de frequência	118
5.3.2.3 – Modal Overlap Factor (MOF)	123
5.3.2.4 – Fator de perda	128
5.3.2.5 – Fator de acoplamento	129
5.3.2.6 – Alteração da representação da porta	137
5.4 - Resultados Obtidos	138
CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	148
6.1 - Conclusão.....	148
6.2 – Sugestão e Trabalhos Futuros.....	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II

Figura 2.1 - Amortecedor acústico localizado na porta do veículo (exemplo)	5
Figura 2.2 - Peças empilhadas ao lado da linha de produção.....	8
Figura 2.3 - Ensaio dos amortecedores não-magnéticos (escorrimento de 2mm).....	13
Figura 2.4 - Ensaio dos amortecedores magnéticos (aderência mediante remoção – dest.)	14
Figura 2.5 - Tempo x temperatura	17
Figura 2.6 - Presença no forno x temperatura	17
Figura 2.7 - Rolo.....	20
Figura 2.8 - Suporte Inclinado.....	20
Figura 2.9 e 2.10 - Suporte curvo	21
Figura 2.11 - Paralelepípedo Hexagonal.....	23
Figura 2.12 - Espessura em função do peso	23
Figura 2.13 - Curva da Espessura x tipo de amortecedor	25
Figura 2.14 - Ábaco desenvolvido pela <i>Shell Oil Company</i>	33

Capítulo III

Figura 3.1 - Comparação entre resposta em freq. discretas e os valores obtidos em SEA.....	38
Figura 3.2 - Fluxo de energia em SEA entre subsistemas.....	41
Figura 3.3 - Modelo clássico de SEA para o balanço de potência entre dois subsistemas	43
Figura 3.4 - Método de decaimento montagem do experimento.....	48
Figura 3.5 - Método de potência de entrada montagem do experimento.....	49

Capítulo IV

Figura 4.1 - Amortecimento duplo na placa plana	55
Figura 4.2 - Localização dos pontos na placa	56
Figura 4.3 - Fatores de perda para placa plana.....	59
Figura 4.4 - Pontos medição na porta	60
Figura 4.5 - Porta com amortecedor central (insonorizante entre painel e ossatura)	61

Figura 4.6 - Gráfico de amortecimento para porta	63
Figura 4.7 - Representação gráfica para o método de decaimento	64
Figura 4.8 - Pontos de excitação para o método de potência de entrada	66
Figura 4.9 - Pontos de medição para o subsistema 1 da porta.....	66
Figura 4.10 - Montagem do shaker e do transdutor de força na porta.....	70
Figura 4.11 - Curva de coerência.....	71
Figura 4.12 - Resposta em frequência (mobilidade) parte real	72
Figura 4.13 - Espectro em um terço de oitava da velocidade	73
Figura 4.14 - Espectro da velocidade em função transformada de Fourier	73
Figura 4.15 - Cadeia de medição para os experimentos com a porta	75
Figura 4.16 - Representação da porta em SEA.....	78
Figura 4.17 - Junções dos subsistemas da porta em SEA.....	79

Capítulo V

Figura 5.1 - Potência de entrada média com amortecedor	86
Figura 5.2 – Potência de entrada média sem amortecedor	87
Figura 5.3 – Relação dos subsistemas da porta do modelo Palio.....	97
Figura 5.4 – Energia do subsistema 1 com amortecedor	98
Figura 5.5 - Energia do subsistema 2 com amortecedor.....	98
Figura 5.6 - Energia do subsistema 3 com amortecedor.....	99
Figura 5.7 - Energia do subsistema 4 com amortecedor.....	99
Figura 5.8 - Energia subsistema 5 com amortecedor.....	100
Figura 5.9 - Energia do subsistema 1 sem amortecedor	100
Figura 5.10 - Energia do subsistema 2 sem amortecedor	101
Figura 5.11 - Energia do subsistema 3 sem amortecedor	101
Figura 5.12 - Energia do subsistema 4 sem amortecedor	102
Figura 5.13 - Energia subsistema 5 sem amortecedor	102
Figura 5.14 – Posicionamento da potência de entrada média na porta.....	106
Figura 5.15 – Energia do subsistema 1 com amortecedor	107
Figura 5.16 – Energia do subsistema 2 com amortecedor	107
Figura 5.17– Energia do subsistema 3 com amortecedor	108
Figura 5.18– Energia do subsistema 4 com amortecedor	108

Figura 5.19 – Energia do subsistema 5 com amortecedor	109
Figura 5.20 – Energia do subsistema 1 sem amortecedor.....	109
Figura 5.21 – Energia do subsistema 2 sem amortecedor.....	110
Figura 5.22 – Energia do subsistema 3 sem amortecedor.....	110
Figura 5.23 – Energia do subsistema 4 sem amortecedor.....	111
Figura 5.24 – Energia do subsistema 5 sem amortecedor.....	111
Figura 5.25 – Densidade modal do subsistema 1 sem amortecedor	113
Figura 5.26 – Densidade modal do subsistema 1 sem amortecedor	113
Figura 5.27 – Densidade modal do subsistema 3 sem amortecedor	114
Figura 5.28 – Densidade modal do subsistema 4 sem amortecedor	114
Figura 5.29 – Densidade modal do subsistema 4 sem amortecedor	115
Figura 5.30 – Densidade modal do subsistema 1 com amortecedor.....	115
Figura 5.31 – Densidade modal do subsistema 2 com amortecedor.....	116
Figura 5.32 – Densidade modal do subsistema 3 com amortecedor.....	116
Figura 5.33 – Densidade modal do subsistema 4 com amortecedor.....	117
Figura 5.34 – Densidade modal do subsistema 5 com amortecedor.....	117
Figura 5.35 – Número de modos do subsistema 1 sem amortecedor	118
Figura 5.36 – Número de modos do subsistema 2 sem amortecedor	119
Figura 5.37 – Número de modos do subsistema 3 sem amortecedor	119
Figura 5.38 – Número de modos do subsistema 4 sem amortecedor	120
Figura 5.39 – Número de modos do subsistema 5 sem amortecedor	120
Figura 5.40 – Número de modos do subsistema 1 com amortecedor	121
Figura 5.41 – Número de modos do subsistema 2 com amortecedor	121
Figura 5.42 – Número de modos do subsistema 3 com amortecedor	122
Figura 5.43 – Número de modos do subsistema 4 com amortecedor	122
Figura 5.44 – Número de modos do subsistema 5 com amortecedor	123
Figura 5.45 – Modal overlap factor do subsistema 1 sem amortecedor	124
Figura 5.46 – Modal overlap factor do subsistema 2 sem amortecedor	124
Figura 5.47 – Modal overlap factor do subsistema 3 sem amortecedor	124
Figura 5.48 – Modal overlap factor do subsistema 4 sem amortecedor	125
Figura 5.49 – Modal overlap factor do subsistema 5 sem amortecedor	125
Figura 5.50 – Modal overlap factor do subsistema 1 com amortecedor.....	126
Figura 5.51 – Modal overlap factor do subsistema 2 com amortecedor.....	126

Figura 5.52 – Modal overlap factor do subsistema 3 com amortecedor.....	126
Figura 5.53 – Modal overlap factor do subsistema 4 com amortecedor.....	127
Figura 5.54 – Modal overlap factor do subsistema 5 com amortecedor.....	127
Figura 5.55 – Fator de perda da placa sem amortecedor	128
Figura 5.56 – Fator de perda da placa com amortecedor	128
Figura 5.57 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (1-2)	129
Figura 5.58 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor 1-3).....	129
Figura 5.59 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (1-5)	130
Figura 5.60 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (2-3)	130
Figura 5.61 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (2-4)	131
Figura 5.62 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (3-4)	131
Figura 5.63 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (3-5)	132
Figura 5.64 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (3-5)	132
Figura 5.65 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (1-2).....	133
Figura 5.66 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (1-3).....	133
Figura 5.67 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (1-5).....	134
Figura 5.68 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (2-3).....	134
Figura 5.69 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (2-4).....	135
Figura 5.70 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (3-4).....	135
Figura 5.71 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (3-5).....	136
Figura 5.72 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (4-5).....	136
Figura 5.73 – Comparação entre as velocidades por banda de frequências 1/3 oitava com amortecimento (Linha Cheia : com amortecimento e Linha Aberta: sem amortecimento)...	139
Figura 5.74 – Comparação entre as Potências de entradas por banda de frequências 1/3 oitava sem amortecimento (Linha Cheia : com amortecimento e Linha Aberta: sem amortecimento).....	139
Figura 5.75 – Comparação de energias do subsistema 1 com amortecedor.....	142
Figura 5.76 – Comparação de energias do subsistema 2 com amortecedor.....	142
Figura 5.77 – Comparação de energias do subsistema 3 com Amortecedor.....	143
Figura 5.78 – Comparação de energias do subsistema 4 com amortecedor.....	143
Figura 5.79 – Comparação de energias do subsistema 5 com amortecedor.....	144
Figura 5.80 – Comparação de energias do subsistema 1 sem amortecedor	144
Figura 5.81 – Comparação de energias do subsistema 2 sem amortecedor	145

Figura 5.82 – Comparação de energias do subsistema 3 sem amortecedor	145
Figura 5.83 – Comparação de energias do subsistema 4 sem amortecedor	146
Figura 5.84 – Comparação de energias do subsistema 5 sem amortecedor	146

LISTA DE TABELAS

Capítulo II

Tabela 2.1 - Características físicas do Betume.....	7
Tabela 2.2 - Ensaio de Qualidade	12
Tabela 2.3 - Ensaio de Qualidade	13
Tabela 2.4 - Tabela de classificação IFF.....	15
Tabela 2.5 - Tabela de Temperatura	19
Tabela 2.6 - Escorrimento de insonorizante.....	21
Tabela 2.7 - Classificação das Características dos Amortecedores.....	27
Tabela 2.8 - Especificações do cimento asfáltico de petróleo (penetração)	30
Tabela 2.9 - Especificações do cimento asfáltico de petróleo (viscosidade)	30
Tabela 2.10 - Valores dos Módulos de Elasticidades	32

Capítulo IV

Tabela 4.1 - Frequências inferiores, centrais e superiores da banda de 1/3 de oitava.....	57
Tabela 4.2 - Fatores de perda (η) para a placa plana.....	58
Tabela 4.3 - Fatores de perda (η) para a porta	62
Tabela 4.4 - Subsistemas estruturais porta.....	77
Tabela 4.5 - Valores de amortecimento na estrutura metálica da porta.....	80

Capítulo V

Tabela 5.1 -Frequências inferiores, centrais e superiores das bandas de 1/3 de oitava	83
Tabela 5.2 - Potência de entrada com amortecedor para banda de 1/3 de oitava.....	85
Tabela 5.3 – Potência de entrada sem amortecedor para banda de 1/3 de oitava.....	87
Tabela 5.4 - Valores das velocidades para o subsistema 1 com amortecedor.....	89
Tabela 5.5 - Valores das velocidades para o subsistema 1 sem amortecedor	90
Tabela 5.6 – Peso dos subsistemas e peso total da porta	91
Tabela 5.7 - Cálculo da energia cinética (subsistema 1).....	92
Tabela 5.8 - Cálculo da energia cinética (subsistema 2).....	92

Tabela 5.9 - Cálculo da energia cinética (subsistema 3).....	93
Tabela 5.10 - Cálculo da energia cinética (subsistema 4).....	93
Tabela 5.11 - Cálculo da energia cinética (subsistema 5).....	94
Tabela 5.12 - Cálculo da energia cinética (subsistema 1).....	94
Tabela 5.13 - Cálculo da energia cinética (subsistema 2).....	95
Tabela 5.14 - Cálculo da energia cinética (subsistema 3).....	95
Tabela 5.15 - Cálculo da energia cinética (subsistema 4).....	96
Tabela 5.16 - Cálculo da energia cinética (subsistema 5).....	96
Tabela 5.17 – Tabela do fator de perda para estruturas metálicas.....	112
Tabela 5.18 – Novos valores de área dos subsistemas da porta.....	137
Tabela 5.19 – Valores da simulação para o método numérico.....	140
Tabela 5.20 – Valores da simulação para o método numérico.....	141

NOMENCLATURA

$^{\circ}\text{C}$... graus Celsius
Δf	... largura da faixa de frequência [Hz]
F	... força de atração em [mN/cm^2]
m	... massa do material em [Kg]
r	... raio de rotação em [cm]
s	... superfície de contato [cm^2]
ω	... velocidade de rotação [rad/s]
ρ	... densidade
E	... módulo de elasticidade [Pa]
G	... tensão de cisalhamento [Pa]
ν	... coeficiente de Poisson
σ	...
\mathcal{E}	... dureza do material
$\langle \bar{V}^2 \rangle$... é a velocidade média quadrática espacial ($\langle \rangle$) e temporal ($\langle \rangle$) [m/s]
V	... é o volume
$\langle \bar{p}^2 \rangle$... é a pressão sonora média quadrática espacial ($\langle \rangle$) e temporal ($\langle \rangle$) [m/s]
ρ_0	... é a densidade do fluido
c_0	... é a velocidade do som no meio
E	... é a energia total dos modos do grupo (energia modal)
ω	... representa a frequência central da faixa natural do modo
T_{60}	... tempo de reverberação [s]
ξ	... amortecimento crítico
α	... coeficiente de absorção média
η_{ij}	... fator de perda por acoplamento entre os subsistemas i e j
W_{disp}	... potência dissipada[w]
W_{ent}	... potência entrada[w]

N ... número de modos contidos na faixa de frequência considerada
 n_x e n_y ... são números inteiros;
 K ... é o número de onda;
 C_ℓ ... é a velocidade longitudinal
 E ... módulo de elasticidade
 ρ_m ... densidade do material
 h ... é a espessura da placa
 Y ... mobilidade
 \dot{y} ... é a velocidade de excitação
 F ... é a força de excitação
 f_n ... é a frequência central [Hz]
 E_{vib} ... é a energia vibratória do sistema
 η_i ... denotado como o fator de perda correspondente ao i -ésimo elemento da deformação
 W_i ... representa a energia armazenada na deformação
 W_T ... é a energia total contida no sistema.

RESUMO

A presente dissertação investiga a energia vibratória da porta automotiva de um modelo da FIAT Automóveis, analisando as características vibro-acústicas de seus subsistemas. É aplicada a metodologia de Análise Estatística de Energia (SEA) a uma porta modelo Palio, excitada externamente por um *shaker* com um ruído branco.

São apresentadas algumas particularidades relacionadas aos amortecedores (insonorizantes) que são aplicados no veículo para evitar a ressonância de placas. Citam-se algumas características físico-químicas do material, processos de fabricação e requisitos quanto a sua qualidade e especificações técnicas para os amortecedores.

Do mesmo modo, são descritas as teorias relacionadas à metodologia de SEA, bem como os parâmetros relativos ao fluxo de energia entre dois sistemas, densidade modal e o tratamento viscoelástico.

Foram realizados dois experimentos através do método de decaimento: inicialmente com uma placa plana, para que se pudesse saber o comportamento dos amortecedores de várias espessuras na placa. O outro experimento foi realizado com porta, com o mesmo objetivo. Em seguida foi explicado o método de potência de entrada à porta para se estudar magnitude da força e a mobilidade de pontos dos sistemas.

No que se refere à construção do modelo computacional, foram descritos os critérios para a obtenção de parâmetros para modelagem da porta no software AutoSEA2 e bem como a definição dos subsistemas, em coerência com o modelo.

Para a parte experimental ocorreram medições para o cálculo da potência de entrada na porta com e sem amortecedor (insonorizante). De forma simultânea foram medidas as velocidades em cada subsistema da porta através do equipamento *B&K Pulse*. Em seguida foram determinadas as energias cinéticas de cada subsistema da porta através do software AutoSea2, ocorrendo assim a determinação das energias cinéticas de cada subsistema para o método numérico. A validação do modelo foi feita através da comparação entre os resultados obtidos dos cálculos das energias cinéticas de cada subsistema da porta no método experimental e os resultados obtidos na simulação computacional em SEA.

Diante destes resultados, foram feitos comentários a partir do comportamento de cada subsistema em relação às energias cinéticas liberadas em ambos os métodos, experimentais e numéricos.

ABSTRACT

To present dissertation it investigates the vibratory energy of the door automotive of a model of FIAT Automobiles, analyzing the characteristics vibrate-acoustics of their subsystems. The metodotologia of Statistical Analysis of Energy is applied (SEA) to a door model Palio, excited outwardly for a shaker with a white noise.

Some particularities related to the shock absorbers are presented (insonorizantes) that are applied in the vehicle to avoid the resonance of plates. Some physiochemical characteristics of the material, production processes and requirements are mentioned as for quality and technical specifications for the shock absorbers.

In the same way, the theories related to the methodology of SEA are described, as well as the relative parameters to the flow of energy among two systems, modal density and the treatment viscoelástico.

Two experiments were accomplished through the decline method: initially with a plane plate, so that if he/she could know the behavior of the shock absorbers of several thicknesses in the plate. The other experiment was accomplished with door, with the same objective. Soon afterwards the method of entrance potency was explained to the door to study magnitude of the force and the mobility of points of the systems.

In what refers to the construction of the model computational, the criteria were described for the obtaining of parameters for modeling of the door in the software AutoSEA2 and as well as the definition of the subsystems, in coherence with the model.

For the experimental part they happened measurements for the calculation of the entrance potency in the door with and without shock absorber (insonorizante). In a simultaneous way the speeds were measured in each subsystem of the door through the equipment B&K Pulses. Soon afterwards they were certain the kinetic energies of each subsystem of the door through the software AutoSea2, happening like this the determination of the kinetic energies of each subsystem for the numeric method. The validation of the model was made through the comparison among the obtained results of the calculations of the kinetic energies of each subsystem of the door in the experimental method and the results obtained in the simulation computational in SEA.

Before these results, they were made comments starting from the behavior of each subsystem in relation to the kinetic energies liberated in both methods, experimental and numeric.

GIAROLA, Rodrigo Gustavo. **Estudo da influência de amortecedores nas vibrações de porta de veículos automotores através da análise estatística de energia.** Florianópolis, 2003. 154p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – curso de Pós-Graduação em Ruído e Vibrações, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Roberto Jordan, Dr. Eng.

Defesa: 19 / 12 / 2003

RESUMO:

É realizada a análise das vibrações de uma porta de um veículo automotivo através da técnica de Análise Estatística de Energia (SEA). São analisados inicialmente os fatores de amortecimento de uma chapa plana e de uma porta automotiva, ambas sem e com material de amortecimento auto-adesivo. Tais dados são utilizados na simulação numérica de uma porta automotiva, através de SEA, para ambas as situações, sem e com amortecimento adicional. Os resultados numéricos são confrontados com aqueles obtidos experimentalmente, quando igualmente a porta é excitada externamente por um excitador (“skaker”), usando como sinal o ruído aleatório em faixas de frequências, nas mesmas condições. As conclusões referem-se principalmente à adequação do modelo utilizado em SEA para representar o sistema físico real (a porta, sem e com amortecedor).

Palavras-chaves: Amortecedores; Análise Estatística de Energia, Potência de Entrada, Energias Cinéticas e Subsistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMABILI, M.; PIERANDREI R. *Analysis of vibrating circular plates having non-uniform constraints using the modal properties of free-edge plates: application to bolted plates*. *Jornal of sound and Vibration*. Italy. Dipartimento di Matematica “V Volterra”, Università di Ancona, I-60131 Ancona, Italy. v.206(1), 23-28, 3 January 1996, and in final 8:April 1997 .
- 2 *AutoSEA Theory and Quality Assurance Manual* – Section I. Vibro-Acoustic Sciences, 1999.
- 3 BERANEK, Leo L; VÉR, István L. *Noise and Vibration Control Engineering : Principles and Applications*. New York, USA . Copyright by John Wiley & Sons, 1992.
- 4 BREMMER, P. G. : Vibro-Acoustic Sciences Inc. *Sound transmission loss modeling of real structures using statistical energy analysis*. Proc. Internoise, Yokohama, Japan, 1994.
- 5 COELHO, J. L. Bento. *Políticas Europeias sobre ruído ambiente e o Espaço Ibérico*. Lisboa- Portugal, CAPS - Instituto Superior Técnico – 1096 Lisboa Codex – Portugal. Revista Semestral da Sociedade Brasileira de Acústica - SOBRAC, nº22, pp. 18 – 22, Dezembro, 1998.
- 6 COLLOP, A C; CEBON B. *Parametric Study of factors Affecting Flexible Pavement Performance*. Assosciety, Department of Engineering, Univerity of Cambridge, 1994.
- 7 D. G. JONES. *Handbook of viscoelastic vibration damping*. Copyright by John Wiley & Sons, 2001.

- 8 E. J. YODER; M. W. WITCZAK. *Principles of pavement design*. Copyright by John Wiley & Sons, Second Edition, New York, USA, 1975.
- 9 FERRO, José Roberto. *O Futuro da Engenharia Automotiva Brasileira*. Revista Tecnologia Automotiva, nº13, pp. 4 –5, Janeiro , 1999.
- 10 FIAT AUTO. *Normazione Insonorizzante Fusibile in Fogli*. Capitolato nº 9.55648, pp. 1-15, Itália, Aprile ,1997.
- 11 FRANÇA, Júnia Lessa. *Manual para normalização de Publicações Técnicas Científicas*. 5 ° Edição. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2001.
- 12 GERGES, Samir N. Y. *Ruído Fundamento e Controle*. 2ª Edição. Florianópolis-SC, Editora Consultoria e Treinamento, 2002.
- 13 GERGES, Samir N. Y. *Estado da Arte para Solução dos problemas vibroacústicos por métodos numéricos*. Revista de Acústica e Vibrações, Florianópolis-SC, nº26, pp. 18-33, Dezembro de 2000.
- 14 GERGES, Samir N. Y. *Efeitos do Ruído e de Vibrações no Homem*. Revista de Acústica e Vibrações, Florianópolis-SC, nº27, pp. 18-32, Julho de 2001.
- 15 GERGES, Samir N. Y. ; MELO, Naor Moraes. *Modelagem do Ruído Veicular Interno*. Anais - SOBRAC – Sociedade Brasileira de Acústica e Vibração, IV Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, Agosto 1997.
- 16 KUNG, S. W; SINGH, R.. *Complex eigensolutions of rectangular plates with damping patches*. Journal of Sound and Vibration, Ohio-Colombus, nº216, pp. 1-28, 1998.
- 17 LYON, R.H.; JONG de, R.G. *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*. 2ª edition, Butterworth – Heinemann, 1995.

- 18 LENZI, Arcanjo. *Análise Estatística Energética. Notas de Aula.* Curso de Pós-Graduação. Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.
- 19 MALEN, Donald E; SCOTT, Richard A. *Improving Automobile Door-Closing Sound For Customer Preference.* Janeiro, 1993.
- 20 ONSAY, Taner; AKANDA, Anab; GOETCHIUS, Gregory M. *Perforated Damping Treatment. A Novel Approach to Reduction of Weight.* Society of Automotive Engineers. Vibro- Acoustic Sciences, Inc.
- 21 ONSAY, Taner; NELISSE, H. *Modeling strategies in SEA: Study of a car door.* The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Dearborn, MI, USA, August, 2002.
- 22 ONSAY, Taner. *Statistical Energy Analysis(SEA) : Fundamentals and Automotive Applications.* Vibro Acoustic Sciences, USA, 2000.
- 23 TRICHÊS Glicério, departamento de Eng. Civil da Universidade Federal de Santa Catarina em publicação de uma apostila.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Antes mesmo de se entrar em discussão de que será apresentado no presente trabalho, tem-se que dar uma atenção ao mais sofisticado sensor de som que existe hoje, o ouvido humano. Este sensor, nos últimos anos, tem levado as montadoras a constantes estudos, onde as mesmas buscam um melhor conforto acústico para os veículos tornando-os mais silenciosos e confortáveis. Para o ouvido humano, há uma faixa de frequências em que o mesmo é mais sensível, em torno de 2kHz a 5kHz, sendo menos sensível nas faixas de frequência mais baixas ou altas.

O som que chega aos ouvidos humanos é constituído por variações da pressão atmosférica em condições aceitáveis de bandas de frequências. Já o ruído está diretamente ligado a um tipo de som desagradável e indesejável, que os fabricantes de veículos automotores buscam de todas as formas eliminar durante as fases de projeto e de testes nas fábricas.

Hoje em dia existem órgãos que regulamentam os níveis aceitáveis de ruídos no interior de veículos automotores. Buscando respeitar estes níveis aceitáveis, a engenharia acústica vem realizando sucessivos testes em estradas e/ou em cabines veiculares, na busca constante de se eliminarem prováveis focos de ruídos e de vibração, conseqüentemente garantindo o conforto acústico destes veículos, estabelecido em lei.

Os ruídos que porventura venham a chegar até aos ouvidos dos passageiros dentro dos automóveis (habitáculo) podem ter sido gerados por diversos componentes do motor, pelo sistema de exaustão de gases, pela caixa de engrenagens, pelo sistema de transmissão, pelos pneus, pelo atrito com o ar, pela suspensão e pela ressonância (vibração) das placas de aço do veículo, comprometendo a satisfação dos seus usuários. Sendo assim, a redução deste tipo de ruído vem-se tornando uma máxima entre as montadoras quando se fala em um rodar mais suave e silencioso.

Hoje o mundo globalizado em que se vive está cada vez mais competitivo e os clientes exigem que a produção destes bens seja feita em alto nível de qualidade, confiabilidade e conforto, independentemente do segmento em que o veículo se enquadra, isto é, desde o mais

luxuoso até o veículo popular. Diante deste cenário as montadoras se vêem obrigadas, a cada ano, a acrescentar inovações tecnológicas ou melhorias ligadas, por exemplo, ao *design* do veículo ou a atributos que busquem despertar nos clientes em potencial algo que lhes façam adquirir o produto, de forma a manter e, se possível, ampliar a fatia de mercado da montadora.

Devido a essa globalização e às exigências que a mesma impõem, as montadoras concentram esforços cada vez maiores em pesquisas e desenvolvimentos. Há um movimento crescente neste setor, denominado como *joint venture*, isto é, uma união entre empresas de um mesmo setor para que elas juntas possam negociar matérias-primas, desenvolver fornecedores para as montadoras e acima de tudo, criar uma empresa mais competitiva no setor. Como exemplo há uma *joint venture* entre o setor de compras da FIAT Automóveis e o setor de compras da General Motors, que originou assim uma nova empresa de compras no setor automobilístico.

Atualmente, para que se saiba se um veículo está em conformidade com as leis que regem o nível de ruído interno, que deve estar abaixo de 75 dB para os veículos comerciais e de 69 dB para os veículos de passeio, há a necessidade de se conhecer a aparelhagem a ser utilizada e se instrumentar muito bem o veículo, com o propósito de conhecer as características acústicas no interior do mesmo sem que os passageiros sintam-se incomodados no interior do veículo. Para que isto aconteça de uma forma bastante eficaz e com um baixo custo de desenvolvimento para um novo veículo a ser lançado e inclusive com um tempo reduzido de testes práticos, os setores de Engenharia das montadoras se vêem na obrigação de buscar inovações tecnológicas para desenvolvimento do veículo, e se atualizarem em relação aos novos conceitos da indústria automobilística mundial.

Como o objetivo de tornar viável esta meta é necessário que se tenham à mão computadores que façam simulações de forma mais rápida e confiável, bem como reduzam o tempo de desenvolvimento do veículo, objetivado um ganho significativo de qualidade sem aumentar os custos de desenvolvimento. Todas as montadoras mundiais, hoje em dia, possuem laboratórios ultramodernos em suas matrizes e ou em suas filiais, onde o uso de softwares de simulação é largamente empregado quando da concepção de um novo veículo.

Como não poderia deixar de ser, a FIAT Automóveis também investe na aquisição destes computadores com simuladores computacionais, buscando permanecer em um mercado altamente competitivo que é o mercado automobilístico. Diante deste cenário, a presente dissertação busca, através da construção de um modelo computacional em SEA (Análise Estatística de Energia), fazer a comparação entre as energias cinéticas de cada subsistema da porta para o modelo computacional (numérico) com a porta propriamente dita através do

método de potência de entrada, na qual se obteve os valores das energias cinéticas para cada subsistema de modo experimental.

A metodologia SEA (Análise Estatística de Energia) foi escolhida devido à sua representação estatística de vários subsistemas, tendo como resultado o comportamento vibro-acústico médio trabalhando sempre em altas frequências. Outra condição favorável para sua escolha é que o mesmo trabalha em uma faixa de frequências muito utilizada em aplicações de engenharia que é de 100 Hz a 10000 Hz. E também se encaixa para a principal condição que é apresentada nesta dissertação, na qual compreende a energia como a principal variável de interesse é obtida pela excitação de placas e integradas em bandas constantes de frequências, tais como as bandas de um terço de oitava.

Para a presente dissertação, serão apresentados a seguir os conteúdos dos capítulos.

No capítulo dois, apresenta-se o que é um insonorizante (amortecedor) e sua principal função. Citam-se também as características físico-química como constituição, composição e materiais de adição e também o modo de como estes materiais são fabricados e suas características / classificações técnicas para atender o processo produtivo.

No capítulo três é apresentado um breve histórico de como surgiu metodologia SEA (Análise Estatística de Energia). Apresentam-se também a teoria fundamental de SEA, compreendendo as equações de energia, fluxo de energia entre dois subsistemas, equação do balanço de energia e os métodos de decaimento e potência de entrada.

No capítulo quatro, trata-se da modelagem experimental, descrevendo em detalhes o procedimento de execução do método de decaimento com os valores obtidos através deste método. Em seguida, é descrito o método de potência de entrada e são mostrados os pontos de excitação, os pontos de medição do subsistema e a obtenção dos gráficos para o método de potência de entrada. E por último passa-se para a construção do modelo propriamente dito, via AutoSea, mostrando particularidades durante a etapa de construção do modelo.

O capítulo cinco é dedicado à análise de resultados da potência média de entrada com a adição de amortecedor (insonorizante) e sem amortecedor (insonorizante), pelo método experimental. Em seguida, são calculadas as energias cinéticas de cada subsistema, sendo apresentados simultaneamente seus gráficos com e sem a adição de amortecedor

(insonorizante). Depois já no software AutoSea2, faz-se a configuração do modelo para que se possa validar o mesmo, fazendo a comparação entre as energias cinéticas do método experimental com o método numérico, através da apresentação de gráficos. Finalmente, é dada a conclusão pela análise dos gráficos dos métodos experimental e numérico.

No capítulo seis, serão exibidas as principais conclusões obtidas durante todo o trabalho, bem como serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

AMORTECEDORES (INSONORIZANTES)

2.1 – Introdução

Os amortecedores (insonorizantes) são utilizados no tratamento acústico veicular buscando minimizar o nível de ruído interno gerado no habitáculo, tanto por ressonância nas placas das portas, ressonância das placas do assoalho do veículo e atenuar as batidas de pedra nas caixas de rodas dos veículos posicionando assim na parte interna, isto é, dentro do habitáculo amortecedores (insonorizantes) que impeçam a propagação do ruído. Para cada tipo de problema há uma tratativa diferenciada de se atenuar o nível de ruído interno no habitáculo, como por exemplo, no caso de ressonância nas portas, onde há um tratamento acústico específico que se consiste em aplicar amortecedores (insonorizantes) de vários tamanhos e espessuras.

Para que se possa entender um pouco mais sobre o tratamento acústico veicular leva-se em conta os locais onde são gerados os maiores níveis de ruído e vibração, detectados por testes laboratoriais, computacionais e testes práticos, ocasionados por um agente externo ao habitáculo, como o motor. O estudo da aplicação dos amortecedores acústicos (insonorizantes) na carroceria se dá através da colocação dos mesmos em pontos pré-estabelecidos para que evitem as ressonâncias nas placas. A Fig. 2.1 mostra uma localização estabelecida, a projeto, onde há a necessidade de colocar um amortecedor acústico, buscando reduzir as ressonâncias na placa e diminuir o ruído interno no veículo.



Figura 2.1 – Amortecedor acústico localizado na porta do veículo (exemplo)

2.2 – Características Físico-Químicas

Os amortecedores acústicos (insonorizantes) são mantas asfálticas constituídos de betume (asfalto propriamente dito, que se constitui como a matéria prima principal dos insonorizantes), carga mineral, fibras de celulose e aditivos, que têm como principal função de enchimento do material, formando uma massa.

O betume (*bitumen*) é a designação geral de vários hidrocarbonetos sólidos ou semi-sólidos, tomada muitas vezes como sinônimo de asfalto ou mesmo dos próprios hidrocarbonetos. O termo indica, em geral, misturas de hidrocarbonetos gasosos, líquidos, viscosos ou sólidos, inflamáveis, e solúveis no sulfureto de carbono. Os betumes formam-se a partir dos petróleos líquidos, por oxidação parcial e evaporação da facção mais leve; a betumunização pode dar-se por contacto com a atmosfera ou, no interior da terra, por ações metamórficas. Consideram-se dois tipos principais de betumes:

- os betumes propriamente ditos (parafinas naturais, asfaltos);
- os pirobetumes (asfálticos ou não, incluindo nestes últimos os carvões), que ardem mais facilmente.

Pelas suas aplicações, o asfalto é o mais conhecido. O Asfalto Betume de Judéia é a designação vulgar do asfalto natural.

Para o manuseio deste produto há alguns riscos relevantes que devem ser levados em conta, tais como:

- o betume é inflamável, com aspecto semi-sólido e de cor escura, tendo ponto de fulgor maior que 235°C. Sua combustão (incêndios) é de difícil controle. Na combustão incompleta emite óxidos de carbono, enxofre e nitrogênio, hidrocarbonetos, particulares e fumaça;
- pode causar queimaduras devido à temperatura do produto, ressecamento da pele e, quando aquecido, pode causar irritação do trato respiratório e dos olhos;
- em relação ao meio ambiente, o produto (betume) não é solúvel em água e seus vapores são mais densos que o ar. Mas o produto, quando misturado com a água acidentalmente, transmite à água uma qualidade indesejável e são prejudiciais à flora e fauna e bem como afetando o uso do mesmo na indústria automobilística.

Pela identificação técnica (Betume Pronto para Regularização) é uma massa de regularização, fabricada com resinas acrílicas em dispersão aquosa, contendo cargas criteriosamente estudadas, de modo a proporcionarem uma excelente capacidade de enchimento.

As características físicas do Betume são apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características físicas do Betume¹

Cor	Escura (preta)
Densidade (25 °C)	1,60 a 1,65
Teor em sólidos (em volume)	52 a 54 %
Ponto de inflamação	Nulo
Tempos de secagem	Superficial: 2 a 3 horas.

A carga mineral (fibras de celulose e aditivos) é um conglomerado de compostos químicos que são adicionados para formar a massa com características particulares para atender a uma especificação da indústria automobilística.

As matérias-primas para o processo de fabricação e controle do amortecedor (insonorizante) e suas funções estão descritas a seguir:

- asfalto, que é a matéria-prima principal do amortecedor (insonorizante);
- pirofilita e arbolcel, que são absorvedores do asfalto, possuem carga, fibra de celulose e têm como função principal o enchimento do material formando uma massa compacta;
- óxido de cálcio, que reage com a água, formando calcita, cuja função principal é a de secar a água contida naquela massa;
- ferrita, usada principalmente para a fabricação do amortecedor (insonorizante) magnético, pois com a adição da ferrita e a passagem da massa asfáltica por uma máquina magnetizadora (máquina esta que contém várias linhas de capacitores na parte inferior com o propósito de formar um campo magnético na peça) o amortecedor fica magnetizado e assim pode ser empregado em partes verticais e no teto das carrocerias. Uma característica nociva deste material é que, com a adição exagerada de ferrita na massa, aumenta-se o campo magnético, mas a peça fica mais pesada e apresenta tendência ao escorrimento;
- cera anti-blocante, composta de óleo de carnaúba, água e estearato de zinco.

2.3 – Processo de Fabricação

O processo de industrialização se dá com a pesagem dos materiais ou a medição em um reator, sendo que os mesmos são levados a uma temperatura de aproximadamente 200°C para fusão e homogeneização, durante 60 minutos. Posteriormente descarrega-se a massa

¹ Características do Betume condições normais de temperatura e umidade relativa. Fonte site galpenergia.com.

fundida sobre uma esteira rolante para pré-formar a manta asfáltica em uma pré-calandra, onde se forma a manta asfáltica contínua de dimensão de 20 mm de espessura e com aproximadamente de um a dois metros de largura. Inicia-se o resfriamento da manta asfáltica para uma temperatura entre 50 a 60°C, sendo que a mesma irá passar por outra calandra com características especiais para este tipo de material, na qual será obtida uma espessura especificada a desenho pela montadora, que varia no processo de calandragem de 1 a 5 mm.

Após esta calandragem o produto passa por um cilindro gofrado² onde se faz a deposição de um filme de polietileno de ambos os lados desta manta asfáltica magnética. Este filme tem a característica e de melhorar a aderência na superfície da carroceria e lhe confere uma particularidade de ser anti-blocante. Isto significa que, quando o material vai para a linha de produção, ele é armazenado em pilhas uns sobre os outros, e em cada lado da peça há um tipo de filme com propriedades distintas (ver Fig. 2.2). De um lado da peça onde não há o contato com a carroceria o filme é de alta densidade, pois este ajuda para que as peças não se compactem; do outro lado da peça é de baixa densidade porque é o lado que é depositado na carroceria e tem propriedades de se fundir em baixa temperatura e com maior facilidade, durante a passagem no forno.



Figura 2.2 - Peças empilhadas ao lado da linha de produção.

Os materiais que não são magnéticos sofrem também a mesma tratativa do material magnético, que é a passagem pelo cilindro gofrado², onde se faz deposição de um filme de

² Segundo o fornecedor de insonorizante TORO um cilindro gofrado é o mesmo que texturizado, gravado, ranhurado, ou seja qualquer superfície que não seja lisa e possua uma textura em seu cilindro.

polietileno na superfície que não terá o contato com a carroceria. E em seguida, recebe do lado que terá o contato com a carroceria uma fina camada de produto anti-blocante, aplicado sobre o filme de baixa densidade, que tem o aspecto e característica de uma cera, que é composta de óleo de carnaúba, água, estearato de zinco. A mesma é fundida a 50°C junto à manta asfáltica a fim de se formar uma película deslizante, para que as peças sejam sobrepostas umas às outras e não bloquem (colem) entre si. Uma observação primordial para este material é que, em hipótese alguma, deverá ser armazenado úmido, pois poderá também causar problemas de blocagem.

Em seguida, há o resfriamento induzido com ar fresco sobre as placas asfálticas já calandradas, com as espessuras já especificadas pelas montadoras, para que seja feito o armazenamento do produto em placas de um ou dois metros de largura.

De acordo com a produção da montadora é feito o pedido em JUST IN TIME para o fornecedor com aproximadamente 8 horas de antecedência para a utilização daquela peça na linha de produção em relação ao modelo pedido e em conformidade com os desenhos e quantidade de peças que são colocadas por modelo durante um dia de produção. Sendo assim, as placas asfálticas que estavam armazenadas em pilhas no fornecedor são encaminhadas para o processo de corte em pequenas prensas, onde são colocados os ferramentais com desenho pedido para obtenção do produto final de acordo com as normas de qualidade especificadas pela montadora.

Este material foi escolhido como matéria prima principal por se tratar de um composto químico largamente empregado na indústria automobilística, para atenuar ressonâncias das placas, e por ter propriedades químicas importantes no seu emprego. Para exemplificar melhor, o material possui propriedades químicas que viabilizam seu emprego como possuir boa aderência à superfície das placas, não ter escorrimento de material após passagem no forno e boa moldabilidade durante a passagem no forno em relação às formas geométricas e curvaturas de placas encontradas hoje nas carrocerias.

O material não magnético, precisa atender aos requisitos descritos³ a seguir:

- Peso total: 1750 a 8750 [g/m²];
- Espessura: 1,0 a 5,0 [mm];
- Densidade: 1,750 [g/cm³];
- Resistência à tração: corpos de prova de acordo com ASTM D3574⁴, velocidade 50 [mm/minuto] à 23°C ± (2°C) e 65% ±(5%) de U.R.A.(Umidade Relativa do Ar):

³ Informações dos requisitos técnicos dos insonorizante (amortecedores) cedidas pelo fornecedor TORO.

Direções longitudinal e transversal: 1,8 a 3,5 [kgf/cm²];

- Flexibilidade: material apresentará características de boa flexibilidade;
- Moldabilidade: após fusão o material apresentará excelente moldagem em todas as curvaturas da placa;
- Resistência à alta temperatura: o material resiste a 195°C ± 5°C sem deformações;
- Aderência: após fusão a peça apresentará boa aderência e sua remoção será feita somente mediante destruição da mesma;
- Escorrimento: o material quando submetido ao calor (195°C +/- 5°C) em placa dobrada formando um ângulo de 55°, não escorre e nem desliza;
- Resistência às influências ambientais: corpos de prova fundidos em placa sem tratamento (nua) o material não apresenta decomposição, perda de flexibilidade, perda de aderência e/ou afetar a superfície de aplicação quando submetido a:
 - exposição à umidade 38°C ± (2°C) e 98% ± (2%) de U.R.A. (Umidade Relativa do Ar);
 - Exposição em câmara de névoa salina;
 - Exposição em estufa com ar circulante a 70°C ± (2°C);
 - Flamabilidade conforme MVSS 302⁵: máximo 100 mm/minuto;
- Armazenamento: nos casos de armazenamento de peças, as mesmas devem permanecer em temperaturas inferiores à 35°C, por um período máximo de 90 dias, para as peças não magnéticas.

Assim como também possui uma característica primordial que é de poder adicionar uma porcentagem de ferrita de bário magnetizável em seu composto que lhe dá um poder magnético e aumenta sua aplicação nas carrocerias em partes críticas, como por exemplo, as partes verticais de um painel de porta, possibilitando o tratamento acústico em painéis. O contato das peças com as placas por ação magnética deve ser suficiente para mantê-las em seus locais de aplicação sem que essas sofram deslocamento e ou escorrimento.

O material magnético precisa atender os requisitos descritos⁶ a seguir:

- Peso total: 2600 a 13000 [g/m²];
- Espessura: 1,0 a 5,0 [mm];
- Densidade: 2,600 [g/cm³];

⁴ Norma técnica ASTM D3574 trata-se de uma norma que determina testes e métodos para análises de produtos com células abertas e flexíveis, isto é, como por exemplo, a espuma poliuretano, a qual é usada na fabricação dos bancos dos automóveis.

⁵ Norma técnica MVSS 302 é uma norma americana que regulamenta as condições de segurança dos veículos. Especifica as exigências quanto à combustão dos materiais utilizados no habitáculo dos veículos. Tem como finalidade a redução do número de incêndios nos veículo, dando uma maior segurança para os passageiros.

⁶ Informações dos requisitos técnicos dos insonorizante (amortecedores) cedidas pelo fornecedor TORO.

- Resistência à tração: corpos de prova de acordo com ASTM D3574⁴, velocidade 50 [mm/minuto] à $23^{\circ}\text{C} \pm (2^{\circ}\text{C})$ e $65\% \pm (5\%)$ de U.R.A. (Umidade Relativa do Ar):

Direções longitudinal e transversal: mínimo 14 [Kgf/cm²];

- Flexibilidade: material apresentará características de boa flexibilidade;

- Intensidade magnética: mínimo 160 [Gauss];

- Aderência: após fusão a peça apresentará boa aderência e sua remoção será feita somente mediante destruição da mesma;

- Resistência à temperatura: o material resiste a $195^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sem deformações;

- Resistência a influências ambientais: corpos de prova fundidos placa sem tratamento (nua) o material não apresenta decomposição, perda de flexibilidade, perda de aderência e/ou afetar a superfície de aplicação quando submetido a:

- Exposição à umidade $38^{\circ}\text{C} \pm (2^{\circ}\text{C})$ e $98\% \pm (2\%)$ de U.R.A. (Umidade Relativa do Ar);

- Exposição em câmara de névoa salina;

- Exposição em estufa com ar circulante à $70^{\circ}\text{C} \pm (2^{\circ}\text{C})$;

- Flamabilidade conforme MVSS 302⁵: máximo 100 mm/minuto;

- Armazenamento: nos casos de armazenamento de peças, as mesmas devem permanecer em temperaturas inferiores à 35°C , por um período máximo de 45 dias.

2.4 – Necessidade de ensaios para aprimoramento dos Amortecedores

Outro ponto de importância e relevância neste material é que, com seus componentes já misturados formando a massa asfáltica, com as peças já cortadas em formatos especificados e prontas para aplicação nas carrocerias, não oferece perigo à saúde humana, pois se trata de um produto reciclável e com um odor característico do asfalto bastando para o seu manuseio o uso de luvas de poliéster e os Equipamentos de Proteção Individual.

Apesar dos amortecedores utilizados hoje no processo automobilístico serem em geral materiais de baixo custo produtivo, eles possuem, por sua vez, alta complexidade de produção.

Isso significa que, em condições reais na linha de produção, as características verificadas em testes feitos em laboratórios podem se modificar devido ao processo produtivo em série.

Com base nesta complexidade os fornecedores estão executando testes mais específicos por amostragem em seu processo produtivo, com o objetivo de simular, com maior fidelidade, em laboratório as condições reais de um processo produtivo automobilístico. Estes

ensaios consistem em coletar amostras na linha de produção dos amortecedores (insonorizantes) de um determinado desenho, sendo que o mesmo poderá ser magnético ou não. No ensaio para amortecedores não magnéticos os fornecedores se baseiam nas seguintes características:

Tabela 2.2 - Ensaio de qualidade

<i>Características</i>	<i>Especificado</i>
1-Espessura [mm]	2,0 ou 3,0 \pm 0,2 [mm]
2-Moldabilidade	Deve moldar completamente nas curvas da placa
3-Aderência	Remoção mediante destruição
4-Bolhas	Não pode apresentar
5-Escorrimento	Não deve ocorrer escorrimento

Na tabela 2.2 acima podemos especificar:

- * Item 1-espessura medida com paquímetro;
- * Item 2-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 140°C;
- * Item 3-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 140°C e resfriado à temperatura ambiente durante 30 minutos;
- * Item 4-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 140°C e resfriado à temperatura ambiente durante 30 minutos;
- * Item 5-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 180°C.

A Fig. 2.3 ilustra o ensaio de escorrimento de amortecedores não-magnéticos.



Figura 2.3 - Ensaio dos amortecedores não-magnéticos (escorrimento de 2mm)

Para o ensaio de amortecedores magnéticos os fornecedores se baseiam nas seguintes características:

Tabela 2.3 – Ensaio de qualidade

<i>Características</i>	<i>Especificado</i>
1-Espessura [mm]	1,7 ou 2,0 \pm 0,2 [mm]
2- Aderência	Remoção mediante destruição
3- Bolhas	Não pode apresentar
4-Aderência magnética vertical	Não deve se desprender da placa e não ocorrer escorrimento
5-Aderência magnética horizontal invertida	Não deve se desprender da placa

Na tabela 2.3 acima podemos especificar:

* Item 1-espessura medida com paquímetro;

* Item 2-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 190°C;

* Item 3-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 190°C;

* Item 4-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 140°C e resfriado à temperatura ambiente durante 30 minutos;

* Item 5-material aplicado sobre placa metálica e fundido em estufa com ar circulante, 20 minutos a 180°C.

Na Fig.2.4 se pode observar o resultado do teste de aderência, mediante a remoção, do amortecedor (insonorizante) magnético.

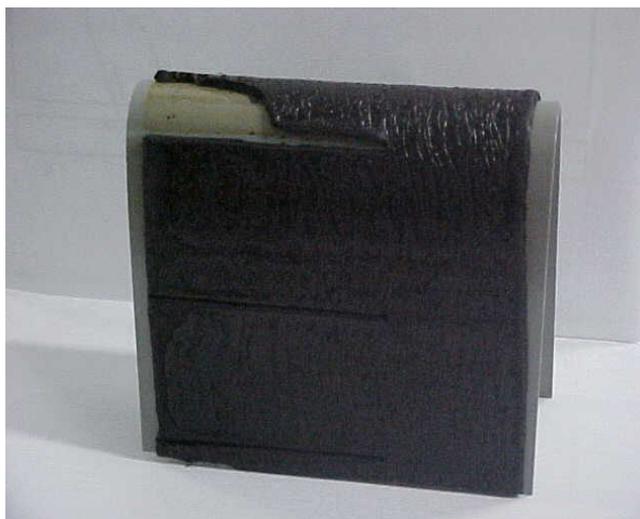


Figura 2.4 - Ensaio dos amortecedores magnéticos (aderência mediante remoção - destrutivo)

2.5 – Especificação técnica do produto

Após feitos os ensaios, seus resultados são analisados segundo norma técnica da FIAT Automóveis⁷, onde se tem a designação pela indicação a desenho do amortecedor (insonorizante fusível ao forno – IFF) que será aplicado na carroceria, em partes específicas, para atenuar as ressonâncias das placas.

É importante ressaltar que os resultados dos ensaios devem estar em consonância com a tabela, caso contrário, deverão ser “descartados” do processo produtivo.

Na tabela 2.4 apresenta-se a classificação dos amortecedores (insonorizante) com suas características, aplicação e tipo.

⁷ Norma técnica da FIAT Automóveis – Insonorizantes Fusíveis ao Forno (IFF), Capitolo 9.55648 de Abril de 1997.

Tabela 2.4 – Tabela de classificação IFF

CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO DOS AMORTECEDORES			
<u>Classe</u>	<u>Característica Específica</u>	<u>Aplicação</u>	<u>Tipo</u> ¹
Normal (N)	-	Superfície irregular levemente ondulada da carroceria e disposta horizontalmente com ligeira inclinação (ex.: fundo da carroceria) ou outro destino porém a permanência naquela posição durante a fase de adesão sobre a placa no processo produtivo.	N/120
			N/140
			N/160
			N/200 ²
Normal Leve (LN)	-		L/N/120
			L/N/160
Normal Ultra Leve (LL/N)	-		LL/N/120
			LL/N/160
Normal de Alta Eficácia (AE/N)	-		AE/N/120
			AE/N/160
Normal Reforçado (NR)	Contém um reforço (de alumínio, papel, um trançado de fibra natural ou artificial ou outro material) que evita o escorrimto durante a cura no forno e aumenta sua rigidez. ³	Superfície irregular que impõem ao material posição diversas desde a horizontal a vertical (ex.: túnel central do câmbio)	NR/120
			NR/140
			N/160
Magnético leve (ML)	Contém ferrita em pó que proporciona uma alta aderência na placa durante a cura no forno em qualquer posição.	Superfície da carroceria disposta verticalmente com forte inclinação (ex.: parede lateral do túnel central do câmbio, interno porta); posição inversa (sob placa; ex.: teto) ou outra destinação para permanecer em tal posição, por exigência do ciclo produtivo.	ML/120
Magnético (M)			ML/140
			ML/160
			ML/180
Magnético de Alta Eficiência (MAE)			M/120
			M/140
			M/140
			M/180
			M/AE/120
Magnético Auto-Adesivo (passagem ao forno) (M/AA/F)			M/AE/160
	M/AA/F/120		
	M/AA/F/140		
			M/AA/F/160
			M/AA/F/180
Magnético reforçado (MR)	Como a classe M, mas com uma superfície contendo um reforço (papelão, trançado de fibra natural ou artificial, alumínio ou outro material) que aumenta por exemplo a rigidez ou resistência a batida de pedra ³	Superfície plana da carroceria disposta verticalmente com forte inclinação, supondo que seja solicitado uma particular condição de enrijecimento e isolamento do tratamento acústico.	MR/120
			MR/140
			MR/160
			MR/180

Tabela 2.4 – Tabela de classificação IFF (continuação)

CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO DOS AMORTECEDORES			
<u>Classe</u>	<u>Característica Específica</u>	<u>Aplicação</u>	<u>Tipo</u> [1]
Auto - Adesivo (AA)	Uma superfície pode ser reforçada com um cartolina, sobre outra superfície e existe uma camada adesiva protegido por liner anti-aderente a ser retirado antes da aplicação.	Superfície plana levemente irregular da carroceria, horizontal que vertical com forte inclinação/posição horizontal inversa. O material deve ser aplicado ao término do ciclo produtivo de pintura porque não deve passar no forno do ciclo produtivo de pintura	AA
Auto - Adesivo leve (L/AA)			L/AA
Auto - Adesivo Ultra leve (LL/AA)			LL/AA
Auto - Adesivo Específico de Passagem ao Forno (AA/F)		Superfície plana levemente irregular da carroceria, disposta também verticalmente com forte inclinação, com posição horizontal inversa.	AA/F/120
			AA/F/160

A referência [1] da tabela de classificação dos amortecedores basea-se na escolha do tipo em função da temperatura de aquecimento e é ligada à temperatura máxima dos materiais no ciclo de pintura da carroceria durante o qual, via de regra, acontece na fase de aquecimento e adesão do material. Nos casos de componentes simples, em tese, os insonorizantes devem resistir à mesma temperatura quando do seu funcionamento. Isto significa que, por exemplo, o insonorizante do vão do motor deve suportar uma temperatura máxima igual a da adesão no forno quando o motor está em funcionamento.

A temperatura de aquecimento é indicada pelo número que aparece na sigla do Tipo da tabela 2.4.

A seguir (ver Fig. 2.5) será apresentado um gráfico com o comportamento dos amortecedores (insonorizantes) durante a passagem no forno de secagem.

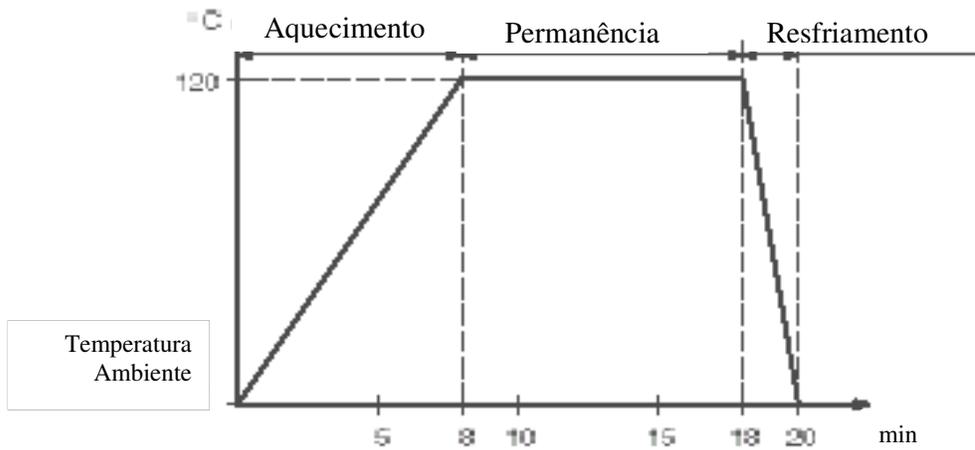


Figura 2.5 - Tempo x Temperatura

A referência [2] da tabela de classificação dos amortecedores tem como base o emprego deste material devendo ser limitado aos casos em que, por exigência do ciclo produtivo, a aplicação dos mesmos deve ser efetuada previamente ao ciclo de pintura. Portanto, a adesão deverá ser efetuada em um forno auxiliar, a uma temperatura máxima superior à que foi especificada para o ciclo de pintura, de modo a evitar que haja o descolamento dos amortecedores (insonorizante) durante os sucessivos aquecimentos, inclusive nos ciclos posteriores.

A Fig. 2.6 nos mostra a curva de relativa ao tempo de permanência no forno auxiliar em função da temperatura.

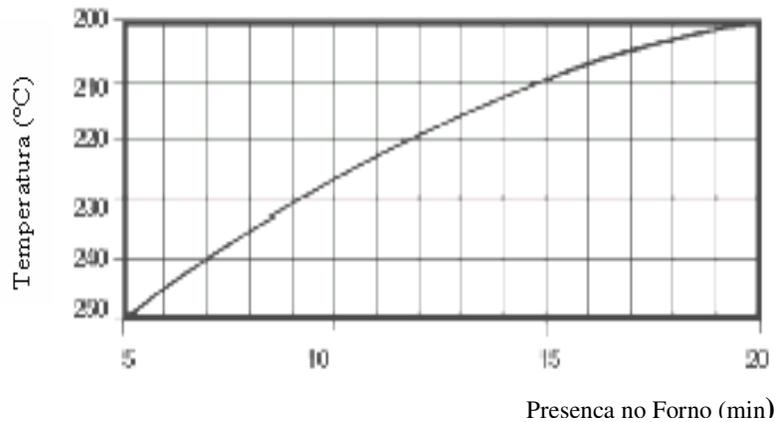


Figura 2.6 - Presença no forno x Temperatura

A referência [3] da tabela de classificação dos amortecedores refere-se a uma particularidade em relação ao emprego de uma rigidez particular, deve ser explícita no desenho e há a necessidade da existência um indicativo de qual o tipo de reforço deverá compor o amortecedor (insonorizante).

2.5.1 - Prescrição para a Qualificação do Produto

Submeter o material em exame à prova e aos controles de especificações descritos a seguir, verificando a resposta do resultado das provas com valores / limites prescritos a projeto e/ou na sua “ficha técnica do produto”, relativo ao tipo específico.

O ambiente de prova deve ter as seguintes características, (salvo diversamente prescrito em outras condições):

- temperatura: $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- pressão atmosférica: 860 a 1060 mm/Hg;
- umidade relativa do ar: 45 a 70%.

2.5.2 - Características gerais do material

As dimensões e tolerâncias deverão constar no desenho de especificação técnica do material.

A espessura deve ser medida em pelo menos cinco pontos do seu relevo, mediante o uso de um instrumento apropriado para esta medição. O valor a ser considerado será dado pela média aritmética dos cinco pontos. Salvo diversa prescrição a desenho, sua espessura admite uma tolerância de 10%. Sua dimensão é indicada a desenho, salvo diversa prescrição do mesmo e admite uma tolerância de +2%.

O exame visual do material deve revelar a ausência de bolhas, destaques, sem dobraduras. Durante sua fusão não deverá se destacar do suporte. Os materiais com linhas adesivas devem ser bem aderentes à superfície da placa plana.

2.5.3 - Testes de laboratório com os insonorizantes (amortecedores)

Segundo a norma técnica da FIAT Automóveis S/A⁷ há a necessidade de se executar alguns testes de laboratórios nos insonorizantes (amortecedores) para que se comprovem as características que são definidas para cada tipo de material, levando-se em conta propriedades

como temperatura de aquecimento, escorrimento, magnetismo e aderência. Com base na norma técnica da FIAT Automóveis S/A, para cada classe de insonorizantes (amortecedores) há testes específicos, dentre os quais serão descritos os principais.

Os testes utilizam uma placa de aço de dimensão 200 x 100 x 0,8 mm (salvo diversamente prescrito), com a superfície destinada a receber o insonorizante (amortecedor) preparada (em função das condições reais de aplicação prevista no ciclo produtivo) segundo seguinte prescrito (ver Tab. 2.6).

Tabela 2.5 - Tabela de temperatura

Temperatura de aquecimento do insonorizante (°C)	Preparação da superfície da placa
-	<u>Tipos auto-adesivos:</u> Fosfatização+eletroposição da pintura catódica de produção+fundo de primer de produção+esmalte do tipo de produção
120 a 160	Fosfatização+eletroposição da pintura catódica de produção
160 a 200	Placa

A adesão deve acontecer mediante a permanência em um ambiente fechado (estufa) em posição horizontal, por trinta minutos, à temperatura especificada de aquecimento ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) por tipo de material em teste.

Para exemplificar como são feitos os teste em laboratórios, apresentam-se a seguir os principais testes executados em laboratórios pela FIAT Automóveis S/A.

2.5.3.1 - Adesão à placa na temperatura ambiente:

(Classes AA; L/AA; LL/AA)

Coloca-se o material na placa e efetua-se, mediante a passagem de um rolo de massa 5 kg, a adesão (sem haver efetuado a adesão mediante permanência na estufa). Este rolo (ver Fig. 2.7) deve agir com o próprio peso, sem se exercer qualquer pressão sobre a empunhadura do rolo, o qual deve ser passado por cinco voltas completas.

Considera-se depois da adesão o corpo de prova em descanso a temperatura ambiente por 4 horas sem permanência na estufa.

Validar a adesão através do exame de eventuais fissuras no material e da cobertura do suporte.

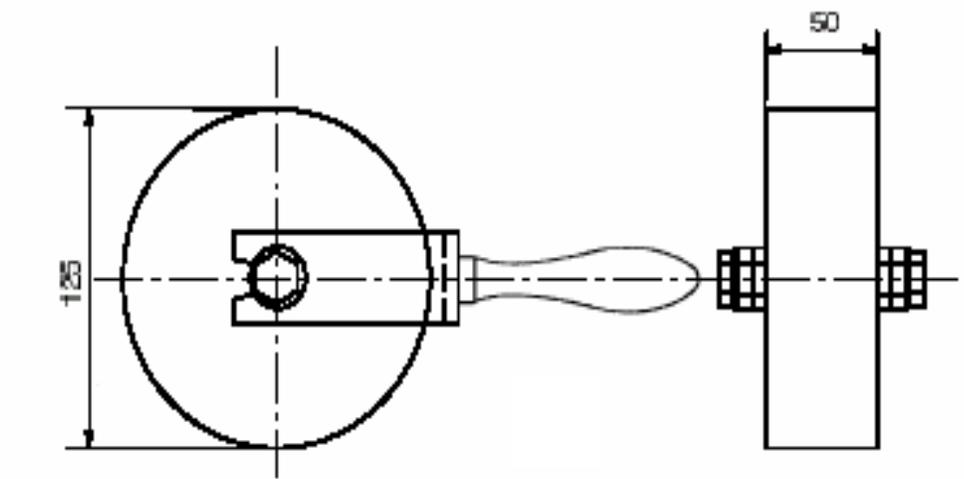


Figura 2.7 - Rolo

2.5.3.2 - Escorrimento de superfícies verticais:

(Classes N; AE/N; L/N; LL/N)

Deve ser preparado o suporte de placa de aço de modo a obter uma superfície de apoio com um ângulo de 10° com o plano horizontal (ver Fig. 2.8), seguindo as condições de teste dos materiais e respeitando o procedimento conforme descrito acima.

Depois que ocorrer adesão do material com a permanência na estufa, amostra com $150 \times 100 \text{ mm}^2$, e o sucessivo resfriamento a temperatura ambiente por duas horas.

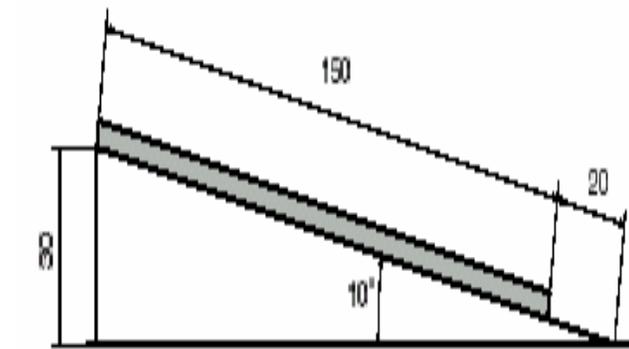


Figura 2.8 – Suporte Inclinado

2.5.3.3 - Escorrimento de superfícies verticais:

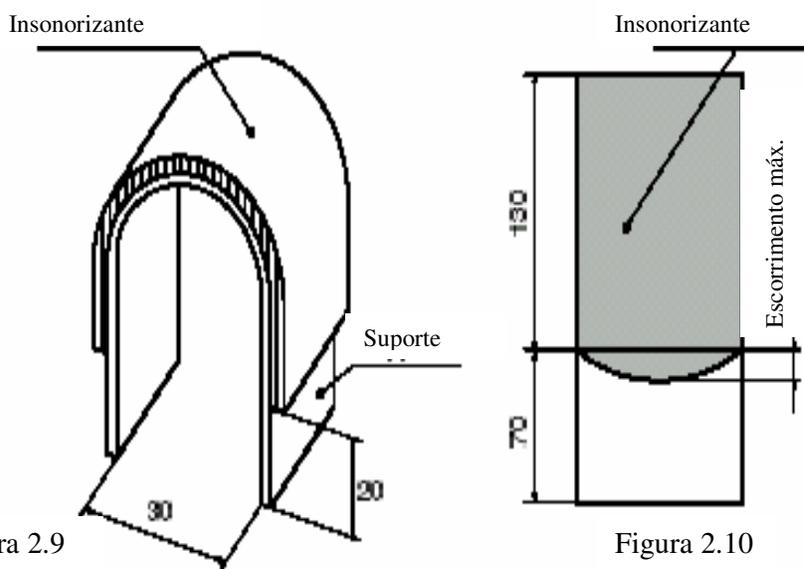
(Classes AA; L/AA; LL/AA)

Deve ser preparado o suporte de placa de aço predisposta de modo a se obter uma superfície curva de apoio, com um ângulo de 180° , com um diâmetro de 30 mm (ver Fig. 2.9), seguindo as condições de teste dos materiais e respeitando o procedimento conforme descrito acima. Antes de efetuar a adesão do material na estufa o suporte deve estar recoberto com insonorizante (amortecedor) conforme a Fig. 2.10. Efetuar a adesão do material no suporte conforme descrito no procedimento 2.5.3.1 (rolo). Em seguida, colocar o corpo de prova na estufa na posição vertical a temperatura de $90 \pm 2^\circ\text{C}$ por 30 minutos e resfriar a temperatura ambiente por 2 horas.

O escorrimento máximo permitido está apresentado na tabela 2.7 .

Tabela 2.6 - Escorrimento de insonorizante

Espessura do insonorizante (mm)	Escorrimento máximo (mm)
até 1,5	1
1,6 a 2	2
2,1 a 2,5	4
2,5 a 4	6



Figuras 2.9 e 2.10 – Suporte curvo

2.5.3.4 - Eficiência do poder magnético:

(Classes M/L; M; M/AE; M/AA/F; MR)

Executar a prova aplicando o material de teste contra uma superfície plana de apoio e sujeitando-o a uma força centrífuga crescente. O dispositivo é constituído de um paralelepípedo de aço de seção hexagonal, em rotação em torno da sua base, acionando por um motor elétrico a uma velocidade variável (ver Fig. 2.11).

Deve-se pesar o corpo de prova em uma balança de precisão de 0,01 gramas, com prévia extração mecânica (sem solvente) do estrato adesivo da classe M/AA/F. Para aderir aplica-se ligeira pressão manual sobre uma das seis superfícies do paralelepípedo, depois de haver inserido talco na superfície para evitar a presença de bolhas de ar.

Para mensurar a eficiência do campo magnético inicia-se a rotação do paralelepípedo e aumenta-se progressivamente a velocidade de rotação, até que o corpo de prova se destaque por efeito da força centrífuga.

Deve-se ter um conta-giro que indique, no momento do destaque, a velocidade de rotação ω . A força [10]de atração é dada pela seguinte fórmula:

$$F = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r}{s} \quad (2.1)$$

Onde: F = força de atração em mN/cm²;

m = P/9,81 (P=peso do material em kgf);

r = raio de rotação em cm (5,58 cm);

s = superfície de contato em cm² (12,57 cm²);

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (n=\text{velocidade de rotação em giro/min do destaque}).$$

Valida-se a eficiência do poder magnético através do valor calculado de F (média de três determinação), em função da espessura do material. A Fig. 2.12 apresenta um diagrama com a curva relativa ao limite mínimo.

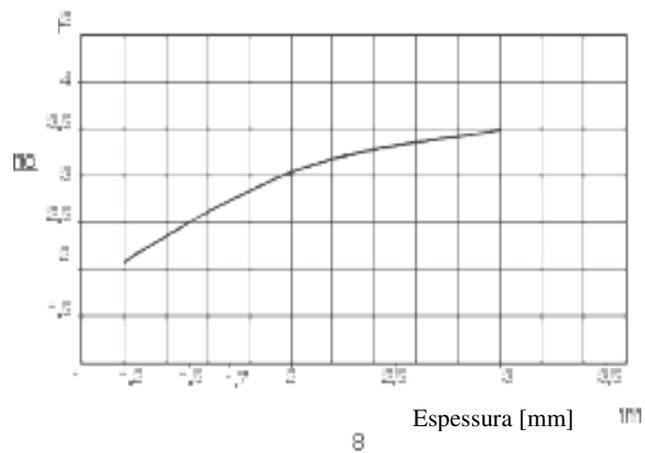
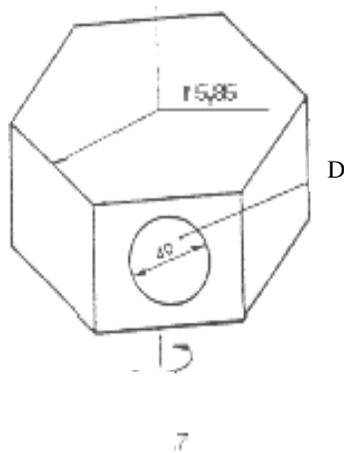


Figura 2.11 – Paralelepípedo Hexagonal

Figura 2.12 – Espessura em função do peso

2.5.3.5- Poder do Insonorizante:

(Classes N; L/N; LL/N; AE/N; NR; M/L; M/AE; M; M/AA/F; MR)

Preparação para o experimento

Este tipo de teste é constituído de placa de aço laminado a frio de $500 \times 500 \times 6 \text{ mm}^3$ (suporte) que tem uma frequência própria de vibração de 145 a 165 Hz e uma velocidade de decaimento da vibração de 0,5 dB/s.

Desengraxar a placa com percloroetileno e colocá-la em posição horizontal.

Apoiar o corpo de prova do material na placa e recortar tal material para ir ao forno, com dimensão de $500 \times 500 \text{ mm}$.

Em seguida, introduzir a placa na estufa a uma temperatura de aquecimento prevista com uma tolerância de $\pm 3^\circ\text{C}$ para o material em teste e mantê-la na estufa por 30 minutos (excluindo o tipo AA, porque sua temperatura de adesão se dá à temperatura ambiente, como especificado no referido parágrafo).

Retirar a placa da estufa e deixá-la resfriando e estabilizando a temperatura ambiente por 4 horas.

(Classes A; L/AA; LL/AA)

Efetuar a adesão do material na placa conforme descrito no procedimento 2.5.3.1 (rolo).

(Classe AA/F)

Efetuar a adesão do material na placa conforme descrito no procedimento 2.5.3.1 (rolo). Em seguida, introduzir a placa na estufa à temperatura de aquecimento prevista com uma tolerância de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ para o material em teste e mantê-la na estufa por 30 minutos.

Retirar a placa da estufa e deixá-la resfriando e estabilizando à temperatura ambiente por 4 horas.

Execução da prova

Colocar o corpo de prova à frequência própria de vibração, mediante o uso do aparelho eletromagnético, e elevar a velocidade de decaimento a sua vibração.

Para se calcular o poder dos insonorizantes há uma fórmula específica[10], que será apresentada a seguir:

$$D \text{ [db/s]} = 8,7 \cdot \Theta \cdot f \quad (2.2)$$

onde: $\Theta = \log = \left(\frac{An}{An + 1} \right)$

An e $An+1$ são os ampéres de sua própria vibração;

f é a frequência de vibração do sistema suporte e insonorizante em [Hz].

A fig 2.13 apresenta um diagrama com uma curva relativa ao limite mínimo em db/s, em função da espessura e do tipo de material.

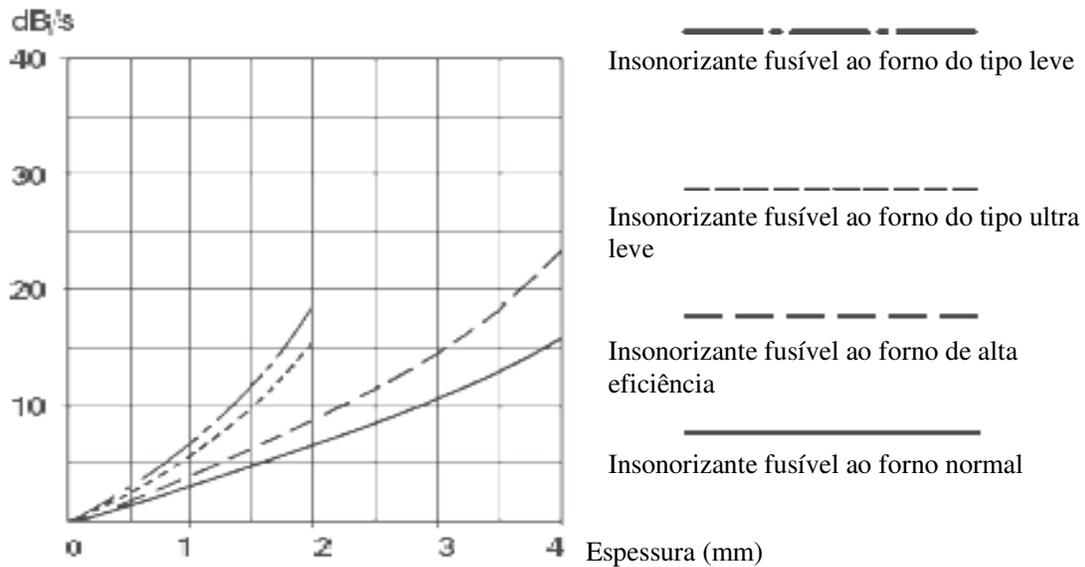


Figura 2.13 – Curva da Espessura x tipo de amortecedor

2.5.3.6 - Eficiência do Tratamento Anti-Blocante:

(Para toda classe de materiais)

Cortar e sobrepor três discos de $\varnothing 100$ mm do amortecedor, retirados do material para teste. Comprimir manualmente com um cilindro de aço (ver fig. 2.7) os três discos, sendo que o principal agente de destaque é a eficiência tratamento anti-blocante.

Colocar o conjunto na estufa a uma temperatura de $50 \pm 2^\circ\text{C}$ por 6 horas; depois deste período deixar resfriar em temperatura ambiente.

Validar a eficiência do tratamento anti-blocante destacando os discos um do outro.

2.5.4 - Características Gerais de seus Componentes:

2.5.4.1 - Dimensão e Tolerância:

As dimensões e tolerâncias deverão constar no desenho de especificação técnica do material.

A espessura deve ser medida em pelo menos três pontos do seu relevo, mediante a um instrumento apropriado para esta medição. O valor a ser considerado será dado pela média aritmética dos 5 pontos. Salvo diversa prescrição a desenho, sua espessura admite uma

tolerância de $\pm 15\%$. Sua dimensão é indicada a desenho, salvo diversa prescrição do mesmo e admite uma tolerância de $\pm 2\%$.

2.5.4.2 - Exame Visual:

O exame visual do insonorizante (amortecedor) deve revelar um resultado de boa aderência à placa plana; em particular, ao longo de sua borda não deve haver bolhas, destaques, dobras e nem destaque da placa.

2.5.4.3 - Adesão à Temperatura Ambiente:

Desprender, com auxílio de uma lâmina de borda arredondada, uma extremidade do material. Em uma parte significativa, apanhar a extremidade com uma pinça, tracionando manualmente em direção perpendicular à superfície da placa.

Validar a adesão através do exame da ruptura do material e da cobertura do suporte.

2.5.4.4 - Escorrimento em Superfície Vertical:

Colocar o componente na estufa na posição vertical a temperatura de aquecimento prevista que é de 30 minutos, deixar resfriar à temperatura ambiente.

Validar o escorrimento através da visualização após forno.

2.6 - Prescrição para a escolha do Fornecedor

A escolha do fornecedor (fornecimento) deve ser efetuada segundo a prescrição geral reportada ao fornecedor do material. A esta prescrição geral é dado o nome de “Qualidade do Fornecedor”. A FIAT Automóveis S/A tem uma norma regente e exclusiva para os fornecedores desde a escolha, auditorias em loco nos fornecedores, penalizações e desclassificações dos fornecedores da FIAT Automóveis S/A.

Não se entra em detalhes a este respeito, pois se trata de uma regulamentação específica da FIAT Automóveis S/A.

2.6.1 - Fornecimento para a Qualificação do Produto:

O fornecimento deve apresentar o quantitativo do produto pedido sob ordem da aquisição alegando o prescrito *no Certificado de Qualidade e Conformidade*. Verificar todas as características prescritas na “*Ficha técnica do produto*”, relativo ao tipo específico. Não é admitido ao fornecedor característica de não-conformidade dos produtos.

2.6.2 - Fornecimento para a produção

O produto fornecido deve estar conforme a prescrição a desenho e obedecer à norma técnica da FIAT Automóveis S/A. Nesta condição estabelece o tipo de processo produtivo adotado e a severidade da aprovação. O fornecedor deve assegurar que todas as classes de importância para a FIAT Automóveis S/A devem estar em conformidade com a norma vigente⁷, pois as características do produto estão prescritas na mesma e há requisitos para sua aplicação e funcionalidade na carroceria.

Nota: Durante a qualificação do produto, no controle de fornecimento, pode ser efetuada uma auditoria em seus produtos sem qualquer comunicação e é indicada a prova do tipo não destrutiva (ND). Quando se tem urgência com os produtos, executa-se uma prova do tipo destrutiva (D), não podendo a amostra ser utilizada por outras provas de controles sem prévia comunicação.

A Tab. 2.7 ilustra a classificação das características dos amortecedores.

Classificação Característica			Tipo de Prova
Característica Gerais dos Materiais	Dimensão e Tolerância	-	NM
	Exame Visual	Secundária	NM
	Massa Volumétrica	Secundária	M
	Adesão a Temperatura Ambiente	Importante	M
	Distensão	Importante	M
	Escorrimento em Superfície Vertical	Importante	M
	Eficiência do Poder Magnético	Importante	M
	Poder Insonorizante	Importante	M
	Comportamento Anti-Ferrugem	Secundária	M
	Eficiência do Tratamento Anti-Adesivo	Secundária	M
Característica Gerais dos Componentes	Dimensão e Tolerância	Importante	NM
	Exame Visual	Secundária	NM
	Adesão a Temperatura Ambiente	Importante	M
	Escorrimento em Superfície Vertical	Importante	M

2.7 – Procedimento para determinação de parâmetros do material (betume)

Nesta etapa serão apresentados três parâmetros do material insonorizante (amortecedor) de 2 mm de espessura, para que se possa utilizar estes valores como *input* no software AutoSea2 para a simulação do método numérico. Os três parâmetros a serem descritos⁸ são os seguintes:

- densidade (ρ) em kg/m^3 ;
- módulo de elasticidade (E) em Pa;
- coeficiente de Poisson (ν).

2.7.1 – Densidade (ρ)

Para a determinação da densidade específica do material insonorizante (amortecedor) se utilizam os seguintes equipamentos / instrumentos no procedimento.

- balança de precisão de 0,01 g
- escala métrica;
- paquímetro, micrômetro ou espessômetro.

Para a obtenção do valor da densidade usa-se um corpo de prova de 100x100 mm. Durante a realização do procedimento devem ser cortados três corpos de prova e, em seguida, deve-se pesar cada uma das amostras e anotar os valores. Finalizando, de posse de um paquímetro, micrômetro ou um espessômetro determinam-se as espessuras destes corpos de prova de acordo com a precisão necessária para a natureza do material. A densidade é calculada pela expressão mostrada a seguir:

$$\rho = \frac{m}{c.l.e} \quad (2.3)$$

Onde :

ρ = densidade em $[\text{kg/m}^3]$;

m = massa em [kg];

l = largura [m];

c = comprimento [m];

⁸ Informações do procedimento de análise técnica dos insonorizantes (amortecedores) cedidas pelo fornecedor TORO. Esta descrição trata-se de um procedimento interno da TORO (laboratório de São Paulo) para a determinação da densidade específica material feita em laboratório.

e = espessura em [m].

Diante da fórmula apresentada anteriormente e das variáveis necessárias para o cálculo da densidade do material em kg/m^3 , o fornecedor TORO enviou o valor já calculado da densidade sem fornecer os valores das massas e das espessuras, sendo o valor médio obtido pelo mesmo de 2600 kg/m^3 .

2.7.2 – Módulo de Elasticidade (E)

Para que se possa obter o valor do módulo de elasticidade do betume é necessário compreender o método que foi desenvolvido pela *Shell Oil Company*, que determina este valor através de experimentos realizados em laboratório por mais de vinte anos de pesquisa. Este método é baseado nas propriedades conhecidas do betume. Estas propriedades, por sua vez, são em função dos efeitos originais como a dureza, susceptibilidade a temperatura e as condições locais de temperatura.

A expressão matemática que melhor define o módulo de elasticidade [6] do material, é dada por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

onde:

σ é a tensão normal;

ε é a deformação específica do material.

Hoje em nosso País há vários tipos de betumes que são empregados em pavimentação e cada um deles tem suas características particulares quanto à penetração e a viscosidade. Segundo informações obtidas junto ao Departamento de Eng. Civil da Universidade Federal de Santa Catarina em publicação de uma apostila pelo Prof. Glicério Trichês [23], são apresentados alguns tipos de betume com suas características, sendo também exposto um índice de suscetibilidade térmica do material, pesquisado por Pfeiffer e Van Doormall [23]. As características dos betumes mais empregados hoje serão mostradas nas Tabs. 2.8 e 2.9 [23]. Bem como a formulação específica para ambos os tipos de asfalto.

Tab. 2.8 – Especificações do cimento asfáltico de petróleo, classificado por penetração.

Característica para a Penetração	Tipo 50/60
1-Penetração, 100g, 5s a 25°C, 0,1 mm	50 - 60
2-Ponto de fulgor, °C, mínimo	235
3-Ductibilidade a 25°C, 5cm/min, cm, mínimo	60
4-Viscosidade Saybolt Furol, s, a 135°C, mínimo	110
5-Teor de betume, % em peso, mínimo	99,5
6-Índice de suscetibilidade térmica (*)	(-1,5) a (+1,0)
7-Efeito do calor e do ar	
% penetração original, mínimo	50
% variação em peso, máximo	1,0

Tab. 2.9 – Especificações do cimento asfáltico de petróleo, classificado por viscosidade.

Característica para a Viscosidade	Tipo CAP - 20
1-Viscosidade a 60°C, poise	2000 a 3500
2-Viscosidade a 135°C, SSF, mínimo	120
3-Viscosidade a 177°C, SSF	30 - 150
4-Penetração normal, 100g, 5s a 25°C, 0,1 mm, mínimo	50
5- Ponto de fulgor, °C, mínimo	235
6-Solubilidade do tricloroetileno, %, peso,mínimo	99,5
7- Índice de suscetibilidade térmica (*)	(-1,5) a (+1,0)
8-Efeito do calor e do ar	
Variação em peso, %, máximo	1,0
Viscosidade a 60°C, poise, máximo	9000
Ductilidade a 25°C, cm, mínimo	20

(*) Índice Pfeiffer e Van Doormall = $\frac{500}{120 - (50) (\log \text{PEN}) + (t^{\circ}\text{C}) - 1951}$ [23] (2.5)

$$120 - (50) (\log \text{PEN}) + (t^{\circ}\text{C})$$

onde:

(t°C) é o ponto de amolecimento;

PEN é o índice de penetração.

Utilizando-se das especificações do cimento asfáltico de petróleo 50/60 conforme a Tab. 2.8, de onde foram extraídos os valores médios relativos ao índice de penetração e a Suscetibilidade térmica para que se pudesse fazer o cálculo através da fórmula de Pfeiffer e Van Doormall [21] obtendo-se o valor do ponto de amolecimento para este composto asfáltico.

PEN = 55 (valor médio);

Suscetibilidade térmica = 0,0.

$$0,0 = \frac{500 \log(55) + 20t - 1951}{120 - 50 \log(55) + t}$$

de onde se obtém:

$$t = 55^\circ\text{C} = t_{\text{RB}}$$

Diante do valor do ponto de amolecimento (t_{RB}) e uma média da temperatura ambiente adotada em torno de 30°C a diferença de temperatura é dada pela equação matemática:

$$\Delta t = t_{\text{RB}} - t_{\text{ambiente}} \quad (2.6)$$

então tem-se que $\Delta t = 25^\circ\text{C}$.

De posse dos valores da diferença de temperatura, índice de penetração médio e das faixas de frequências de 100 a 5000 Hz, tem-se todos as variáveis para a obtenção dos valores do Módulo de Elasticidade.

Para a obtenção destes valores é necessário a utilização de Ábaco desenvolvido pela *Shell Oil Company* (ver fig. 2.14) onde se conjuga todas estas informações obtendo-se assim o valor do Módulo de Elasticidade. Mas, para algumas faixas de frequências o Ábaco da *Shell Oil Company* é de difícil leitura devido à escala em que o mesmo foi construído, havendo assim a necessidade de interpolar os dados das outras frequências para que se tenha todos os valores dos Módulos de Elasticidade para cada faixa de frequência.

Para melhor visualizar os valores dos Módulos de Elasticidade para cada faixa de frequência foi confeccionada uma tabela trazendo todos os valores tirados do gráfico e os valores que foram interpolados. Desta forma a tab. 2.10 ilustra estes valores a seguir.

Tab. 2.10 – Valores dos Módulos de Elasticidades

Frequência em [Hz]	Módulo de Elasticidade em $[N/m^2]$
100	$1,00 \times 10^7$
125	$1,06 \times 10^7$
160	$1,16 \times 10^7$
200	$1,20 \times 10^7$
250	$1,25 \times 10^7$
315	$1,32 \times 10^7$
400	$1,40 \times 10^7$
500	$1,50 \times 10^7$
630	$1,63 \times 10^7$
800	$1,80 \times 10^7$
1000	$2,00 \times 10^7$
1250	$2,40 \times 10^7$
1600	$2,95 \times 10^7$
2000	$3,00 \times 10^7$
2500	$3,07 \times 10^7$
3150	$3,15 \times 10^7$
4000	$4,00 \times 10^7$
5000	$5,00 \times 10^7$

Diante destes valores foi feito o cálculo para o uso da média dos Módulos de Elasticidade resultando em único módulo, $E=2,161 \times 10^7 N/m^2$ ou $E=2,161 \times 10^7 Pa$.

A fig. 2.14 mostra o Ábaco desenvolvido pela *Shell Oil Company* [8] no qual foi a fonte referência para os cálculos dos Módulos de Elasticidades.

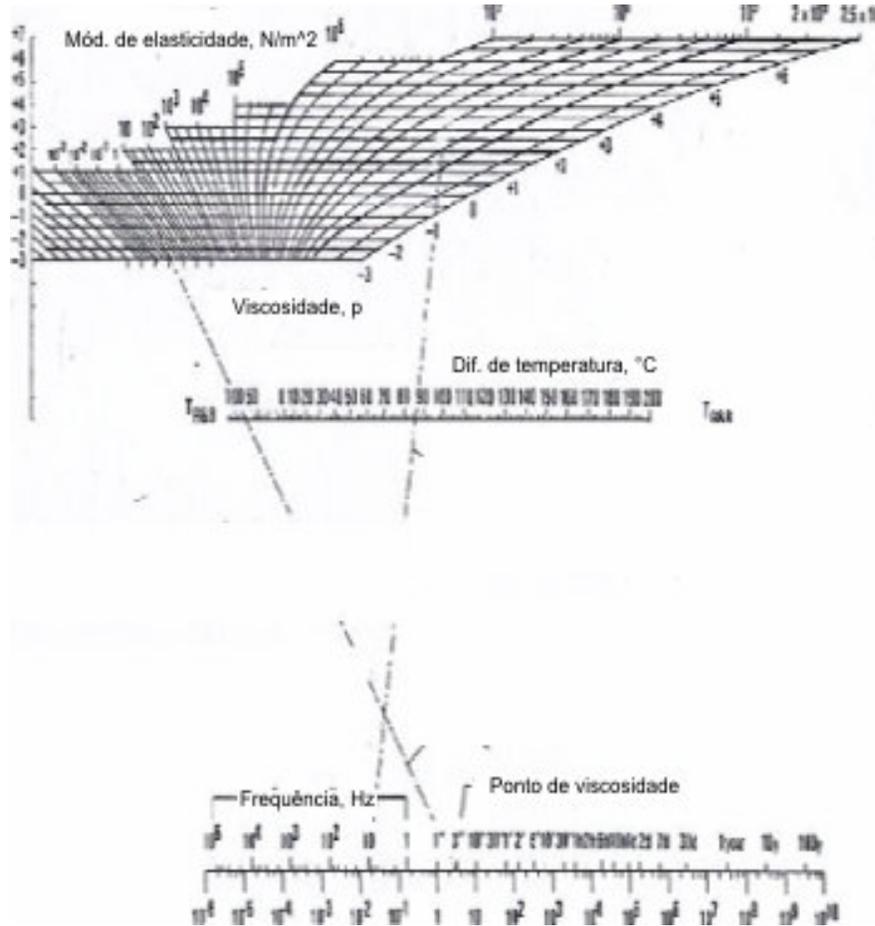


Figura 2.14 – Ábaco desenvolvido pela *Shell Oil Company*

2.7.3 – Coeficiente de Poisson (ν)

O coeficiente de Poisson é determinado por testes estáticos ou testes dinâmicos proveniente de deformações que são monitorados em todas as direções.

Para se calcular o coeficiente de Poisson (ν) alguns laboratórios obtêm este valor através de corpos de prova da qual se extrai as frequências de ressonância torsional e longitudinal. Destes valores calcula-se a tensão de cisalhamento e o módulo de elasticidade. Então com esses valores calculados pode-se obter o coeficiente de Poisson através da seguinte formulação:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (2.7)$$

Onde:

G módulo de elasticidade ao uso momento de cisalhamento;

E módulo de elasticidade linear;

ν coeficiente de Poisson.

Para muitos materiais, como o betume, utilizados em pavimentação sofrem a influência de muito fatores extra, como a temperatura, influência diretamente o seu coeficiente de Poisson (ν).

Segundo, Brown & Brunton (1992) [6], o coeficiente de Poisson (ν) para materiais asfálticos se mostra altamente depende da temperatura com valores variando entre 0,15 (baixa temperatura) e 0,45 (altas temperaturas), segundo Anon, 1986 [6]. O típico valor assumido para o coeficiente de Poisson (ν) asfáltico é $\nu_{\text{asf}} = 0,4$.

Portanto na presente dissertação será considerado como coeficiente de Poisson (ν) o valor de $\nu = 0,4$ para se executar a simulação do método numérico no software AutoSea2.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Análise Estatística de Energia (SEA)

3.1.1 – Histórico

Durante o processo de elaboração do projeto de dissertação foi escolhida a metodologia que seria empregada no desenvolvimento da dissertação, na qual seriam baseados todos os testes práticos e os conceitos teóricos. Esta metodologia empregada seria a Análise Modal, pois se trabalhava com a hipótese de um estudo em uma faixa de frequências baixas.

Nessa linha de pesquisa foi realizado um experimento em uma placa plana pendurada por fios de nylon, onde seria feita a medição das vibrações da mesma quando excitada por um martelo, em baixas frequências, sem amortecimento adicional. Foram obtidas as Funções Respostas em Frequência onde foram observadas, várias frequências naturais correspondentes aos modos de vibração. E, em seguida, foi adicionado amortecimento através de placas amortecedoras, objetivando obter novas Funções Respostas em Frequência.

Tendo em vista as dificuldades ou até mesmo as impossibilidades práticas de determinação teórica e experimental de todos os modos de vibração da placa plana em altas frequências, com ou sem amortecimento adicional, ficou estabelecido que não mais seria utilizada a Análise Modal, devido à ampla faixa de frequências.

Diante desta dificuldade prática que levou à não utilização da Análise Modal, foi estabelecido que na dissertação seria utilizada a metodologia da Análise Estatística de Energia – SEA, devido ao fato desta metodologia proporcionar estudos em estruturas com difusão de energia em sistemas vibroacústicos de média a altas frequências, independentemente do número de modos de vibração.

A teoria fundamental da Análise Estatística de Energia – SEA foi estabelecida em 1960 com os resultados crescentes e a previsão do uso em larga escala do estudo da difusão de energia em várias faixas de frequências, em sistema como: aeronaves, estruturas navais e tubulações, excitadas por escoamentos turbulentos. A construção da teoria Análise Estatística de Energia – SEA foi desenvolvida depois de anos de estudos sendo que, segundo Richard H.

Lyon [17], se considerava que a energia transitava entre dois corpos em vibração. Anos mais tarde toda esta teoria se transformou em um livro escrito pelo mesmo Richard H. Lyon, muito utilizado nos dias de hoje. Nas décadas seguintes, devido ao crescimento industrial, o SEA começou a ser utilizado na indústria automobilística para mensurar a variação vibro-acústica e mensurar os erros e a repetibilidade. Desta forma a Análise Estatística de Energia – SEA se torna uma ferramenta de muita importância para as aplicações em engenharia.

A principal característica de outros métodos de análises, atualmente, é a básica incerteza nos parâmetros modais. As frequências de ressonância e os modos de vibração se mostram com grande sensibilidade a qualquer variação da geometria, construção e propriedades dos materiais. A criação de um programa de computador que tem como função avaliar os modos de vibração e suas frequências via simulação computacional são considerados como um modelo ideal, pois nas pequenas incertezas do modelo estatístico em relação aos parâmetros modais são vistos como natural e apropriado.

O modelo SEA, com o avanço do sistema computacional, tornou-se uma ferramenta de grande importância na engenharia, pois cada vez mais se trabalha em altas frequências e há a necessidade de simulações e determinações de parâmetros em seis ou mais sub-sistemas em vibração.

3.1.2 – Introdução ao SEA

A Análise Estatística de Energia – SEA permite estudar a difusão da energia em sistemas vibro-acústicos nas regiões de médias e altas frequências.

A Análise Estatística de Energia – SEA, baseia-se na possibilidade de representar uma estrutura (ou um sistema) dividido em subsistemas, a fim de representar a energia modal média para apenas partes de um sistema complexo, partes estas que podem ser vigas, placas, cavidades bi e tridimensionais. Permite também analisar vários tipos de ondas que propagam energia, como ondas de flexão ou ondas longitudinais, etc.

A energia vibratória de um subsistema pode ser transmitida a outros subsistemas se os mesmos estiverem acoplados. A fração da energia que é transmitida do i -ésimo para o j -ésimo subsistema é expressa em termos de fator de acoplamento (η_{ij}). O fluxo de potência entre um par de subsistemas é proporcional aos fatores de perdas de acoplamento e à diferença de energia modal média, segundo prof. Arcanjo Lenzi [18].

A potência dissipada é proporcional ao nível de energia de um subsistema e ao fator de perda por amortecimento. A potência de entrada em um modelo em SEA pode acontecer através de fontes sonoras e estruturais ou excitações por fronteiras turbulentas.

Os modelos em SEA são utilizados para prever níveis de resposta médios, analisar a contribuição de trajetórias de transmissão de ruído e o estudo do efeito de mudança no projeto inicial a partir dos níveis de resposta média.

Para permitir uma adequada troca de energia, em cada faixa de frequências de análise cada subsistema deve apresentar um certo número de modos, o qual recomenda-se ser em torno de dez modos de vibração e no mínimo deve-se ter seis modos para aplicações suficientemente precisas pela Análise Estatística de Energia – SEA. Quanto maior o número de modos, maior é a precisão das estimativas.

A partir da energia do subsistema podem ainda ser estimados os valores de tensão e deformação. Por isso adotou-se o nome Análise Estatística de Energia – SEA:

- Energia: representa a variável independente e através dela são obtidas as outras informações;
- Análise: significa que não se trata de um método específico de cálculo, mas sim de uma metodologia de análise;
- Estatística: tendo em vista que os métodos determinísticos necessitam de centenas ou até de milhares de medições ao longo de um subsistema para determinar sua resposta. Esta é a principal razão pelo uso do termo estatística nesta metodologia de análise. Outro motivo refere-se às variações das frequências que sistemas nominalmente idênticos apresentam, sugerindo a consideração de que uma determinada frequência pode ter probabilidade uniforme de estar localizada em uma faixa de frequência Δf , de outro subsistema.

A aplicação da Análise Estatística de Energia – SEA baseia-se no uso de alguns parâmetros importantes para analisar respostas de sistemas em alta frequência, como:

- densidade modal;
- eficiência de irradiação;
- amortecimento estrutural;
- fator de acoplamento.

Como são encontrados na prática sistemas acústicos e estruturais cujas respostas a excitações aleatórias estendem-se até regiões de altas frequências, há a necessidade de uma

metodologia de análise que permita pelo menos estimar as respostas de sistemas contínuos também em altas frequências.

Uma representação estatística é construída em um modelo de SEA de diferentes maneiras. Primeiro, as frequências (autovalores) e formas (autovetores) dos modos naturais são considerados como variáveis aleatórias. Portanto todas as definições e formulações de energia, densidade modal e diferentes formas de fluxos de potência, incluindo entrada, dissipação e transmissão, são obtidas considerando-se os valores médios no espaço e na frequência. Segundo, os parâmetros como espessura, rigidez à flexão e fatores de perda por amortecimento são definidos usando-se a média dos valores no espaço e na frequência. O resultado é uma representação estatística para o comportamento vibro-acústico médio de população de sistemas físicos.

Atualmente são comuns os problemas vibroacústicos envolverem um número muito alto de modos de vibração, sendo que os mesmos estão submetidos a uma faixa alta de frequências. Com base nestas informações a Análise Estatística de Energia – SEA utiliza um método determinístico para entender explicitamente a descrição de cada modo e associar a resolução das respostas em função das variações de tempo e espaço.

Os modelos em SEA são utilizados para prever a média e a variância de uma resposta. Em um gráfico típico de resposta em frequências, a variância da resposta diminui em altas frequências devido ao aumento significativo da superposição modal. Seus resultados convergem para uma banda estreita de resposta, para sistemas com alta densidade modal. A frequência e a fase requerem uma atenção maior em baixas frequências.

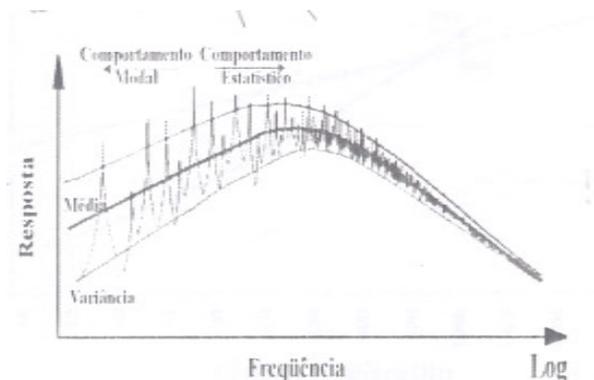


Figura 3.1 – Comparação entre resposta em frequências discretas e os valores obtidos em SEA

A Análise Estatística de Energia – SEA é baseada em uma relação simples de balanço de potências. No estado estacionário, toda a potência que entra em um subsistema é dissipada

internamente ou transmitida a outro subsistema ou a outros subsistemas. A potência dissipada em um subsistema depende do nível de energia e do fator de perda por amortecimento. O fluxo de potência líquida de um subsistema para o outro depende da diferença entre os níveis de energias modais médias.

A energia é a principal variável de interesse em SEA. Uma vez que este parâmetro é obtido, então a vibração de placas, vigas ou estruturas tipo casca podem ser representadas através de valores médios espaciais de velocidade médias quadráticas, integradas em bandas de frequências. A Análise Estatística de Energia – SEA pode ser aplicado para diferentes espectros de médias e altas frequências, o que para a maioria das aplicações de engenharia correspondem à faixa de frequências de 100 Hz a 20 kHz.

Seus cálculos são desenvolvidos em intervalos constantes de banda de frequências ou mais, comumente, em bandas proporcionais, tais como bandas de oitava ou de um terço de oitava. Estas últimas são largamente empregadas em experimentos de acústica e vibração.

O *software* AutoSea2[®] é largamente empregado em problemas de engenharia por apresentar a facilidade de se trabalhar com um modelo experimental relativamente simplificado ou em forma complexa, com respostas rápidas, cometendo-se menos erros operacionais de entrada de dados no software.

Trabalha-se com a possibilidade de se construir qualquer modelo experimental com um grande número de subsistemas, da ordem de cinquenta ou mais subsistemas. Esta construção é feita via software e é um modelo aproximado do real, pois não são levadas em conta geometrias muito complexas e nem detalhes em alto e baixo relevo.

3.1.3-Fundamentos da Análise Estatística de Energia - SEA

A teoria fundamental da Análise Estatística de Energia - SEA é baseada em simples suposições. Os subsistemas são acoplados e assumem que os acoplamentos entre os mesmos são lineares e conservativos. Considera-se que os modos ressonantes contidos na banda de frequências de análise retêm a mesma quantidade de energia. O fator de perda por amortecimento médio na banda é assumido igual para todos os modos de um subsistema para uma determinada faixa de frequências. O fluxo de potência é devido principalmente aos modos ressonantes na banda de frequências. Este fluxo entre os subsistemas é proporcional aos níveis de energia. O número de modos em uma determinada banda de frequência é estatisticamente alto, pois à medida que o número de modos decresce a variância da resposta média aumenta.

Segundo os autores do *software* AutoSea2[®] [2], assume-se que a energia que flui entre os subsistemas acoplados sejam proporcionais à diferença de energia entre eles. E a potência dissipada no subsistema é assumida como proporcional à energia do subsistema.

3.2 – Equações Básicas Utilizadas em SEA

3.2.1 - Energia

A energia de subsistema é definida em termos da média quadrática espacial da velocidade ou pressão média quadrática, integrada na banda de frequência. A energia cinética é definida pelas seguintes equações, respectivamente nos casos de vibrações e acústica, segundo Richard H. Lyon [17].

$$E = m \langle \bar{v}^2 \rangle \quad E = \frac{V}{\rho_0 c_0^2} \langle \bar{p}^2 \rangle \quad (3.1)$$

onde:

m é a massa;

\bar{v}^2 é a velocidade média quadrática espacial [rms];

V é o volume;

$\langle \bar{p}^2 \rangle$ é a pressão sonora média quadrática espacial ($\langle \rangle$) e temporal ($\bar{}$) em [rms];

ρ_0 é a densidade do fluido;

c_0 é a velocidade do som no meio.

3.2.2 - Fluxo de energia entre dois subsistemas

3.2.2.1 - Fator de perda por amortecimento

Por analogia pode-se analisar as vibrações de um subsistema em termos das vibrações do conjunto de modos do subsistema. Este conjunto de modos define a faixa de frequências da análise. Na fig. 2.2 é apresentada um exemplo de interação dois grupos de modos:

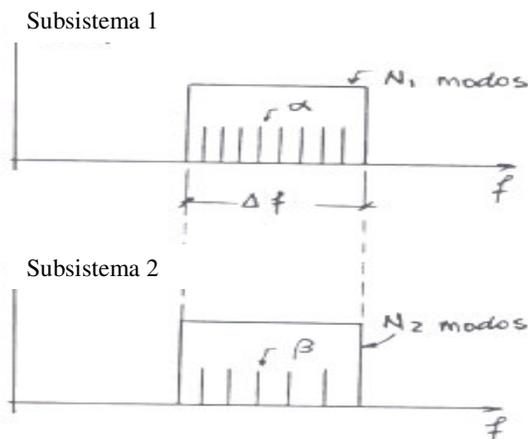


Figura 3.2 – Fluxo de energia em SEA entre subsistemas

Assume-se cada modo do mesmo grupo não esteja acoplado a nenhum outro modo desde grupo, porém cada modo do grupo 1 pode estar acoplado a qualquer modo do grupo 2.

Com base na figura anterior, há algumas hipóteses a apresentar:

- todos os modos possuem a mesma energia na faixa de frequências a ser estudada;
- em faixas de frequências diferentes não há acoplamentos dos modos;
- os subsistemas que são nominalmente idênticos, apresentam parâmetros aleatoriamente distribuídos, principalmente as ressonâncias em altas frequências;
- os modos do mesmo grupo assumem o mesmo amortecimento estrutural durante a análise.

A potência dissipada no grupo é dada pela seguinte expressão, segundo Richard H. Lyon [17]:

$$W_1^d = \omega \eta_1 E_1 \quad (3.2)$$

onde:

E_1 é a energia total dos modos do grupo (energia modal);

η_1 é o fator de perda por amortecimento;

ω representa a frequência central da faixa natural do modo.

O fator de perda por amortecimento pode ser medido através das técnicas da banda de meia potência, da potência de entrada e do tempo de reverberação estrutural T_{60} , definido como o tempo que a energia vibratória leva para decair a um milionésimo do valor inicial. Este parâmetro está relacionado a outras medidas de dissipação, como a razão de amortecimento crítico ξ , o tempo de reverberação estrutural T_{60} e coeficiente de absorção médio α . Pode-se representar o fator de perda por amortecimento através das seguintes equações, segundo Richard H. Lyon [17]:

$$\eta = 2 \xi \qquad \eta = \frac{2,2}{fT_{60}} \qquad (3.3)$$

onde:

f é a faixa de frequência central.

3.2.2.2 - Fator de perda por acoplamento

O fator de perda por acoplamento é definido como a razão entre a potência transmitida e a potência armazenada no subsistema de origem. Então tem-se que:

$$W_{1 \rightarrow 2} = \omega \eta_{12} E_1 \qquad W_{2 \rightarrow 1} = \omega \eta_{21} E_2 \qquad (3.4)$$

Onde:

η_{12} representa o fator de perda por acoplamento do subsistema 1 para o subsistema 2;

η_{21} representa o fator de perda por acoplamento do subsistema 2 para o subsistema 1.

Assim em condições estacionárias, o fluxo líquido de potência do subsistema 1 para o subsistema 2 é definido através da seguinte equação:

$$W_{12} = W_{1 \rightarrow 2} - W_{2 \rightarrow 1} \quad (3.5)$$

A seguir, na Fig. 3.3, é representado um modelo do balanço de potência em SEA.

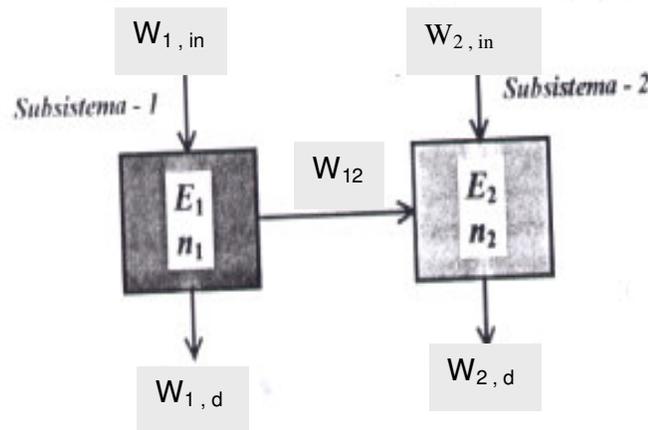


Figura 3.3 – Modelo clássico de SEA para o balanço de potência entre dois subsistemas

3.2.3 - Balanço de Energia

No estado estacionário, de forma global as equações de SEA nos mostram um balanço energético para cada subsistema. A potência que entra no subsistema é dissipada ou transmitida a outros subsistemas obedecendo a seguinte relação:

$$\sum W_{i,in} = \sum W_{i,d} \quad (3.6)$$

Para um sistema complexo geral, o balanço energético anterior, aplicado para todos os subsistemas, resulta em um sistema linear de equações, apresentado em forma matricial como:

$$\begin{Bmatrix} W_{1,in} \\ W_{2,in} \\ \vdots \\ W_{k,in} \end{Bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} \left(\eta_1 + \sum_{j=2}^k \eta_{1j} \right) \cdot N_1 & -\eta_{12} \cdot N_1 & \dots & -\eta_{1k} \cdot N_1 \\ -\eta_{21} \cdot N_2 & \left(\eta_2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^k \eta_{2j} \right) \cdot N_2 & \dots & -\eta_{2k} \cdot N_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{k1} \cdot N_k & -\eta_{k2} \cdot N_k & \dots & \left(\eta_k + \sum_{j=1}^{k-1} \eta_{kj} \right) \cdot N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{E_1}{N_N} \\ \frac{E_2}{N_2} \\ \vdots \\ \frac{E_K}{N_K} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

onde:

N_i , $i=1,2,\dots, k$ é o número de modos contidos na faixa de frequência considerada.

Com as hipóteses consideradas para o fluxo de energia os melhores resultados serão obtidos em altas frequências, pois a densidade modal é alta o suficiente.

3.2.4 - Densidade Modal

Em uma placa de dimensões L_x e L_y , simplesmente apoiada em todos os contornos, as distâncias relativas entre as frequências de ressonâncias, nas direções x e y , são dadas por

$\frac{\pi}{L_x}$ e $\frac{\pi}{L_y}$, segundo Richard H. Lyon [17].

As frequências de ressonâncias para uma placa plana, segundo Richard H. Lyon [17], são então dadas por:

$$\omega^2 = \left[\left(\frac{n_x \pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{L_y} \right)^2 \right]^2 \mathbf{K}^2 c_\ell^2 \quad (3.8)$$

onde:

n_x e n_y são números inteiros;

\mathbf{K} é o número de onda;

c_ℓ é a velocidade longitudinal da onda dada por $c_\ell = \sqrt{E/\rho_m}$, onde E módulo de elasticidade e ρ_m a densidade do material.

O número de modos de um determinado número de onda, segundo Richard H. Lyon [17], é dado pela equação:

$$n(k) = \frac{\pi K}{2 \Delta A_k} \quad (3.9)$$

onde:

$$\Delta A_k = \frac{\pi^2}{A_p} \text{ e } A_p = L_x L_y$$

Para a placa plana a densidade modal, segundo Richard H. Lyon [17], é dada pela equação a seguir em [modos/hertz]:

$$n(f) = n(\omega) \frac{d\omega}{df} = \frac{2\pi^2 \omega A_p}{4c_p^2 \pi^2} = \frac{A_p}{2\kappa c_\ell} = \frac{\sqrt{3} A_p}{h c_\ell} \quad (3.10)$$

onde:

h é a espessura da placa.

Nota-se que, no caso acima, a densidade modal é independente da frequência. Bem como se verifica que, através da análise de sua formulação matemática, a densidade modal depende da espessura (h), da área da placa e da velocidade longitudinal da onda na placa plana.

3.2.5 - Mobilidade

O cálculo de mobilidade, segundo Lyon [17], é feito a partir do conhecimento da velocidade de resposta do sistema em um ponto e da força de excitação aplicada, neste ou em outro ponto. A mobilidade é dada pela expressão:

$$Y = \frac{\dot{y}}{F} \quad (3.11)$$

onde:

\dot{y} é a velocidade de excitação;

F é a força de excitação.

Segundo Lyon & DeJong [17], a mobilidade total Y apresenta uma variação proporcional à frequência central.

3.2.6 – Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural é o responsável pela conversão da energia vibratória em calor. A energia vibratória está associada à propagação de ondas elásticas que produzem deslocamento no interior dos materiais.

O amortecimento estrutural ocorre através da adição de amortecimento na estrutura, podendo para isto serem usados materiais viscoelásticos em configuração de sanduíche. O amortecimento estrutural costuma ser determinado experimentalmente através dos métodos de decaimento e de potência de entrada que serão apresentados a seguir.

O amortecimento é representado pelo fator de perda η , sendo a razão entre a energia dissipada por radianos de oscilação e a máxima energia vibratória dos componentes, segundo Samir N. Y. Samir [12]:

$$\eta = \frac{W_{disp}}{2\pi f M \langle \bar{v}^2 \rangle} \quad (3.12)$$

onde:

W_{disp} é a potência dissipada;

M é a massa do componente;

f é a frequência [Hz];

$\langle \bar{v}^2 \rangle$ é a velocidade média quadrática espacial.

3.2.6.1 - Método do Decaimento

Este método é utilizado com muita frequência para controle de ruído ou aplicações gerais de vibração, por se tratar de um método simples e de fácil compreensão e de não necessitar de muitos equipamentos nas medições. Consiste em efetuar um impacto com martelo contra o componente que está sendo ensaiado e registrar o decaimento da energia vibratória.

A formulação para o método de decaimento, segundo Samir N. Y. Samir [12] é dada por:

$$\eta = \frac{2,2}{f_n T_{60}} \quad (3.13)$$

onde:

f_n frequência central da banda;

T_{60} tempo de reverberação estrutural (necessário para haver queda de energia de 60 dB).

Para a aquisição das curvas no método de decaimento foi montado o experimento utilizando os equipamentos como é mostrado na Fig. 3.4 abaixo.



Figura 3.4 – Método de decaimento montagem do experimento

Este método não é usado em SEA, devido a duas limitações. A primeira deve-se fato que se $\eta=0,16$ estrutura dissipar toda a energia vibratória em apenas um ciclo, tendo como consequência a não obtenção de leituras nítidas de decaimento, por isso, recomenda-se o seu uso para estruturas com $\eta < 0,08$. A segunda é a inviabilidade de aplicação, pois há diferentes taxas de decaimento para cada modo, fazendo com que os resultados do amortecimento obtidos por este método são subestimados em relação ao valor médio dos modos contidos na faixa de frequência de análise.

3.2.6.2 - Método da Potência de Entrada

O método de potência de entrada usa a mesma definição do fator de perda e tem uma grande vantagem de se poder determinar o valor médio dos amortecimentos em todos os modos contidos na faixa de frequência em que se está trabalhando, como é mostrado na formulação a seguir, segundo Samir N. Y. Samir [12]:

$$W_{ent} = \eta 2\pi f E_{vib} \quad (3.14)$$

onde:

W_{ent} é a potência entrada;

η é o fator de perda;

f é a frequência [Hz];

$E_{vib} = M \langle \bar{v}^2 \rangle$ é a energia vibratória do subsistema.

Neste método deve-se tomar um cuidado especial com a fixação dos componentes e com a suspensão dos mesmos, devido ao fato de que se assume que toda a energia que é transmitida a cada componente seja dissipada somente pelo seu amortecimento estrutural, sendo que $W_{ent} \cong W_{disp}$. Também deve-se ter cuidado na escolha dos pré-amplificadores, acelerômetros e transdutores de força e de aceleração, pois é recomendado que estes componentes sejam bem escolhidos para evitar erros de fase nos sinais coletados durante a medição da potência transferida ao componente estrutural (W_{ent}).



Figura 3.5 - Método de Potência de Entrada montagem do experimento

A grande vantagem do método de potência de entrada está na condição de determinação do fator de perda médio na faixa de frequências desejada do experimento. Determina-se o fator de perda, segundo Samir N. Y. Samir [12], pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{W_{disp}}{2\pi f E_{vib}} \quad (3.15)$$

onde:

E_{vib} é a energia vibratória do sistema.

Este método permite analisar a variação de energia dissipada por ciclo e obter informações sobre o amortecimento e sobre as variações de amplitudes e frequências. Também é possível o uso do método em sistemas de vibrações altamente amortecidos, porém demanda bastante tempo.

3.3 - Tratamentos Viscoelásticos

3.3.1 - Materiais Viscoelásticos

Os materiais que apresentam características de amortecimento (dissipação de energia) e estrutural (energia de tensão armazenada) têm a capacidade de ser chamados de viscoelásticos. Virtualmente todos os materiais estão classificados nesta categoria; o termo geralmente é aplicado somente para alguns materiais, como os plásticos e para os elastômeros, que tenham realmente uma alta relação da energia de dissipação para a capacidade de armazenar energia.

A adição de materiais viscoelásticos a elementos estruturais é conhecida como tratamento de amortecimento viscoelástico.

Se uma estrutura composta é deformada, ela armazena energia através de vários tipos de deformação (cisalhamento, tensão, compressão e flexão), em cada elemento estrutural.

O fator de perda para os materiais viscoelásticos é dado pela expressão, segundo Bereanek e Vér [3]:

$$\eta = \sum \eta_i \frac{W_i}{W_T} \quad (3.16)$$

onde:

η é o fator de perda total na estrutura;

η_i denotado como o fator de perda correspondente ao i-ésimo elemento da deformação;

W_i representa a energia armazenada na deformação do i-ésimo elemento;

$W_T = \sum W_i$ é a energia total contida no sistema.

Esta expressão, segundo Beranek e Vér [3], direciona para importantes conclusões: um elemento de deformação pode produzir uma contribuição significativa no fator de perda total somente se (1) o fator de perda do elemento for significativo e (2) a energia armazenada neste elemento representar uma significativa fração da energia armazenada total.

3.3.2-Propriedades mecânicas dos materiais viscoelásticos

Para os plásticos e elastômeros, materiais viscoelásticos de grande interesse prático, as partes real e imaginária do módulo de elasticidade, bem como os fatores de perda, apresentam grandes variações em função da frequência e da temperatura. O fator de perda associado ao módulo de cisalhamento é normalmente considerado igual ao fator de perda associado ao módulo de elasticidade, para fins práticos.

Estes materiais têm um comportamento que podem ser explicado com base em suas interações nas cadeias moleculares que constituem os materiais poliméricos. Para baixas temperaturas, as moléculas estão relativamente inativas (“travadas entre si”), resultando em grande rigidez, pois elas se movem relativamente pouco em função uma das outras e há uma pequena interação molecular (fricção) produzindo perdas. Em altas temperaturas, as moléculas são bem ativas e elas se movem mais livremente umas das outras, resultando em uma rigidez menor. Assim, como há uma menor interação entre elas, elas produzem uma menor dissipação de energia por atrito intermolecular. Em temperaturas intermediárias as moléculas têm uma interação e movimentações intermediárias e a rigidez se mantém na faixa intermediária, mas os valores do fator de perda são os máximos. Uma discussão similar se aplica aos efeitos da frequência nas propriedades do material, sendo que a inércia das moléculas leva a decréscimos na mobilidade e na interação com o aumento da frequência.

É importante lembrar que as propriedades mecânicas dos materiais poliméricos, incluindo os plásticos e elastômeros, tende a ter maiores variações que nos metais e em outras estruturas clássicas de materiais. A variabilidade de resultados resulta da estrutura molecular do polímero e distribuição do seu peso molecular, que depende não somente da composição química dos materiais, mas sim como são processados. Uma variabilidade adicional resulta de vários tipos e quantidades de plastificantes e fibras que são adicionados a muitos materiais comerciais, para um grande número de aplicações práticas.

3.3.3 - Efeitos da temperatura nos materiais viscoelásticos

Segundo Jones [7], as propriedades dos módulos dos polímeros viscoelásticos, representados pelos módulos de cisalhamento, de elasticidade e pelo fator de perda variam fortemente com a temperatura nos meios e, em particular, para cada composição dos polímeros.

Para os plásticos, a temperatura de transição T_s , a partir da qual os módulos de cisalhamento e elasticidade começam a cair significativamente, é bastante elevada. Por outro lado, para um típico elastômero, a temperatura de transição é muito mais baixa, freqüentemente abaixo da temperatura local. Para leves acréscimos na temperatura, os módulos de cisalhamento e elasticidade decaem rapidamente e o fator de perda eleva-se ao máximo e, em seguida, volta a cair, o que se refere à região de transição. As características de composição de cada polímero também influenciam na aplicação, em geral e em particular, para o propósito de controle da vibração.

3.3.4 - Efeitos da freqüência nos materiais viscoelásticos

Enquanto os efeitos da freqüência são menores para o típico sólido elástico, como as ligas metálicas, os efeitos da freqüência são muitos maiores para alguns polímeros. Qualitativamente, os efeitos da freqüência são inversos aos efeitos da temperatura; aumentando-se a freqüência o efeito do aumento da temperatura começa a decair para diferentes faixas.

Isto é totalmente evidenciado para o uso de materiais poliméricos viscoelásticos para aplicações em que há necessidade de razoáveis perdas de energia, pois requer um bom conhecimento do comportamento dos módulos do material, bem como das faixas de freqüências e de temperaturas de trabalho.

CAPÍTULO IV

MODELAGEM EXPERIMENTAL

4.1 – Introdução

Neste capítulo será apresentado como se desenvolveram os testes experimentais na placa plana e na porta do modelo FIAT Palio (três portas).

Para que os testes experimentais apresentassem resultados confiáveis foram realizados testes com uma maior proximidade possível da realidade, utilizando materiais de amortecimento acústicos (insonorizantes) que são colocados nos carros no processo produtivo da FIAT Automóveis e a utilização de uma placa plana de espessura de 0,8 mm com uma área de 1,00 x 0,85 m² para servir de parâmetro de comparação.

De posse da porta do modelo FIAT Palio foi desenvolvido um modelo computacional simplificado, baseada na metodologia de Análise Estatística de Energia (SEA), com o objetivo de simular, com uma aproximação aceitável, o comportamento vibratório da porta em questão. Com base nos testes que serão realizados na porta do modelo Palio e com o tipo de amortecedor e espessura hoje utilizados na produção do modelo poder-se-ia saber o amortecimento estrutural da porta, considerando a transmissão de ruído e vibração por via aérea incidindo diretamente sobre a área frontal da porta.

A escolha da porta do modelo FIAT Palio ocorreu com base nas seguintes considerações:

- é o principal carro produzido hoje na planta de Betim e foi agente de mudança de conceito para a FIAT Automóveis na década de 90;
- é uma das opções para carros de passeio da FIAT Automóveis que possuem versões duas e quatro portas, tendo para a versão duas portas uma dimensão maior da porta e conseqüentemente uma melhor condição de estudo dos amortecedores (insonorizantes) na porta.

A simulação computacional foi desenvolvida no software AutoSea2, devido ao fato de que:

- o software é de fácil aprendizagem e aplicação;
- o software é utilizado pela FIAT Automóveis no setor de acústica e vibração;

A faixa de frequências a ser trabalhada, segundo ONSAY [21], se deve ao fato de que SEA tem a capacidade de trabalho em médias e altas frequências, onde se emprega a maioria das aplicações de engenharia, que compreende a faixa de 100 Hz a 10k Hz, mais usual. Mas, segundo BREMNER [4], há outra possibilidade de trabalho com uma faixa ainda maior de frequências, que compreende de 50 Hz a 20k Hz.

Já as bandas de frequências que melhor se enquadram ao modelo em questão são as bandas de frequências percentual constante, de 1/3 de oitava e 1/1 de oitava (bandas de frequências).

Com base nos depoimentos de ONSAY e BREMMER, foi feita uma visita à Engenharia, no setor acústica da FIAT Automóveis, para se verificar qual a melhor alternativa de trabalho e qual seria a mais utilizada para o modelo em análise. Foi considerada a faixa de frequências de 100 Hz a 10k Hz e as bandas de frequências de 1/3 de oitava, pois a FIAT Automóveis realiza medições experimentais em estradas utilizando-se desta faixa de frequências e destas bandas de frequências.

Para que se possa ter uma melhor compreensão dos amortecedores em função do amortecimento estrutural na porta, utilizaram-se três modelos distintos de amortecedores, com espessuras de 1,7 mm, 2,0 mm e 3,0 mm.

4.2 – Métodos de Trabalho

4.2.1 – Método de Decaimento para Placa Plana (Amortecimento)

Este método é utilizado com muita frequência para controle de ruído ou aplicações gerais de vibração, por se tratar de um método simples e de fácil compreensão e de não necessitar de muitos equipamentos nas medições.

Desta forma, foi utilizada uma placa plana de aço com dimensões de 1,00 x 0,85 m² e de espessura de 0,8 mm e uma porta para se determinarem as propriedades de amortecimento dos insonorizantes. Esta placa plana foi cortada nas dimensões já mencionadas e logo em seguida foi encaminhada ao processo de pintura, que compreende o desgraxamento, fosfatização até a pintura por eletroforese¹ da placa. Isto significa tirar toda a oleosidade da

¹ Eletroforese é um método de pintura anticorrosiva desenvolvida para a indústria automobilística também conhecida como eletrodeposição ou e-coat. É composta pela mistura de tinta diluída em água onde se faz passar uma corrente elétrica contínua, que através de uma diferença de potencial, se reveste toda a carroceria com uma película uniforme e coesa desta tinta diluída em água.

superfície da mesma e dar uma proteção de fosfato (fosfatização) para evitar a corrosão e uma pintura catódica feita por eletroposição na superfície da placa.

De posse da placa plana e de amortecedores (insonorizantes) de mesmo tamanho, com variadas espessuras, iniciou-se então o experimento propriamente dito nas instalações da Engenharia na FIAT Automóveis, devido à proximidade com as pessoas do setor de acústica, dos aparelhos e do software que seriam utilizados nos experimentos.

Primeiramente este método consiste em dependurar a placa plana sem amassados, sustentada por fios de nylon, isto é, fios que não deixam a vibração imposta na placa plana ser transmitida ao suporte de sustentação.

Como a placa plana tem como objetivo de servir como parâmetro de comparação do estudo dos coeficientes de perda η dos insonorizantes na porta, conclui-se que seria necessário estender o estudo para os amortecedores (insonorizante) de várias espessuras, aplicando-os na placa plana sempre no mesmo local, posição central da placa, variando apenas a espessura do amortecedor (ver Fig. 4.1). Com base nesta variável de posição e no tamanho da placa plana de dimensão $1,00 \times 0,85 \text{ m}^2$, foi colocado mais um amortecedor (insonorizante) na placa plana, já que a mesma não tem uma rigidez estrutural como a porta que é o objeto de estudo.



Figura 4.1– Amortecimento duplo na placa plana

Em seguida, no outro lado foram marcados cinco pontos ao longo da placa plana, independentemente da posição em que estavam localizados os amortecedores (ver Fig. 4.2). Na mesma figura mostra-se o posicionamento do acelerômetro para a realização do

experimento, sendo que o mesmo foi posicionado de forma aleatória (não centralizado), para que se pudesse verificar todos os modos de vibração da placa plana para todos os pontos.

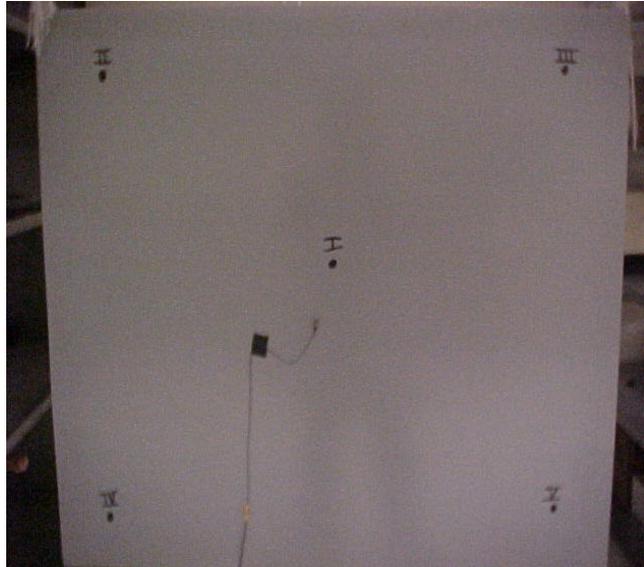


Figura 4.2 – Localização dos pontos na placa

Depois de feitas as marcações e pendurada a placa plana no suporte de sustentação, iniciou-se o experimento com a placa plana sem amortecimento, isto é, sem adição de amortecedor.

De posse de um martelo para a excitação e com a instrumentação toda preparada e o software do analisador *Ono Sokki* com os dados já configurados, para a obtenção das curvas de decaimento, com a faixa de frequências de trabalho especificada de 100 Hz a 10 kHz e a faixa de filtro² de frequência (ver Tab. 4.1) bastando apenas ser configurado no analisador a faixa de frequência com seu filtro para que pudesse iniciar o experimento.

² Tabela retirada do livro 'Ruído - Fundamentos e Controle' do Samir N. Y. Gerges 2º Edição. (página 108). Valores utilizados como filtros no software *Ono Sokki* para o experimento prático.

Tabela 4.1 – Frequências inferiores, centrais e superiores da banda de 1/3 de oitava

Banda de 1/3 oitava Hz		
Frequência Inferior	Frequência Central	Frequência Superior
89,1	100	112
112	125	141
141	160	178
178	200	224
224	250	282
282	315	355
355	400	447
447	500	562
562	630	708
708	800	891
891	1000	1122
1122	1250	1413
1413	1600	1778
1778	2000	2239
2239	2500	2818
2818	3150	3548
3548	4000	4467
4467	5000	5623
5623	6300	7079
7079	8000	8913
8913	10000	11220

Primeiro há a excitação do sistema com o martelo de ponta de aço em um único ponto para que, em segundos mais tarde, o software mostre na tela do computador a curva de decaimento. Para a obtenção dos valores de decaimento para a placa plana sem amortecedor se procede pegando os valores pico a pico da curva de decaimento para a faixa de frequência em que se está trabalhando. Este procedimento se repete para todas as faixas de frequências, mudando-se basicamente o filtro em que irá trabalhar a faixa de frequências e o número de linhas para a visualização da curva. É importante lembrar que há excitação através do martelo em todos os cinco pontos distribuídos ao longo da placa plana, com a obtenção de cinco curvas de decaimento para o cálculo do amortecimento η dos insonorizante, para cada faixa de frequência utilizada.

O procedimento se repete para todo o experimento na placa plana com a adição dos amortecedores de espessuras específicas de 1,7 mm, 2,0 mm e 3,0 mm, na posição central da placa plana.

De posse de todos os valores coletados durante a fase experimental da placa plana foi criada uma planilha de dados onde foram calculados os fatores de perda (η) de cada amortecedor e inclusive o fator de perda da placa plana sem o amortecedor. Na tab. 4.2 a seguir, é mostrado uma planilha contendo os resultados finais dos valores do fator de amortecimento com suas faixas de frequências para a placa plana.

Tabela 4.2 – Fatores de perda [η] para a placa plana

Frequência Central	Placa			
	Sem amortecedor [η]	Amortecedor 1,7 mm [η]	Amortecedor 2,0 mm [η]	Amortecedor 3,0 mm [η]
100	2,71E-03	8,25E-03	1,34E-02	2,25E-02
125	2,66E-03	7,12E-03	1,17E-02	1,87E-02
160	2,54E-03	6,74E-03	1,07E-02	1,71E-02
200	2,42E-03	6,42E-03	1,02E-02	1,59E-02
250	2,66E-03	6,18E-03	9,71E-03	1,50E-02
315	2,59E-03	6,20E-03	9,06E-03	1,45E-02
400	2,19E-03	6,17E-03	9,27E-03	1,36E-02
500	2,10E-03	5,62E-03	9,11E-03	1,28E-02
630	1,68E-03	4,82E-03	8,68E-03	1,11E-02
800	1,27E-03	4,16E-03	8,54E-03	1,06E-02
1000	1,25E-03	4,14E-03	7,28E-03	9,89E-03
1250	1,23E-03	3,74E-03	6,84E-03	8,35E-03
1600	1,06E-03	3,73E-03	6,02E-03	7,37E-03
2000	1,05E-03	3,53E-03	4,42E-03	6,86E-03
2500	1,07E-03	3,18E-03	3,68E-03	5,24E-03
3150	1,09E-03	2,78E-03	3,45E-03	4,45E-03
4000	8,46E-04	2,26E-03	2,84E-03	3,64E-03
5000	6,17E-04	2,04E-03	2,54E-03	3,21E-03
6300	6,48E-04	1,79E-03	2,31E-03	3,08E-03
8000	4,24E-04	1,71E-03	2,21E-03	2,63E-03
10000	3,81E-04	1,40E-03	2,11E-03	2,48E-03

Com base na análise específica do gráfico de decaimento (ver fig. 4.3) das curvas sobrepostas para o comportamento do fator de amortecimento (η) para a placa plana, verifica-se que o amortecedor (insonorizante) de espessura de 3,0 mm conforme o comportamento da curva tem um melhor amortecimento dentre os amortecedores (insonorizante) utilizados no experimento. Outro fato que chama a atenção é o comportamento do gráfico nas faixas de frequências de 160 a 800 Hz onde as curvas têm um ligeiro declíneo e comportamentos semelhantes para todos os amortecedores.

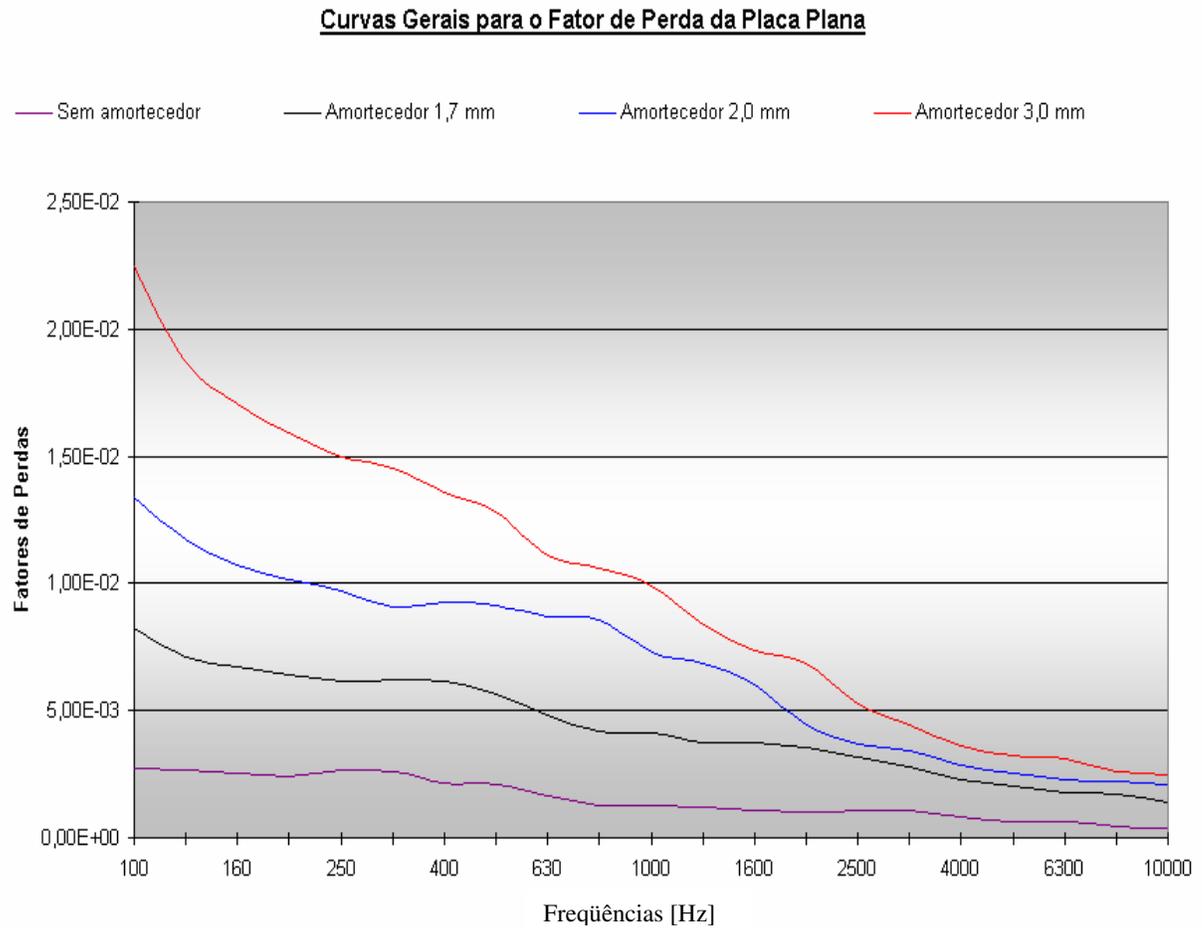


Figura 4.3 – Fatores de perda para placa plana

4.2.2 – Método do Decaimento para Porta (Amortecimento)

Nesta etapa, tendo em vista que o que se pretende é evitar ressonância da placa do painel externo da porta, propõe-se trabalhar apenas com a estrutura metálica da mesma, desconsiderando todos os elementos que são agregados à mesma como: vidro, acionamento elétrico do vidro, forros de porta e chicotes elétricos dentre outros elementos montados na porta. Com esta proposta simplificadora leva-se em conta que a placa do lado interno da porta não tem contato com os elementos montados e a estrutura da porta é totalmente rígida.

Como os dados já compilados para a placa plana, iniciou-se o experimento para a porta do modelo FIAT Palio (três portas), com o objetivo de estudar o fator de amortecimento dos insonorizantes para a porta em questão.

Da mesma forma como foi feito para placa plana, a porta foi processada no processo de pintura, onde compreende o desengraxamento, fosfatização até a pintura por eletroforese¹ da placa, isto é, tirada toda a oleosidade da superfície da mesma e dando uma proteção de fosfato (fosfatização) para evitar a corrosão e uma pintura catódica feita por eletroposição na superfície da placa.

Assim como na placa plana, os experimentos também foram feitos no setor de Engenharia da FIAT Automóveis e os amortecedores também foram do mesmo tipo utilizados na placa, para manter o padrão do experimento e ter uma confiabilidade na comparação entre os amortecedores.

Em seguida, repetiu-se o procedimento de marcação executado na placa plana e também foram marcados cinco pontos ao longo da superfície externa (painel) da porta com o objetivo de se determinar o fator de perda dos amortecedores (insonorizante) na porta. A Fig. 4.4, a seguir mostra o posicionamento dos pontos ao longo da porta para a execução do experimento.

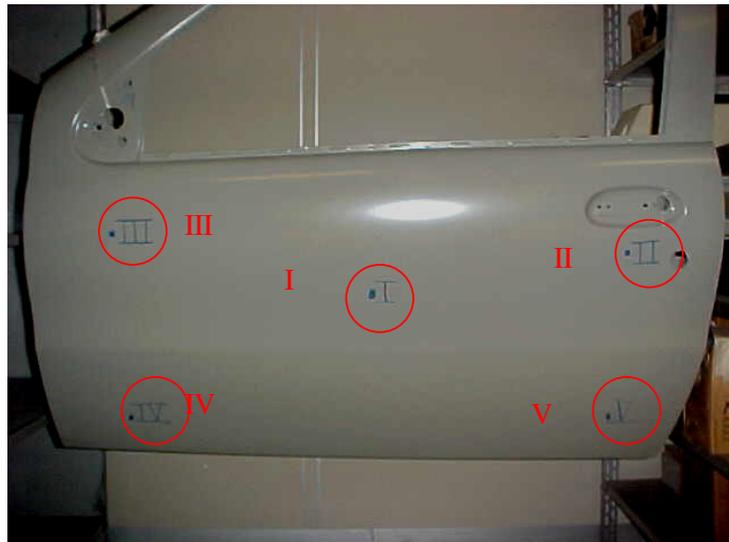


Figura 4.4 – Pontos medição na porta

Já no experimento da porta, é colocado apenas um amortecedor de 500 x 150 mm² de espessura de 2 mm na posição central, como é feito nas linhas de produção da FIAT Automóveis, para que se possa ter uma reprodução fiel da porta a ser montada, sem que para isso seus componentes sejam montados (ver Fig. 4.5).



Figura 4.5 – Porta com amortecedor central (insonorizante entre painel e ossatura)

A porta, da mesma forma, foi suspensa por fios de nylon no suporte de sustentação para que pudesse ser feito o experimento do método de decaimento.

De posse de um martelo para a excitação e com a instrumentação toda preparada e o software do analisador *Ono Sokki* com os dados já configurados, para a obtenção das curvas de decaimento, com a faixa de frequências de trabalho especificada de 100 Hz a 10 kHz e a faixa de filtro³ de frequência (ver Tab. 4.1) bastando apenas ser configurado no analisador a faixa de frequência com seu filtro para que pudesse iniciar o experimento.

Excita-se o sistema porta com um martelo de ponta de aço em um único ponto para que, em segundos mais tarde seja mostrada na tela do computador a curva de decaimento. Para a obtenção dos valores de decaimento para a porta sem amortecedor se procede pegando os valores pico a pico da curva de decaimento, para a faixa de frequências em que se está trabalhando. Este procedimento se repete para todas as faixas de frequências, mudando-se o filtro na faixa em se que irá trabalhar e, se necessário for, mudar o número de linhas para a visualização da curva, lembrando-se que há excitação através do martelo em todos os cinco pontos distribuídos ao longo da porta para obtenção de cinco curvas de decaimento para o cálculo dos fatores de perda η dos amortecedores (insonorizantes). O acelerômetro permanece inalterado em relação a sua posição inicial, isto é, o mesmo é posicionado em uma região da

³ Tabela retirada do livro 'Ruído - Fundamentos e Controle' do Samir N. Y. Gerges 2º Edição. (página 108). Valores utilizados como filtros no software *Ono Sokki* para o experimento prático.

porta de forma aleatória (não centralizado) para que se pudesse verificar todos os modos de vibração da porta para todos os pontos.

O procedimento citado acima se repete para todo o experimento da porta, com a adição dos amortecedores de espessuras específicas de 1,7 mm, 2,0 mm e 3,0 mm que serão colocados na posição central da porta.

Os valores coletados durante a fase experimental da porta foram analisados em uma planilha de dados, onde se calcularam os fatores de perda (η) de cada amortecedor e inclusive o fator de perda da porta sem o amortecedor. De posse dos dados coletados, foram obtidos os valores indicados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3 – Fatores de perda [η] para a porta

Frequência Central	Porta			
	Sem amortecedor [η]	Amortecedor 1,7 mm [η]	Amortecedor 2,0 mm [η]	Amortecedor 3,0 mm [η]
100	3,55E-03	4,76E-03	6,13E-03	7,15E-03
125	3,34E-03	4,45E-03	5,96E-03	6,89E-03
160	3,22E-03	4,18E-03	5,38E-03	5,76E-03
200	3,20E-03	3,54E-03	5,45E-03	6,27E-03
250	2,63E-03	3,41E-03	4,32E-03	6,24E-03
315	2,01E-03	2,90E-03	3,63E-03	5,29E-03
400	1,56E-03	2,21E-03	3,08E-03	4,32E-03
500	1,29E-03	1,82E-03	2,67E-03	4,15E-03
630	1,01E-03	1,80E-03	2,47E-03	4,09E-03
800	8,06E-04	1,53E-03	2,37E-03	3,07E-03
1000	6,58E-04	1,45E-03	1,91E-03	3,01E-03
1250	6,09E-04	1,28E-03	2,18E-03	2,54E-03
1600	4,17E-04	8,61E-04	1,83E-03	2,36E-03
2000	3,59E-04	7,95E-04	1,59E-03	2,23E-03
2500	3,40E-04	7,70E-04	1,39E-03	1,78E-03
3150	2,77E-04	6,49E-04	1,19E-03	1,44E-03
4000	2,65E-04	4,99E-04	1,06E-03	1,31E-03
5000	2,36E-04	3,74E-04	1,02E-03	1,24E-03
6300	2,57E-04	3,52E-04	9,98E-04	1,18E-03
8000	2,26E-04	3,27E-04	8,39E-04	9,92E-04
10000	2,16E-04	2,67E-04	7,07E-04	8,50E-04

De acordo com a análise do gráfico de decaimento (ver fig. 4.6) das curvas sobrepostas para o comportamento do fator de amortecimento (η) para a porta, verifica-se que o amortecedor (insonorizantes) de espessura de 3,0 mm confere à porta um melhor

amortecimento dentre os amortecedores (insonorizantes) utilizados no experimento. O gráfico de decaimento da porta chama a atenção é o comportamento das faixas de frequências de 160 a 250 Hz, onde as curvas têm um declíneo e o mesmo acontece na faixa de frequências de 1000 a 1600 Hz, devido ao fato da porta estar na faixa de frequência natural.

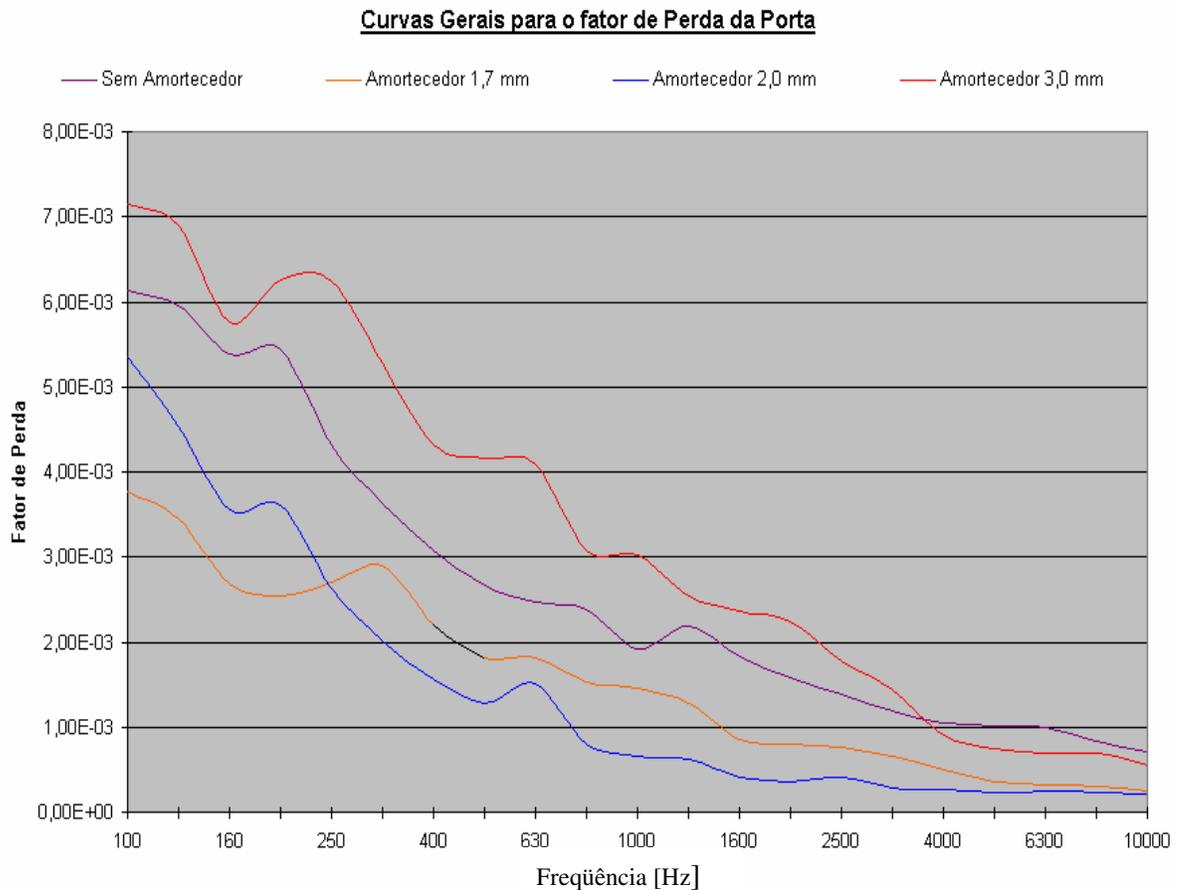


Figura 4.6 - Gráfico de amortecimento para porta

4.2.3 – Instrumentação Utilizada para o Método de Decaimento

Como já havia sido falado anteriormente, este método não necessita de uma aparelhagem excessiva e a mesma é de bastante simplicidade e de fácil manuseio por parte das pessoas que estão operando os aparelhos.

Durante a fase de execução do experimento foram utilizados alguns aparelhos/dispositivos que serão relacionados a seguir:

- Martelo → Br el & Kj r tipo 8202 – n° de série :1757159;

- Ponta de aço → Br el & Kj r tipo 8200 – n° de série :1747158;
- Acelerômetro → Br el & Kj r tipo 4375 – n° de série :2211991;
- Pré-amplificador → Br el & Kj r tipo 2635;
- Placa de aço com 0,8mm de espessura e de tamanho 1,0 x 0,85 m²;
- Porta do modelo FIAT Palio (três portas);
- Cera para fixação do acelerômetro;
- Analisador Espectral Ono Sokki Modelo CF 34000;
- Cabos de ligação entre amplificador e analisador.

4.2.4 – Representação esquemática dos experimentos

A representação esquemática do método de decaimento para os experimentos da placa plana e da porta encontra-se na Fig. 4.7. Esta figura consiste em demonstrar como foi montado o experimento prático obtendo através do acelerômetro a velocidade e o sinal passando pelo pré-amplificador e se obtendo a curva de decaimento.

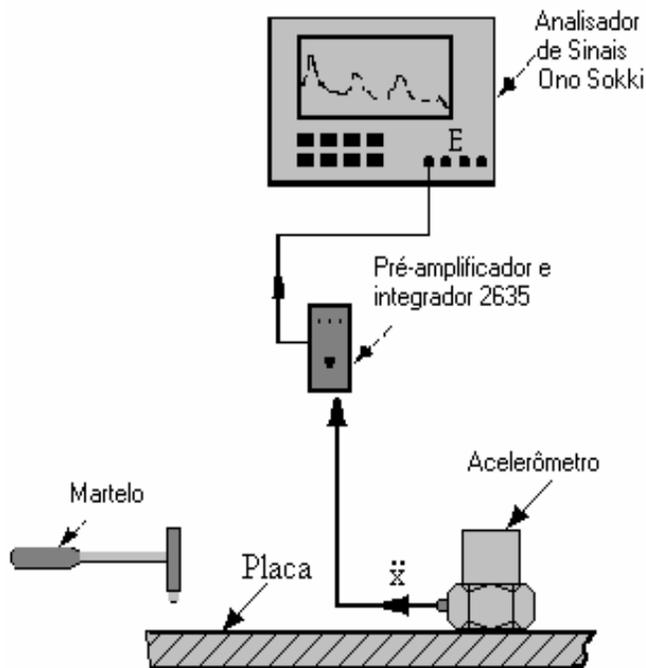


Figura 4.7 - Representação gráfica para o método de decaimento

4.2.5 – Método da Potência de Entrada

Com o decorrer do trabalho foram acrescentadas dificuldades em relação à parte experimental e foi necessário executar o experimento fora da FIAT Automóveis. Isto aconteceu para o método da potência de entrada que foi executado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), devido ao fato do setor Engenharia da FIAT Automóveis não ter ainda tido a oportunidade de aplicação deste método, em nenhum teste prático, nos modelos fabricados hoje na linha de produção.

Em Santa Catarina adquiriu-se uma porta do modelo FIAT Palio (três portas), para que pudessem ser feitas as aquisições do método da potência de entrada.

Foi feito um estudo de que forma seria executado o experimento. Assim, discutiu-se por onde seria feita a excitação da porta se pela dobradiça ou se pelo painel externo da porta. A escolha foi feita pelo painel externo da porta, para que se pudesse realmente verificar a contribuição da adição dos amortecedores (insonorizante) na porta do modelo em questão.

Outra discussão quanto ao número de pontos em que seriam feitas as leituras, tanto para a potência de entrada como para as velocidades, em cada subsistema da porta. Ficou estabelecido que seriam três pontos de excitação para as medições da potência de entrada na porta e em seguida, passar-se-ia ao cálculo das médias das potências de entradas para que se pudesse somente trabalhar com a média dos três pontos no software AutoSea2[®]. A seguir, é mostrado a Fig. 4.8 que ilustra a representação dos pontos na porta para o experimento prático.

Obs.: a porta utilizada no experimento foi toda desmontada, retirando-se assim os componentes mecânicos de acionamento do vidro, retrovisor, painel de porta, borrachas e deixando somente a “sigilatura⁴” ao longo do contorno da porta.

⁴ Sigilatura é denominada como plastisol, isto é, um material que tem a propriedade de alterar o seu estado físico sob a ação de calor passando do estado pastoso para o estado sólido. Sua principal função é de calafetação (vedação) das uniões de placas da carroceria impedindo assim a entrada de água e poeira para dentro do habitáculo. Também exerce outra função bastante importante que é a proteção ante-corrosiva nas placas das portas, assoalho parte externa e vão do motor. É aplicado em forma de filetes por pistola de aplicação com bicos dimensionalmente definidos pela engenharia da FIAT Automóveis.



Figura 4.8 – Pontos de excitação para o método de potência de entrada

Da mesma forma, estabeleceu-se que as medições de velocidades na porta seriam feitas em quatro pontos distintos, para cada subsistema da mesma. A seguir é mostrado, na Fig. 4.9, um dos subsistemas da porta com os pontos distintos.



Figura 4.9 – Pontos de medição para o subsistema 1 da porta

Dando prosseguimento à marcação dos pontos para a medição das velocidades e da divisão dos subsistemas da porta, foram demarcados quatro pontos em cada subsistema conforme descrito abaixo:

- subsistema 1 → painel externo (quatro pontos);
- subsistema 2 → fechadura (quatro pontos);
- subsistema 3 → painel inferior (quatro pontos);
- subsistema 4 → ossatura interna (quatro pontos);
- subsistema 5 → dobradiça (quatro pontos).

4.2.5.1 – Calibração

De posse do sistema B&K *Pulse*, com todas as variáveis já definidas para o método de potência de entrada, foi feita a configuração do mesmo, entrando com os dados relativos ao acelerômetro, ao transdutor de força, ao pré-amplificador (caneta) e o tipo de ruído que irá excitar o sistema. O tipo de ruído escolhido foi o ruído branco, limitado à faixa de frequência de interesse, por se tratar de um ruído de banda larga.

Foram feitas duas configurações, uma para a potência de entrada e outra para o cálculo das velocidades nos pontos em cada subsistema. Em seguida, foi feita a calibração dos componentes que seriam utilizados nos experimentos, objetivando uma melhor confiabilidade e conhecimento do percentual de erro em relação aos componentes na obtenção das leituras.

Desta forma foi feita a calibração dos componentes que seriam utilizados no experimento de potência de entrada. Dentre os componentes que teriam de ser calibrados estão o acelerômetro, o transdutor de força e o pré-amplificador (caneta). A calibração da força (tempo) consiste em adicionar uma massa conhecida, como uma cabeça de impedância mais o parafuso de fixação, sobre o transdutor de força, e excitar durante um determinado tempo até que o software mostre a curva de resposta no tempo. São registrados os valores pico a pico da curva da força em função do tempo, e comparados com os valores calculados através da expressão $F=m.a$ em [N]. O calibrador excita as massas a 10 m/s^2 (rms).

Massa da cabeça de impedância + parafuso de fixação = 31,49 g

Massa do transdutor de força após o elemento sensor = 18 g

Total de 49,49 g

$$\text{Valores medidos a partir da curva no tempo} \rightarrow \begin{cases} + \text{ pico} = 648 \text{ mN} \\ - \text{ pico} = -685 \text{ mN} \end{cases}$$

Valor Pico a Pico = 1,383 N

Valor rms = 0,489 N (valor pico a pico dividido por $2\sqrt{2}$)

Comparando com a formulação tem-se:

$$F=m \cdot a = 0,04949 \times 10 \text{ m/s}^2 \text{ (rms)} = 0,4949 \text{ N (rms)}$$

Desta comprovação através da calibração tem-se um erro de 1,20 %, que é um valor aceitável para o experimento de vibração.

De forma similar foi executada a calibração da velocidade (tempo), com o mesmo calibrador e usando o pré-amplificador (caneta). Então foi obtida a seguinte relação:

$$\text{Valores medidos a partir da curva do tempo} \rightarrow \begin{cases} + \text{ pico} = -36,3 \text{ mm / s} \\ - \text{ pico} = -64,7 \text{ mm / s} \end{cases}$$

Pico a Pico = 28,4 mm/s

Rms = 10,04 mm/s

Assim através da calibração, verificou-se um erro de 0,4 % para a velocidade (tempo).

Também foi verificada a calibração para a mobilidade (velocidade/força), na qual foram montados simultaneamente uns sobre os outros, sendo que o acelerômetro fixado através da cera sobre a cabeça de impedância e a mesma conectada ao transdutor de força pelo parafuso de fixação. Todos estes componentes citados anteriormente, foram fixados ao calibrador através do transdutor de força, sendo os mesmos excitados por um determinado tempo até ser traçada a curva da mobilidade pelo software. A obtenção desta curva consistia em extrair o valor máximo e observar qual a frequência de referência para este pico. O resultado desta calibração será mostrado a seguir:

$$\text{Velocidade} \rightarrow \begin{cases} + \text{ pico} = 15,3 \text{ mm / s} \\ - \text{ pico} = -12,9 \text{ mm / s} \end{cases}$$

Valor obtido Pico a Pico = 28,2 mm/s

$$\text{Força} \rightarrow \begin{cases} + \text{ pico} = 756 \text{ mN} \\ - \text{ pico} = -627 \text{ mN} \end{cases}$$

Valor Pico a Pico = 1,383 N

Assim, foi calculado o seguinte valor de mobilidade:

$$\frac{28,2}{1,383} = 20,4 \frac{mm / s}{N} = 159 \text{ Hz}$$

No arquivo que foi gerado durante a calibração do espectro de força tem-se o seguinte valor:

$$2,054 \times 10^{-2} \frac{m / s}{N} = 159 \text{ Hz}$$

Fazendo uma comparação entre o resultado que foi obtido na tela (calculado) se aproxima muito do valor que foi gerado durante o experimento de calibração, portanto a calibração dos instrumentos foi satisfatória, bastando apenas fazer o experimento prático.

4.2.5.2 – Execução do Experimento

Conforme já mencionado anteriormente, foram feitos três furos de 5 mm de diâmetro no painel externo da porta, para que pudesse ser fixado o fusível mecânico necessário para o experimento de potência de entrada para a porta em questão. De posse da porta partiu-se, então, para a montagem do experimento, escolhendo o melhor local onde já se encontravam as furações no teto do laboratório, para que a porta pudesse ser suspensa pelos cabos de aço, dando uma maior firmeza e confiabilidade na sustentação da porta. O amortecedor utilizado nesta etapa foi o de 2,0 mm de espessura para a porta, devido ao fato do mesmo ser utilizado na produção dos carros na fábrica em Betim, simulando assim a realidade do processo produtivo.

Com a porta já no devido local passou-se então para a montagem dos componentes do experimento (como o acelerômetro), configuração do software, conexões dos cabos no “laptop”, no *Pulse* e no amplificador. Posteriormente foi feita a conexão do fusível mecânico na porta para dar início ao experimento. Isto é, o shaker foi pendurado por cabos de aço em suporte, e o mesmo somente teve alterado seu posicionamento quando houve a necessidade de uma regulagem em relação à altura dos pontos onde seria conectado o fusível mecânico para a excitação através do shaker. Outro ponto para o qual se deve chamar a atenção é em relação ao posicionamento do transdutor de força sendo que o mesmo está em contato direto com o

painel externo da porta durante a excitação do shaker, proporcionando uma melhor medição da força de excitação.

A seguir, está mostrada a figura relativa à montagem do shaker e do fusível na porta (ver Fig. 10).



Figura 4.10 – Montagem do shaker e do transdutor de força na porta

Depois de todos os equipamentos montados e o conjunto shaker transdutor posicionado junto à porta, foram iniciadas as medições de potência de entrada e as medições das velocidades para cada ponto de excitação. Durante as excitações, o equipamento *Pulse* (depois da configuração aplicada) mostra na tela três tipos de gráficos que são de grande importância para a mensuração da potência de entrada. Foram utilizados gráficos para o estudo da coerência, para o autoespectro da força e para a resposta em frequência (mobilidade).

Para o estudo das velocidades foram utilizados dois gráficos, com uma visualização fácil e rápida do comportamento das velocidades em cada subsistema, para um determinado ponto de excitação. Estes gráficos são para o estudo da FFT (Função Transformada de Fourier) e para o comportamento das faixas de larguras percentual de 1/3 de oitava (bandas de frequência).

Para ilustrar melhor o comportamento de cada função, para a potência de entrada e para o cálculo das velocidades, serão mostrados alguns exemplos de gráficos que foram extraídos de cada etapa do experimento. Para a potência de entrada na porta, há a necessidade de se verificar alguns itens para o perfeito andamento do experimento em relação à montagem e a calibração feita via software. Para que esta verificação pudesse ser realizada, o shaker

estava posicionado para excitação na posição três da porta, conforme Fig. 4.8, obtendo-se os seguintes gráficos:

- Coerência:

A coerência, como pode se perceber, apresenta somente valores reais, pois quando há ruído nos sinais de força e/ou de movimento a coerência cai, chegando mais próximo de zero. Também, quando o sistema analisado é não-linear, pode-se entrar com uma frequência na força e ter várias frequências na resposta, portanto perde-se a relação causa / efeito, e assim a coerência também cai. A Fig. 4.11 é de grande importante para mostrar que, de uma forma geral, a coerência manteve-se boa, indicando assim que o sistema se comportou de forma adequada e que não havia ruído excessivo nos sinais, garantindo que as medições foram feitas com os sistemas de medição bem regulados. Na verdade, a coerência é o que garante a qualidade de qualquer processamento que envolva dois sinais (entrada e saída), como o processamento, por exemplo, que fornece curvas funções respostas em frequência (FRF), como, no caso, a mobilidade.

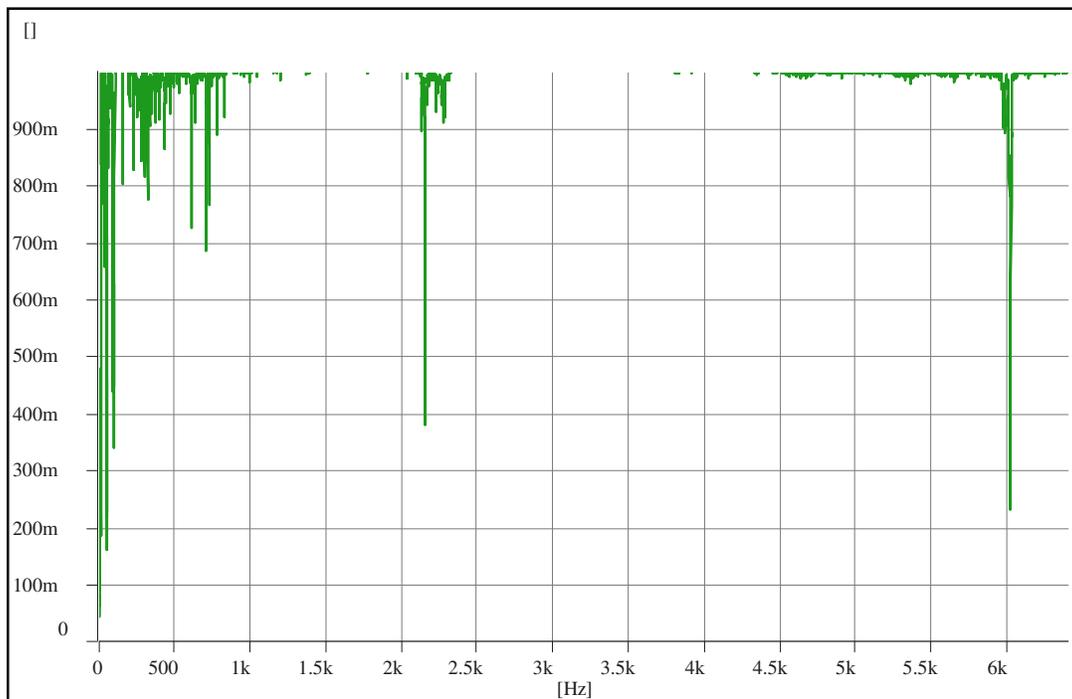


Figura 4.11 - Curva de coerência

- Resposta em Frequência (mobilidade):

O que se pode concluir em respeito desta curva é que ela tem um comportamento aproximadamente plano. Desta forma, a parte real da mobilidade, e o auto-espectro da força também é aproximadamente plano, o que se pode esperar após os cálculos é que a potência de entrada está bem distribuída na faixa de frequências estudada.

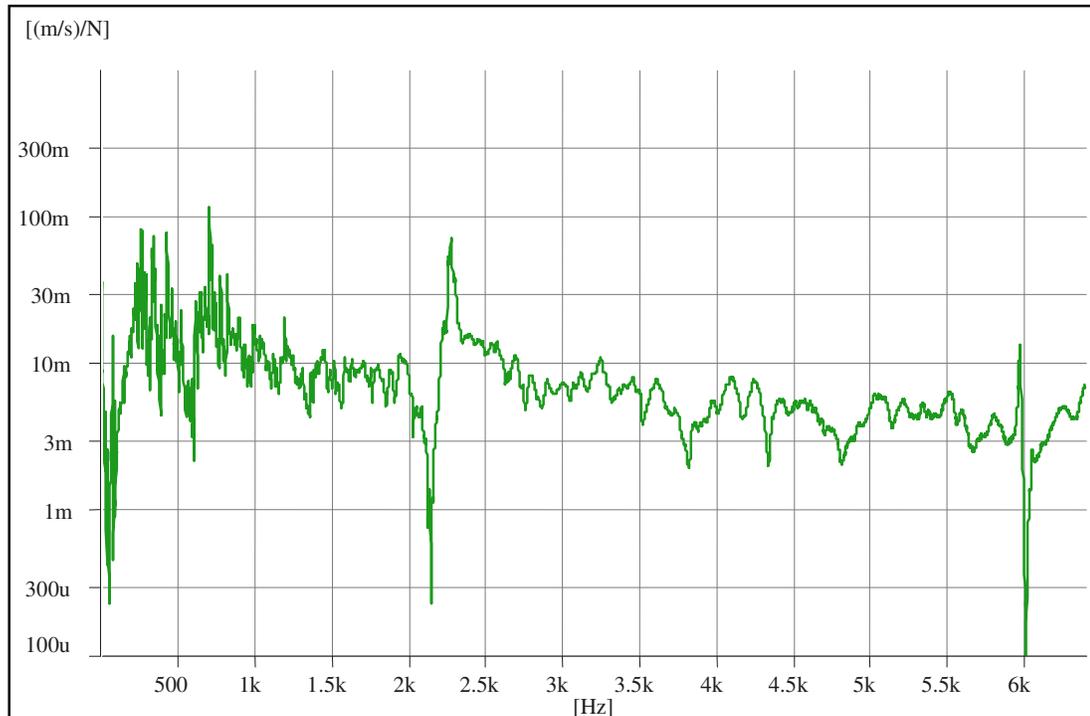


Figura 4.12 - Resposta em frequência (mobilidade) parte real

Para o exemplo do cálculo das velocidades, o shaker estava posicionado para excitação na posição um da porta e o acelerômetro posicionado no ponto dois, para a medição no primeiro subsistema da porta, conforme a Fig. 4.9, obtendo-se os seguintes gráficos:

Um terço de oitava:

A figura mostra como estão distribuídas as velocidades nas várias faixas de frequências de 1/3 de oitava. Como as energias cinéticas são proporcionais às velocidades ao quadrado, o que se pode esperar é que tais energias tenham se concentrado nas frequências mais baixas até aproximadamente 500 Hz.

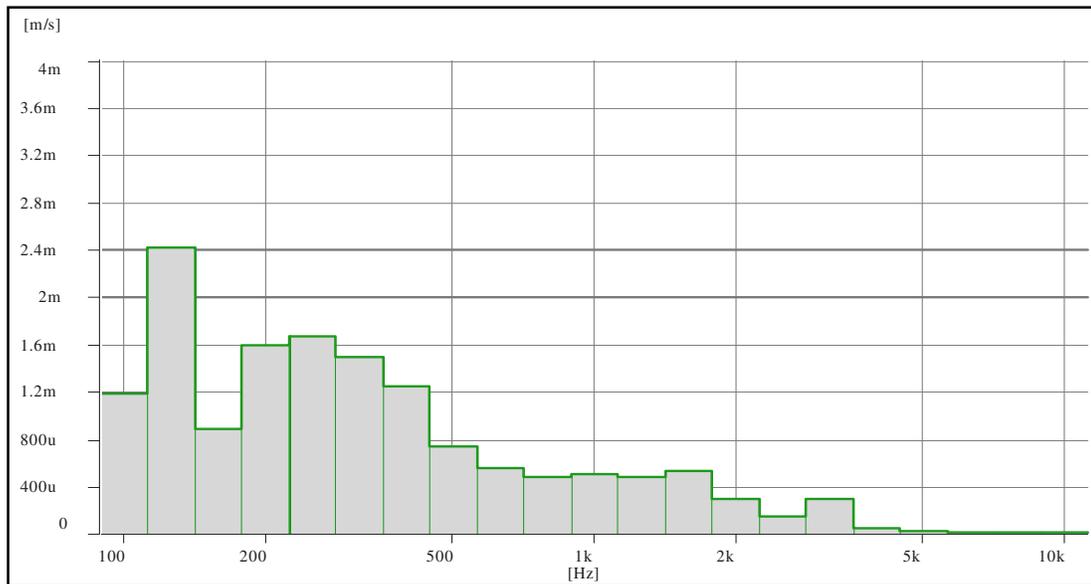


Figura 4.13 - Espectro em um terço de oitava da velocidade

- Função Transformada de Fourier:

Na fig. 4.15 está representado o auto-espectro da velocidade no ponto de excitação. Este sinal de velocidade foi utilizado para cálculo da mobilidade. Um ponto a ser salientado no gráfico da fig. 4.15 é o comportamento semelhante ao espectro de 1/3 de oitava da velocidade, ou seja, conclui-se que as maiores velocidades estão concentradas em baixas frequência.

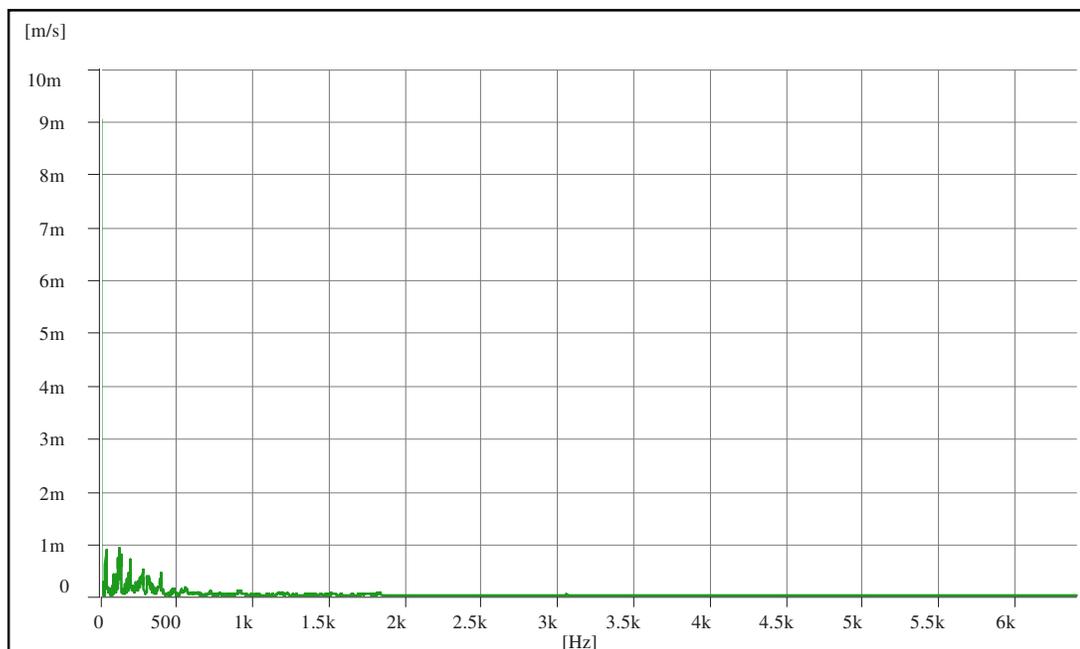


Figura 4.14 – Espectro da velocidade em função transformada de Fourier

4.2.5 – Instrumentação utilizada para o Método de Potência de Entrada

Este método necessita de uma aparelhagem mais sofisticada e específica, em termos de hardware e software, do que o método de decaimento. Requer um pouco mais de cuidado em relação à configuração e ao inserir no software os fatores de calibração.

Durante a fase de execução do experimento foram utilizados alguns aparelhos/dispositivos que são relacionados a seguir:

- Transdutor de Força → Brüel & Kjær tipo 8200 – n° de série: 842427;
- Fusível Mecânico → Parafuso com rosca 10-32 UNF-2A;
- Pré-amplificador (caneta) → SN 17045 PCB – n° de série: 422E12;
- Amplificador → Brüel & Kjær tipo 2706 – n° de série: 2282741;
- Porta Modelo FIAT Palio;
- Cera para fixação do acelerômetro;
- Software Pulse LabShop 6.0 Brüel & Kjær;
- Computador Dell;
- Cabos de ligação entre amplificador, computador e shaker;
- Acelerômetro → Tipo 352B10 ICP – n° de série: 29561;
- Suporte de sustentação do shaker;
- Cabos de aço para sustentação do shaker e da porta;
- Ganchos de sustentação;
- Amortecedor (insonorizante);
- Espátula;
- Soprador térmico para aquecimento na retirada do amortecedor.

4.2.6 – Representação esquemática do experimento

Na Fig. 4.15, a seguir, está apresentada a cadeia de medição que permitir mensurar potências de entrada e velocidades médias (no espaço e no tempo), nos experimentos com a porta. Desta forma, o experimento com a porta foi dividido em duas etapas. A primeira consiste em calcular a potência de entrada fixando o transdutor de força e o vibrador na estrutura e o posicionamento do acelerômetro próximo ao transdutor de força, pois o valor final seria obtido através da média de três pontos de excitação. Houve a regulagem do amplificador de potência mantendo-o inalterado durante todo o experimento. De modo geral foi

configurado o software e houve a necessidade de inserir o fator de correção para a caneta via software para a obtenção dos resultados. A segunda etapa consiste em fixar o vibrador em um ponto de excitação no subsistema 1 e medir a velocidade em cada um dos quatro pontos já estabelecido no subsistema 1 da porta através do acelerômetro. Este procedimento seria repetido para os outros dois pontos de fixação do subsistema 1 para a excitação e mensurado com o acelerômetro nos quatro pontos dos demais subsistemas, na qual totalizaria sessenta medições de velocidade na porta. Este procedimento se repetiu para a porta com e sem o amortecedor (insonorizante).

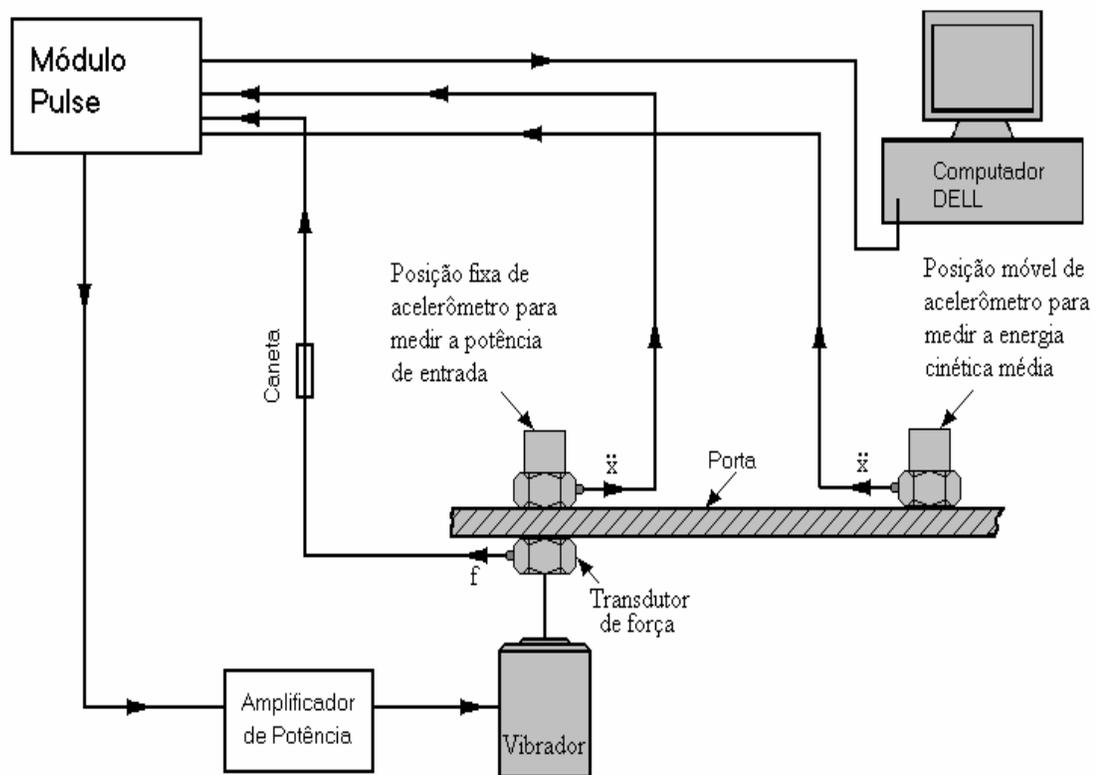


Figura 4.15 – Cadeia de medição para os experimentos com a porta

4.3– Modelagem AUTOSEA

4.3.1 – Construção do Modelo

A concepção do modelo em SEA, de forma geral, se faz de duas maneiras distintas, considerando o modelo a ser estudado em sua geometria básica.

A primeira forma ocorre através da importação do modelo de outros softwares compatíveis com o ambiente do *AUTOSEA*. Pode-se citar duas formas de importação:

- da concepção do modelo em desenhos de CAD (Computer Aided Design);
- da concepção do modelo simplificado a partir das coordenadas de alguns de seus pontos.

A segunda condição para a concepção da modelagem em SEA é de posse do desenho, em qualquer formato, de poder extrair através das dimensões reais do desenho o modelo em que se deseja fazer a simulação via software.

Para a fase de modelagem, optou-se pela para a construção do modelo a partir de dimensões reais, devido ao fato de não possuir os desenhos em CAD e nem em Elementos Finitos. Desta forma, foram utilizadas dimensões objetivas para que se pudesse dar forma ao modelo da porta que seria o objeto de estudo no AutoSea2[®].

4.3.2 – Construção dos Subsistemas

Segundo LYON & DeJong [17], o modelo em SEA é baseado no balanço da energia dinâmica e no acoplamento entre os grupos de modos naturais no sistema. Um sistema complexo é modelado selecionando o acoplamento dos grupos modais (subsistemas) que são associados com os componentes físicos do sistema.

A cada subsistema é associado um valor de energia. Os números de graus de liberdade para um modelo em SEA é igual ao número de subsistemas. Os acoplamentos entre modos de diferentes subsistemas são também analisados estatisticamente.

Para o modelo em SEA de um sistema dinâmico são seguidos seguintes passos para a construção dos subsistemas:

- definição dos subsistemas contendo os grupos de modos naturais com cada componentes do sistema;
- definição física do acoplamento entre os subsistemas;
- definição da forma externa de excitação dos subsistemas.

Para a definição dos subsistemas do modelo em SEA, foram levadas em conta algumas considerações com base em sua teoria, trabalhando com um valor mínimo de seis modos para a construção dos subsistemas para que haja uma perfeita troca de energia entre os mesmos.

Considerando-se o modelo como um acoplamento fraco, devido aos subsistemas estarem unidos através da flangeatura⁵ do painel externo com ossatura.

A aplicação da potência de entrada na porta será direcionada para o painel externo (subsistema 1), onde ocorre a flexão mais pronunciada do painel.

Outra ressalva a ser feita foi a simplificação dos subsistemas da porta, utilizando placa plana na modelagem da ossatura da porta, desconsiderando os furos, rasgos e os relevos apresentados em sua concepção original. Da mesma forma o procedimento foi repetido para a região da fechadura, parte inferior da porta e na parte lateral da porta nas dobradiças, sempre com o objetivo de simplificar as formas geométricas do modelo em SEA. Também não foi levada em consideração, para a análise em SEA, a guia onde é colocado o vidro na porta, por não apresentar uma significativa troca de energia para aquela região e se tratar de um componente muito rígido.

Diante das coordenadas do desenho da porta, objeto de estudo, foi feita a construção do modelo através dos critérios acima citados. Desta forma o modelo em SEA da porta foi constituído por cinco subsistemas estruturais, descritos na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 – Subsistemas estruturais porta

Subsistemas	Espessura [mm]	Área [m ²]
1-Painel externo	0,8	0,680
2-Fechadura	0,8	0,052
3-Fundo	0,8	0,091
4-Ossatura interna	0,8	0,550
5-Dobradiças	0,8	0,061

Como resultado desta etapa de estudo, será mostrada a seguir a porta, constituída pelos seus subsistemas estruturais, onde serão executados os testes. A Fig. 4.16 ilustra bem esta etapa.

⁵ Flangeatura consiste em executar a dobradura da placa do painel externo com ossatura. O processo ocorre em dobrar a placa em duas etapas: a primeira dobra-se a placa até formar um ângulo de 45° e em seguida, dobra-se a placa até 90° finalizando todo o processo de flangeatura da porta.

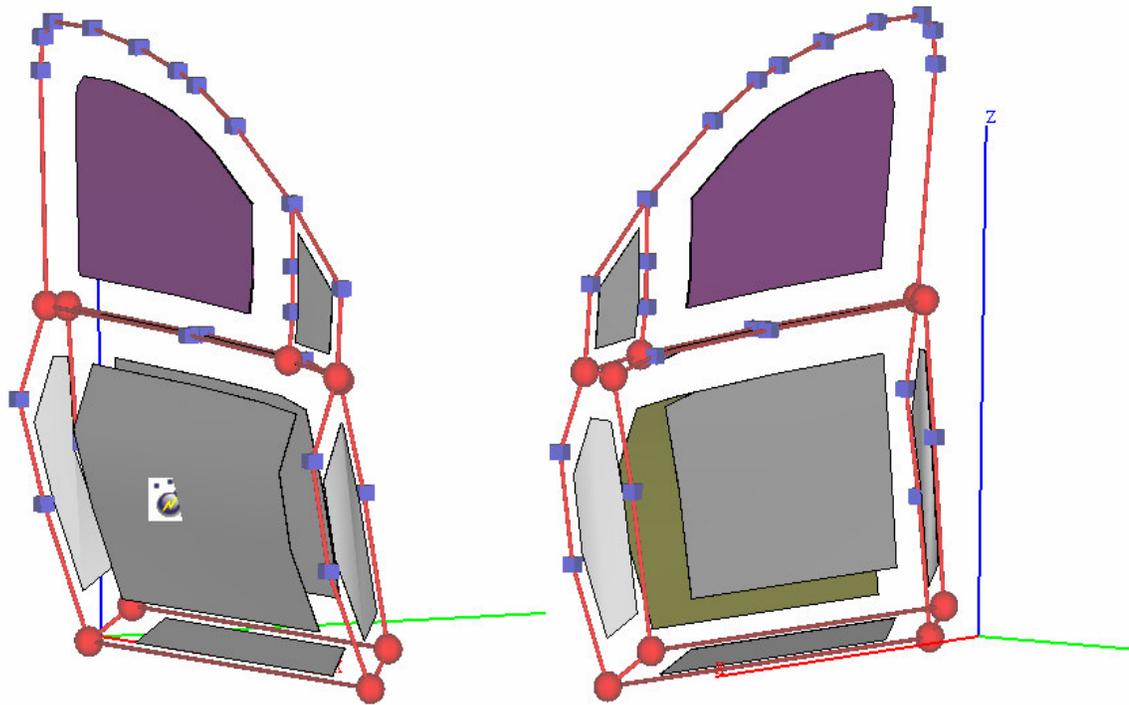


Figura 4.16 - Representação da porta em SEA

Observa-se na figura anterior que os subsistemas da porta foram construídos de forma a simplificar sua construção, pois se trata de forma muito complexa de modelamento via software. Observa-se também que o painel externo da porta (subsistema 1) foi modelado conforme concepção original da mesma considerando-se a curvatura da porta, dimensional e somente desconsiderando-se o diâmetro onde é colocado o segredo da chave.

Para os demais subsistemas da porta (subsistemas 2, subsistema 3 e subsistema 5) todos foram considerados como placa plana, pois possuem geometrias complexas e bem como altos e baixos relevos em sua estrutura, sendo muito difícil sua representação via software.

Outra particularidade na modelagem da porta foi especialmente em relação à ossatura (subsistema 4) por possuir variadas furações, altos e baixos relevos em sua estrutura, na qual foi levado em conta seu dimensional e considerando a tratativa de placa plana sem conter nenhum relevo e nenhuma furação, isto é, totalmente lisa.

4.3.3 – Junção dos Subsistemas em SEA

Depois de definidos os subsistemas e construído o modelo, o passo a seguir é a junção de todos os subsistemas da porta, constituindo o modelo em SEA a ser estudado através da simulação computacional. A Fig. 4.17 mostra a porta com algumas de suas junções entre subsistemas.

O software AutoSea2 dispõe de recursos próprios para fazer essas junções, bastando para isso que todos os subsistemas estejam construídos e o mesmo executa estas junções automaticamente através de uma função denominada *'junctions'*, na qual se dá o perfeito acoplamento entre os pontos de cada subsistema do modelo construído.

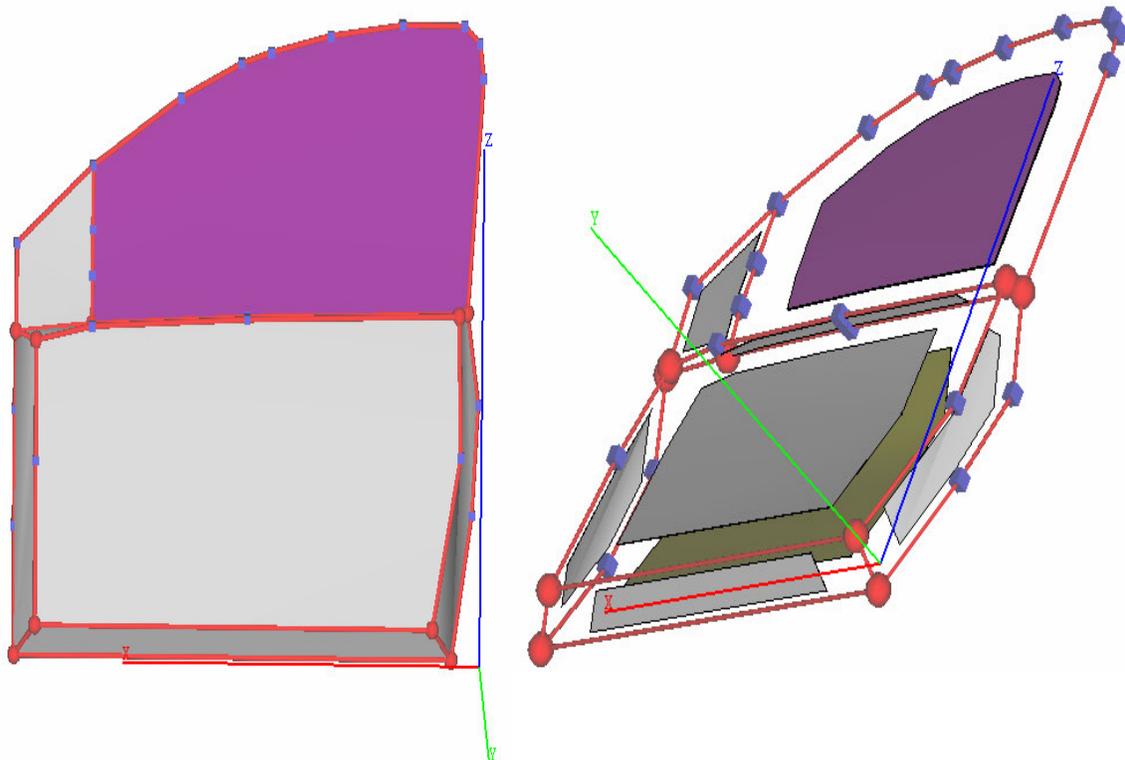


Figura 4.17 – Junções dos subsistemas da porta em SEA

Outra consideração importante é o fator de acoplamento da porta, na qual não foi executado nenhum tipo de cálculo entre os subsistemas, portanto este fator ficou a cargo do software AutoSea2[®] que calculou estes fatores de acoplamento automaticamente durante a simulação numérica.

4.3.4 – Cálculo do fator de amortecimento para estrutura metálica

Nesta etapa deparou-se com uma dificuldade de se calcular o amortecimento estrutural para estruturas metálicas unidas por meio de cordões de soldas, por meios de pontos de soldas ou peças inteiras estampadas por prensas de grande porte. Devido a esta impossibilidade de ser mensurado estes valores, passou-se então a considerar o amortecimento dos demais subsistemas através seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{0,1}{\sqrt{f}} \quad (4.1)$$

onde :

f é a freqüências central de cada banda de análise [Hz].

Diante desta formulação calculou-se todos os fatores de amortecimento em estruturas metálicas como a porta que será apresentada a seguir na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores de amortecimento na estrutura metálica da porta

Freqüências [Hz]	Amortecimento [η]
100	0,0100
125	0,0090
160	0,0079
200	0,0071
250	0,0063
315	0,0056
400	0,0050
500	0,0045
630	0,0040
800	0,0035
1000	0,0032
1250	0,0028
1600	0,0025
2000	0,0023
2500	0,0020
3150	0,0018
4000	0,0016
5000	0,0014

Os valores da coluna do amortecimento serviram como ‘*input*’ para o AutoSea2[®], pois cada subsistema da porta, exceto o painel, foram alimentados com os valores da tabela acima para simulação computacional com e sem amortecedor (insonorizante). Para cada faixa de frequência há um valor correspondente os quais, durante a simulação, foram denominados como se em cada placa do subsistema ocorresse apenas a flexão.

4.3.5 – Definição de Materiais em SEA

Para as definições das propriedades dos materiais utilizados no experimento, essencialmente foram considerados dois materiais que são a placa de aço e o amortecedor (insonorizante).

No caso dos amortecedores (insonorizantes), foram obtidos a partir da especificação do fornecedor, conforme mencionado no capítulo II, onde são descritas todas as especificações técnicas referentes aos amortecedores como densidade [ρ], módulo de elasticidade [E], coeficiente de Poisson [ν] e classificação e codificação dos amortecedores.

Para as placa de aço, adotou-se as propriedades que estão inseridas no próprio software fornecendo as seguintes características como a densidade [ρ], módulo de elasticidade [E], coeficiente de Poisson [ν]. Uma condição diferenciada em relação à placa de aço é o fornecimento da espessura da placa de aço utilizada na simulação computacional via software AutoSea2[®].

Todas essas configurações fizeram parte de todas as simulações que foram executadas no software para com e sem amortecedor (insonorizante).

CAPÍTULO V

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 - Introdução

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através da simulação computacional realizada no software AutoSea2. Assim como, também serão apresentados os parâmetros de cálculos que foram utilizados na simulação computacional.

Este capítulo também consiste em fazer uma comparação entre as energias de cada subsistema da porta através dos métodos experimentais (potência de entrada) e numéricos (AutoSea2), fazendo as análises através de gráficos, para validação do modelo computacional desenvolvido no AutoSea2®.

5.2 – Obtenção dos Resultados

5.2.1 – Dados para a Potência de Entrada

No capítulo IV foi apresentado o procedimento de montagem do experimento do método de potência de entrada, bem como a definição dos pontos de excitação através do *shaker*, de onde seriam obtidos os valores da potência de entrada média para a porta com amortecedor e sem amortecedor (insonorizantes). Outro procedimento foi a definição dos pontos onde seria posicionado o acelerômetro Tipo 352B10 para a obtenção dos valores das velocidades em cada ponto dos subsistemas da porta.

Diante do experimento já montado e o *Pulse* configurado para a obtenção das leituras do espectro de força e da mobilidade, que resultaria em um produto do módulo (valores absolutos) da força ao quadrado multiplicado pela parte real da mobilidade complexo-conjugada, obtendo-se assim em uma potência de entrada para cada ponto de excitação da porta no painel externo (subsistema 1). Do mesmo modo se obteve os valores das velocidades em cada subsistema da porta através do deslocamento do acelerômetro para os quatro pontos já estabelecidos na mesma, em cada um dos cinco subsistemas contidos na porta.

O espectro da força obtido através do *Pulse* tem características próprias, por se tratar

de um arquivo que contém apenas três colunas, sendo que a primeira é de ordenação, a segunda é das frequências de 0 a 6400 [Hz] e a terceira mostra os valores da magnitude da força. Também apresenta em seu arquivo qual é o sinal de referência, transdutor de força e a unidade de leitura, [N] como também sua frequência central.

Da mesma forma a mobilidade, que é obtida através do *Pulse*, apresenta como característica particular em seu arquivo quatro colunas, sendo que a primeira é de ordenação, a segunda contém as frequências de 0 a 6400 [Hz] e a terceira e quarta colunas mostram respectivamente as partes reais e imaginárias da mobilidade, além de apresentar em seu arquivo qual é o sinal de referência, transdutor de força e acelerômetro, qual é a unidade de leitura, [m/s] e sua frequência central.

Diante da apresentação dos arquivos do *Pulse* foram obtidos valores de todos os pontos de excitação com seu espectro de força e os valores da mobilidade dos subsistemas com os pontos já estabelecidos na porta.

Buscando acelerar os cálculos da potência de entrada e das velocidades foi criado um programa em *Matlab* para que pudessem ser calculados com precisão e rapidez estes valores, poupando assim tempo e erros durante a etapa de cálculos matemáticos. Este programa em *Matlab* necessitava das frequências inferiores, centrais e superiores da banda de um-terço de oitava para que se pudesse executar o programa e obter as respostas necessárias ao presente trabalho. A seguir é mostrada a tabela 1 com os valores das faixas de frequências que foram utilizadas no programa *Matlab*.

Tabela 5.1 – Frequências inferiores, centrais e superiores das bandas de 1/3 de oitava

Banda de 1/3 oitava Hz		
Frequências Inferiores	Frequências Centrais	Frequências Superiores
89	100	112
1132	125	141
1421	160	177
178	200	223
224	250	281
282	315	354
355	400	446
447	500	562
563	630	707
708	800	891
892	1000	1122
1123	1250	1413
1414	1600	1778
1779	2000	2239

Tabela 5.1 – Freqüências inferiores, centrais e superiores das bandas de 1/3 de oitava (cont.)

Banda de 1/3 oitava Hz		
Freqüências Inferiores	Freqüências Centrais	Freqüências Superiores
2240	2500	2818
2819	3150	3548
3549	4000	4467
4468	5000	5623

Apesar de que durante todo o experimento no método de decaimento executado na placa plana e na porta para a obtenção dos gráficos de amortecimento (η) para os amortecedores de diferentes espessuras, se trabalhou em uma faixa de freqüências compreendendo 100 Hz a 10000 Hz para compreender melhor o comportamento da placa plana e da porta. Mas durante o experimento do método de potência de entrada detectou-se que ao ultrapassar a faixa de freqüências de 5000 Hz os valores correspondentes as faixas de freqüências de 6300 Hz, 8000 Hz e 10000 Hz constituíam valores muito baixos (negativos), que não foram incluídos nas tabelas de cálculos tanto para a potência de entrada média e tanto para os cálculos da energia de cada subsistema.

O programa foi elaborado para a obtenção, em um único arquivo, de duas colunas, onde a primeira mostrasse as freqüências centrais da banda de um-terço de oitava e a segunda coluna mostrasse apenas os valores correspondentes da potência de entrada.

Será apresentado a seguir o programa elaborado em *Matlab* para que pudessem ser calculados os valores da potência de entrada para cada ponto de excitação com amortecedor e sem amortecedor (insonorizantes). O programa este elaborado durante a fase do experimento prático com a porta do modelo Palio que consiste em multiplicar o espectro da força elevado ao quadrado pela mobilidade resultando assim na potência de entrada.

Será apresentado a seguir o programa em *Matlab*.

```

“ load c:\temp\espfo.txt
  load c:\temp\mobil.txt
  [n,m]=size(espfo);
  for i=1:n
    aux(i)=espfo(i,3)*mobil(i,3);
  end
  [nto,mto]=size(tercas);
  for j=1:nto

```

```

potentto(j,1)=tercas(j,1);
potentto(j,2)=0;
for i=tercas(j,2)+1,tercas(j,3)+1
    potentto(j,2)=potentto(j,2)+aux(i);
end
end. ”
    
```

No programa acima os arquivos “espfo.txt” e “mobil” contém espectro da força (três colunas) e a mobilidade (quatro colunas) como descrito acima. A variável “tercas (n,3)” contém as frequências inferiores, médias e superiores das bandas de um-terço de oitava.

Diante os dados obtidos através do programa acima descrito, se conseguiu chegar em um valor médio da potência de entrada com amortecedor e sem amortecedor (insonorizantes) para a porta do modelo Palio. Desta forma, será apresentada a seguir a tab. 5.2, dos valores obtidos através dos cálculos em *Matlab* resultando assim na potência de entrada média no subsistema 1 (painel externo) com amortecedor. Logo em seguida, a Fig. 5.1, se verifica o comportamento do gráfico para a potência de entrada com amortecedor.

Tabela 5.2 – Potência de entrada com amortecedor para banda de 1/3 de oitava

Frequência Central	P1 Com Amortecedor	P2 Com Amortecedor	P3 Com Amortecedor	Média
100	7,245255446960000E-07	6,104438854000000E-07	2,609186868000000E-07	5,31962706E-07
125	4,888220975480000E-06	3,405422807740000E-06	9,633535970000000E-07	3,08566579E-06
160	2,734863859860000E-06	1,758351255500000E-06	3,799715360500000E-07	1,62439555E-06
200	6,036798229600000E-06	6,100071669200000E-06	1,562175679600000E-06	4,56634853E-06
250	5,601922793730000E-06	5,442637778900000E-06	5,806870831500000E-07	3,87508255E-06
315	1,468071727090000E-06	8,296914150999990E-07	1,477171383160000E-06	1,25831151E-06
400	7,905420710400000E-07	1,057877497199990E-06	1,870833253950000E-07	6,78500965E-07
500	2,274668395300000E-06	1,352446768452000E-06	2,750778307680000E-07	1,30073100E-06
630	4,710139980000000E-07	8,234104971999990E-07	5,876409459500000E-07	6,27355147E-07
800	6,617828330999990E-07	2,088858975500000E-07	1,843009580720000E-07	3,51656563E-07
1000	1,225604691960000E-07	1,093205400640000E-07	1,215835111400000E-07	1,17821507E-07
1250	1,448048010580000E-07	2,166067682000000E-07	2,115816518560000E-08	1,27523245E-07
1600	7,291078445000000E-08	9,967954268000000E-07	1,085746753350000E-07	3,92760296E-07
2000	5,242285857000000E-07	2,905259586500000E-09	9,863446944000000E-08	2,08589438E-07
2500	-9,908784236999990E-11	-8,076442523400000E-12	9,019855246000000E-09	2,97089699E-09
3150	3,304670590000000E-08	-1,631699121600000E-09	2,298741643320000E-08	1,81341411E-08
4000	1,651164544890000E-09	2,075605317000000E-08	2,375219316390000E-10	7,54824655E-09
5000	1,474559341788000E-09	-1,872459654210000E-09	-2,483029613130000E-12	-1,33461114E-10

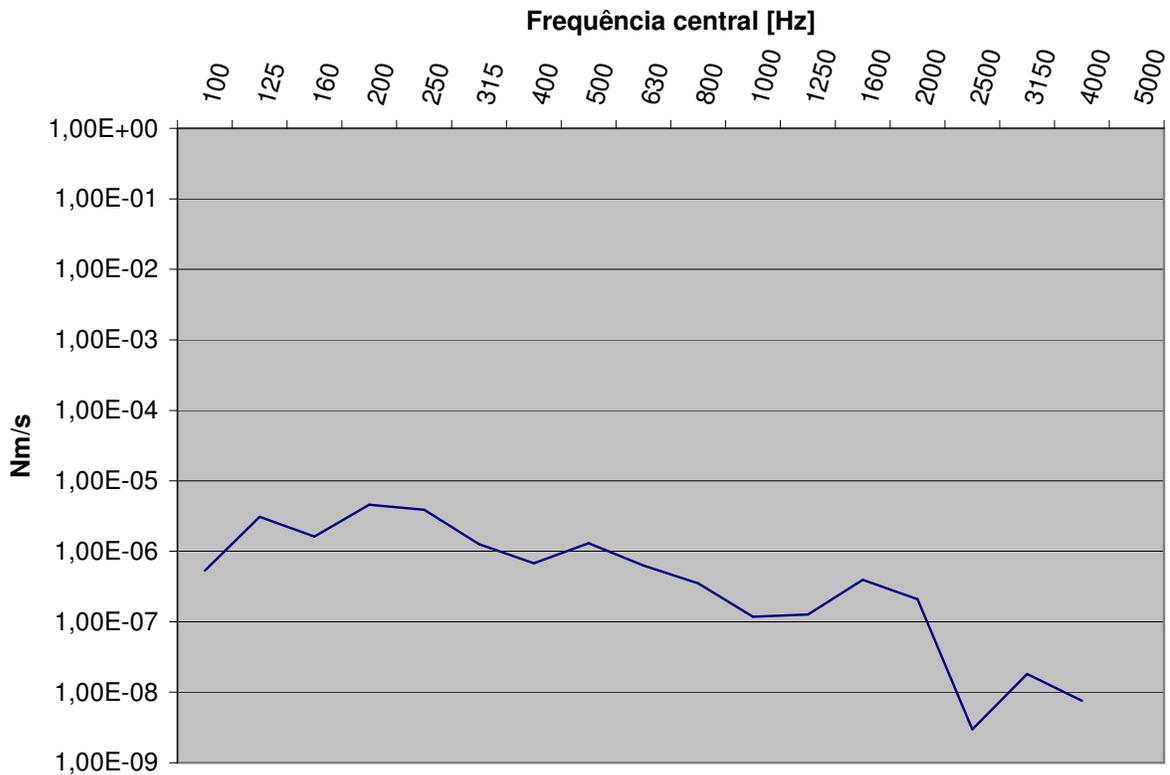


Figura 5.1 - Potência de entrada média com Amortecedor

Analisando o gráfico da potência de entrada com o amortecedor, que foi confeccionado através dos valores médios para a potência de entrada e os valores de sua frequências central e se verifica que a parte mais significativa do gráfico da potência de entrada está relacionada com a potência que foi transmitida para subsistema 1 nos pontos de excitação em baixas frequências até a frequência de 630 Hz. Contudo em altas frequência não se tem um comportamento muito bom em relação à curva plotada, pois os valores se aproximam muito de zero.

De maneira similar, foram obtidos os valores da potência de entrada sem amortecedor (insonorizante), que será apresentada a seguir a tab. 5.3 com os valores obtidos através dos cálculos em *Matlab*.

Tabela 5.3 – Potência de entrada sem amortecedor para banda de 1/3 de oitava

Frequência Central	P1 Sem Amortecedor	P2 Sem Amortecedor	P3 Sem Amortecedor	Média
100	4,087095259600000E-07	2,783662698080000E-07	2,257896576000000E-07	3,04288484E-07
125	3,238362726400000E-06	1,248960325710000E-06	2,645189830230000E-07	1,58394735E-06
160	2,934939047040000E-06	5,580230760900000E-07	2,471248388600000E-07	1,24669565E-06
200	8,087970001000000E-07	2,502481377150000E-06	7,280427958200000E-07	1,34644039E-06
250	1,225200591540000E-06	1,439111266080000E-06	3,149538947400000E-07	9,93088584E-07
315	1,008069690240000E-06	4,693613761200000E-07	1,139616551750000E-06	8,72349206E-07
400	9,236536922400000E-07	1,199703772800000E-06	2,419249846860000E-07	7,88427483E-07
500	1,435166308030000E-06	-2,273876508400000E-07	2,018026621030000E-07	4,69860440E-07
630	3,568392665850000E-07	5,310423726399990E-07	1,006026213220000E-06	6,31302617E-07
800	5,727912306030000E-07	7,922887642500000E-08	6,230890011000000E-09	2,19416999E-07
1000	1,021480596500000E-08	7,773008329700000E-08	9,759998150800000E-08	6,18482903E-08
1250	2,048525566950000E-08	9,806524442000000E-08	6,015114760700000E-08	5,95672159E-08
1600	-5,212046217600000E-09	2,523710245120000E-07	7,103148127440000E-08	1,06063487E-07
2000	5,321316560100000E-08	1,360562967000000E-09	2,969151656960000E-07	1,17162965E-07
2500	6,578192008200000E-10	-1,521140312090000E-11	1,479142992600000E-09	7,07250263E-10
3150	1,145085184000000E-07	-7,272657079200000E-10	-4,620527653100000E-08	2,25253254E-08
4000	-2,105863935000000E-09	2,191605226710000E-09	-2,597943778380000E-11	1,99206180E-11
5000	2,267182008190000E-10	-1,119720911360000E-09	-5,101630300000000E-10	-4,67721914E-10

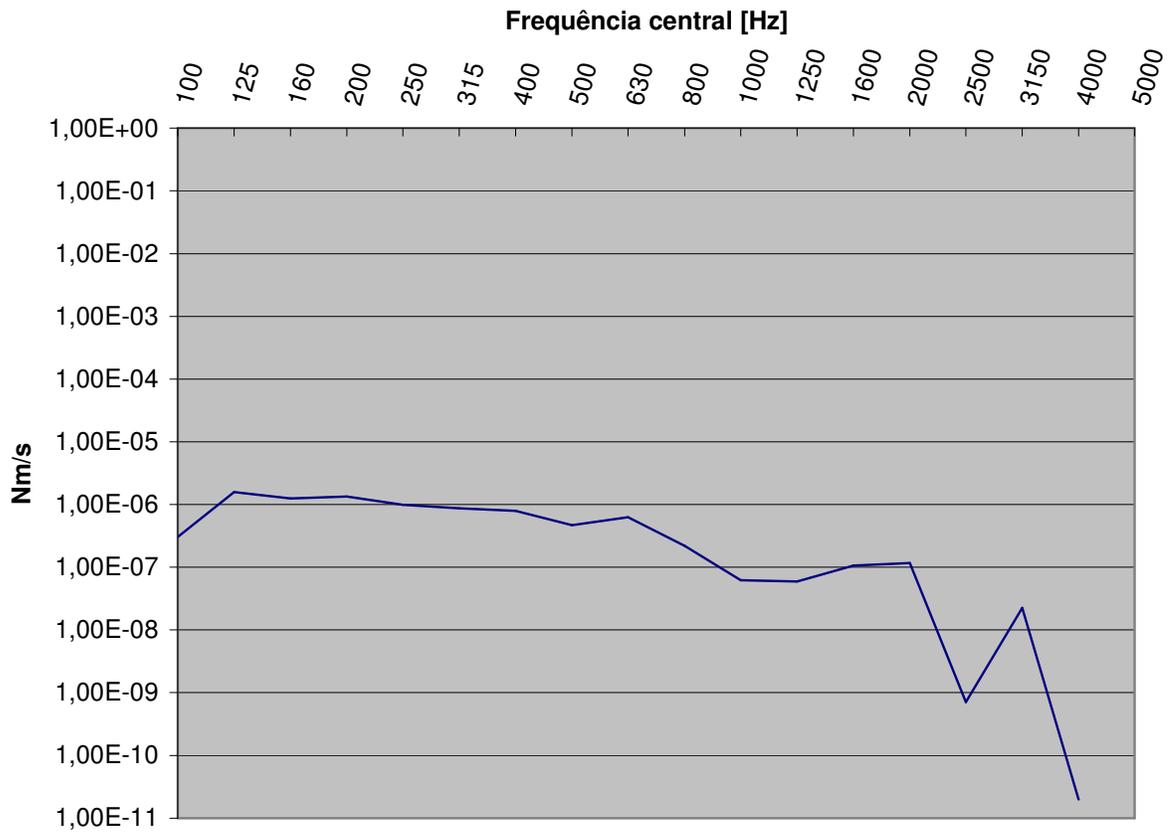


Figura 5.2 – Potência de entrada média sem amortecedor

Da mesma maneira, foi confeccionado um gráfico da potência de entrada sem amortecedor (ver Fig. 5.2) que foi confeccionado através dos valores médios para a potência de entrada e os valores de sua frequência central, onde também se verifica o mesmo comportamento para a parte mais significativa em relação à potência de entrada que está relacionada com a potência que foi transmitida ao subsistema 1 nos pontos de excitação em baixas frequências até a frequência de 630 Hz.

Analisando-se as médias de potências de entrada na porta, nota-se um aumento significativo para a potência com amortecedor, devido ao fato da dissipação de energia pelo amortecimento na porta. De forma similar, chega-se à conclusão de que a porta sem o amortecimento não oferece muita resistência a excitação gerada pelo *shaker*, ou seja, as forças aplicadas ao conjunto são baixas e, em conseqüência, as potências de entrada também são baixas.

Depois de todos os cálculos feitos e gerados os gráficos com o comportamento das potências de entrada, ainda há a necessidade de se utilizar os valores das potências de entrada com amortecedor e sem amortecedor (insonorizante), para que se possa fazer a simulação computacional do modelo no software AutoSea2.

5.2.2 – Dados para o cálculo da Energia Cinética

Depois de calculadas as potências de entrada médias para cada banda de um terço de oitava, passou-se então aos cálculos da energia cinética média dos subsistemas da porta do modelo Palio.

Utilizando se ainda do experimento montado e o software *Pulse* configurado, passou-se então para a obtenção das velocidades médias em cada subsistema da porta com os pontos já definidos anteriormente. A obtenção dos valores ocorreu com o deslocamento do acelerômetro a cada ponto do subsistema mantendo a mesma excitação do *shaker* e na mesma posição, obtendo-se assim, vinte leituras diferentes de velocidades para cada banda de um terço de oitava. Conseqüentemente, foram obtidas sessenta leituras diferentes para cada banda de um-terço de oitava, por se tratar de três pontos de excitação do *shaker*. Será apresentada a seguir a tabela 5.4 com os valores obtidos para as velocidades nas três posições do shaker.

Tabela 5.4 - Valores das velocidades para o subsistema 1 com amortecedor

Velocidade 1- CA (Posição 1 do shaker)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
100	3,96E-07	1,39E-06	9,42E-08	1,59E-07	3,20E-08	2,22E-08	1,24E-08	1,05E-08	3,87E-08	9,14E-09	1,62E-08	1,96E-08	7,15E-07	4,17E-08	3,08E-06	2,09E-06	1,89E-08	2,43E-08	8,80E-09	3,08E-09
125	2,13E-06	5,83E-06	7,19E-07	2,01E-07	5,59E-09	7,06E-09	6,92E-09	1,15E-09	1,22E-08	3,31E-08	1,34E-07	7,40E-09	2,75E-07	1,16E-07	5,63E-07	3,57E-08	5,96E-09	7,77E-09	4,11E-09	1,82E-09
160	2,75E-07	7,75E-07	1,55E-06	4,75E-08	5,46E-09	5,82E-09	1,58E-09	2,49E-10	2,70E-09	1,51E-08	2,27E-08	2,09E-09	3,57E-08	1,00E-07	2,35E-08	2,21E-06	2,28E-09	1,83E-09	5,16E-09	2,49E-09
200	2,57E-07	2,51E-06	3,89E-07	1,49E-07	1,63E-09	1,28E-08	8,37E-09	2,17E-09	7,81E-09	2,70E-08	2,62E-08	3,17E-09	1,40E-07	7,46E-08	1,58E-07	3,95E-06	1,93E-09	6,49E-10	5,29E-09	2,14E-09
250	6,28E-07	2,76E-06	6,50E-08	4,53E-07	4,29E-09	6,92E-09	9,95E-09	6,98E-09	2,37E-08	8,17E-08	9,01E-08	7,13E-09	1,11E-07	2,45E-07	9,67E-07	4,60E-07	3,39E-09	2,15E-09	2,66E-08	5,14E-09
315	1,96E-07	2,22E-06	1,94E-07	2,23E-07	5,36E-09	1,83E-08	3,52E-08	9,30E-09	5,47E-09	1,25E-07	4,76E-07	5,91E-09	1,00E-07	1,29E-07	1,49E-06	1,43E-07	3,28E-09	3,46E-09	1,55E-08	2,45E-09
400	7,46E-07	1,55E-06	1,44E-07	9,34E-08	3,88E-09	1,11E-07	7,89E-08	4,33E-09	6,72E-09	1,23E-07	8,71E-07	6,11E-09	2,09E-07	6,10E-07	2,80E-07	5,93E-08	8,72E-09	1,81E-09	1,32E-08	3,05E-09
500	3,36E-07	5,36E-07	1,44E-07	6,54E-08	7,17E-09	9,51E-08	3,34E-07	1,14E-08	6,53E-09	5,66E-08	1,32E-07	2,60E-09	3,94E-08	8,70E-08	2,90E-07	2,83E-08	5,62E-09	1,94E-09	2,40E-08	2,66E-09
630	9,35E-08	2,96E-07	1,14E-07	1,52E-07	5,52E-09	2,36E-08	9,97E-08	1,33E-09	6,87E-09	1,34E-08	2,86E-08	3,11E-08	8,60E-09	3,35E-08	4,47E-08	4,43E-08	1,09E-08	1,77E-09	6,71E-08	2,81E-09
800	1,71E-07	2,31E-07	1,92E-07	1,45E-07	5,18E-07	1,32E-07	1,75E-08	3,08E-09	1,75E-08	5,14E-08	9,42E-08	1,09E-07	1,13E-08	8,96E-08	1,32E-07	1,10E-07	8,56E-09	1,99E-09	2,12E-08	7,10E-09
1000	1,52E-07	2,45E-07	6,22E-08	6,23E-08	3,62E-08	2,75E-08	4,77E-08	1,35E-08	9,23E-09	2,43E-08	1,83E-08	9,98E-08	7,71E-09	5,76E-08	1,77E-08	6,25E-08	8,55E-09	4,25E-10	2,11E-08	4,68E-09
1250	7,72E-08	2,22E-07	6,96E-08	1,14E-07	4,53E-08	8,91E-08	1,60E-07	4,22E-08	1,63E-08	2,98E-08	2,56E-08	9,38E-08	1,57E-08	6,14E-08	3,30E-08	5,94E-08	3,55E-08	5,43E-10	3,72E-08	1,27E-08
1600	2,01E-07	2,77E-07	3,55E-07	1,72E-07	2,21E-07	1,05E-07	3,54E-07	2,10E-07	8,01E-08	8,29E-08	3,07E-08	1,60E-07	1,12E-07	1,16E-07	1,66E-07	1,25E-07	1,28E-08	9,87E-10	1,48E-08	8,15E-09
2000	2,56E-08	8,59E-08	1,42E-07	2,55E-08	8,57E-08	1,26E-08	8,72E-08	8,68E-08	2,06E-08	1,07E-08	1,45E-08	5,74E-08	6,29E-08	3,39E-08	5,56E-08	1,05E-07	1,27E-08	3,39E-10	1,43E-08	2,02E-09
2500	1,15E-08	1,89E-08	6,81E-08	1,20E-08	6,84E-09	1,30E-08	1,25E-08	2,96E-08	1,22E-08	3,18E-08	6,40E-09	1,57E-08	7,81E-09	5,96E-09	5,01E-09	5,94E-09	1,92E-10	1,92E-09	4,57E-09	5,75E-09
3150	3,29E-08	8,29E-08	2,27E-07	5,31E-08	3,97E-08	4,67E-08	5,41E-08	9,61E-08	1,29E-07	4,22E-08	6,17E-08	5,05E-08	5,11E-08	3,62E-08	2,55E-08	2,43E-08	1,16E-08	1,72E-09	3,40E-09	3,28E-08
4000	8,04E-10	1,90E-09	3,66E-09	2,44E-09	2,80E-09	5,57E-09	1,22E-09	2,05E-09	2,22E-09	1,08E-09	1,34E-09	1,65E-09	8,31E-10	3,79E-10	2,32E-09	7,92E-10	1,12E-09	2,74E-11	5,18E-10	1,41E-09
5000	1,09E-10	2,29E-10	5,09E-10	1,71E-10	1,51E-10	2,41E-10	2,27E-10	1,91E-10	1,47E-10	1,03E-10	9,90E-11	4,84E-11	6,74E-11	3,43E-11	8,49E-11	3,23E-11	3,60E-11	1,70E-12	1,26E-11	1,01E-10

Velocidade 2- CA (Posição 2 do shaker)

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
100	3,13E-07	2,55E-06	5,56E-06	1,43E-07	9,04E-08	6,96E-08	2,78E-08	5,31E-09	3,14E-08	4,91E-08	5,51E-08	5,79E-08	3,56E-07	1,12E-08	6,57E-07	8,44E-07	2,82E-08	3,33E-08	1,12E-08	5,72E-09
125	5,06E-07	5,62E-06	7,20E-07	1,59E-07	1,85E-09	2,01E-08	1,32E-08	2,01E-09	8,09E-09	1,05E-07	8,40E-08	1,82E-08	1,53E-07	5,43E-08	2,24E-07	1,02E-06	7,59E-09	1,20E-09	7,47E-09	2,66E-09
160	2,84E-07	3,89E-06	2,78E-06	1,26E-07	4,91E-08	9,03E-08	1,69E-08	5,86E-10	8,39E-09	9,12E-08	7,37E-08	9,26E-09	7,10E-08	1,12E-07	3,12E-08	4,39E-08	9,10E-09	8,09E-09	2,44E-08	1,12E-08
200	2,10E-07	4,59E-06	2,58E-07	9,33E-08	7,17E-09	8,36E-08	1,80E-08	6,43E-10	8,21E-09	8,44E-08	2,00E-07	2,16E-08	6,28E-07	4,60E-08	7,49E-08	2,78E-06	3,61E-09	1,01E-09	8,43E-09	2,51E-09
250	6,86E-07	4,26E-06	1,91E-07	3,99E-07	1,15E-08	5,99E-08	5,57E-08	5,27E-09	4,69E-08	1,85E-07	4,46E-07	1,49E-08	1,14E-07	2,06E-07	2,45E-07	1,78E-07	3,19E-08	1,18E-09	5,89E-08	1,76E-08
315	1,66E-07	2,12E-06	3,45E-07	1,80E-07	3,16E-08	4,61E-08	2,32E-07	9,75E-09	6,51E-09	4,55E-07	1,54E-06	1,42E-08	3,91E-08	1,86E-07	1,39E-06	1,04E-07	6,95E-09	5,82E-09	2,88E-08	6,84E-09
400	4,99E-07	7,82E-07	7,11E-07	2,81E-07	2,10E-08	2,64E-07	3,49E-07	7,50E-09	1,81E-08	1,24E-06	3,86E-06	1,25E-07	1,61E-07	7,89E-07	5,88E-07	5,77E-08	3,18E-08	1,12E-08	5,72E-08	1,49E-08
500	1,92E-07	9,16E-07	2,89E-07	1,94E-07	5,46E-08	3,69E-07	1,55E-06	1,54E-08	2,96E-08	3,54E-07	7,23E-07	1,96E-07	3,81E-08	8,05E-07	3,41E-07	4,20E-08	6,53E-08	1,16E-08	1,56E-07	1,27E-08
630	1,06E-07	3,41E-07	2,46E-07	2,46E-07	2,18E-07	1,29E-07	1,02E-06	3,68E-08	1,64E-08	1,93E-07	3,19E-07	5,49E-07	1,49E-08	9,75E-08	6,30E-07	8,22E-08	6,28E-07	1,43E-08	3,64E-07	3,63E-08
800	2,12E-07	4,23E-07	2,49E-07	1,51E-07	1,37E-06	4,57E-07	1,20E-07	3,89E-09	3,46E-08	3,62E-07	1,99E-07	5,14E-07	6,20E-09	5,78E-08	1,28E-07	9,92E-08	2,56E-08	4,71E-09	6,63E-08	2,48E-08
1000	1,29E-07	2,75E-07	1,07E-07	1,34E-07	2,28E-07	1,47E-07	7,61E-07	4,54E-08	3,21E-08	3,28E-07	1,76E-07	6,01E-07	1,11E-08	8,45E-08	2,44E-08	1,68E-07	5,39E-08	2,82E-09	1,46E-07	3,75E-08
1250	5,29E-07	2,59E-07	2,50E-07	3,90E-07	6,62E-07	9,34E-07	1,87E-06	1,60E-07	1,26E-07	1,04E-06	4,06E-07	1,01E-06	2,94E-08	1,27E-07	4,56E-08	1,04E-07	1,96E-07	6,19E-09	3,20E-07	1,11E-07
1600	2,01E-07	1,38E-07	1,40E-07	2,14E-07	2,28E-07	6,02E-07	1,85E-07	2,20E-08	1,02E-07	4,24E-07	2,02E-07	2,59E-07	5,59E-08	7,46E-08	3,34E-08	4,49E-08	5,07E-08	5,16E-09	1,37E-07	2,79E-08
2000	1,77E-09	6,29E-09	3,46E-09	1,31E-09	7,21E-09	3,52E-09	5,84E-09	1,27E-09	1,45E-09	9,24E-09	2,72E-09	8,81E-09	3,75E-09	1,43E-09	1,33E-09	2,81E-09	2,66E-09	4,48E-11	3,46E-09	6,20E-10
2500	2,37E-10	6,36E-10	8,28E-10	3,14E-10	6,67E-10	2,56E-09	3,32E-09	4,94E-10	6,83E-10	1,76E-09	4,89E-10	2,00E-09	2,59E-10	3,05E-10	2,11E-10	2,40E-10	8,88E-10	3,12E-11	6,86E-10	1,17E-09
3150	3,25E-09	6,75E-09	1,98E-08	2,63E-09	3,78E-08	4,42E-08	1,71E-08	3,79E-09	1,17E-08	1,82E-08	1,03E-08	1,40E-08	3,97E-09	1,71E-09	5,80E-09	2,24E-09	1,09E-07	2,27E-09	6,30E-09	1,13E-07
4000	3,86E-08	9,12E-08	3,59E-07	2,17E-08	3,48E-07	4,96E-07	4,74E-08	1,28E-08	9,28E-08	1,08E-07	6,30E-08	1,84E-07	1,22E-08	6,86E-09	4,83E-08	2,16E-08	2,19E-07	7,20E-09	3,28E-08	3,05E-07
5000	3,86E-10	1,17E-09	3,28E-09	3,29E-10	1,86E-09	2,17E-09	1,27E-09	3,40E-10	1,07E-09	1,51E-09	1,19E-09	1,13E-09	9,15E-11	6,94E-11	2,67E-10	1,19E-10	4,79E-10	3,71E-11	2,04E-10	1,27E-09

Velocidade 3- CA (Posição 3 do shaker)

	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
100	3,55E-07	7,62E-07	6,04E-08	9,86E-08	8,72E-09	2,08E-08	1,19E-08	1,59E-09	5,71E-09	6,43E-09	1,26E-08	3,89E-09	3,58E-07	8,40E-09	3,64E-07	4,31E-07	4,38E-09	2,87E-09	1,88E-09	3,11E-09
125	1,77E-06	9,73E-07	5,54E-07	1,61E-07	7,29E-09	4,88E-09	1,59E-09	7,42E-10	6,15E-09	8,78E-09	2,91E-08	1,02E-09	3,10E-08	1,23E-08	2,77E-08	3,50E-07	1,12E-09	1,20E-09	1,27E-09	6,92E-10
160	1,26E-06	1,98E-06	3,46E-06	6,82E-07	2,34E-09	1,18E-08	3,26E-09	1,29E-09	4,13E-09	2,06E-08	1,07E-08	1,27E-09	2,95E-08	8,28E-08	7,76E-09	8,90E-07	8,89E-10	1,88E-09	5,45E-09	2,02E-09
200	1,17E-06	5,11E-06	7,34E-07	2,71E-07	6,50E-09	1,89E-08	1,91E-08	2,12E-09	3,25E-09	2,86E-08	6,03E-09	3,61E-09	6,68E-08	7,44E-08	9,24E-08	2,75E-06	7,41E-10	3,69E-10	2,42E-09	6,19E-10
250	2,17E-06	8,95E-07	3,99E-07	1,22E-06	1,46E-08	6,93E-08	6,43E-08	1,32E-08	2,42E-08	4,97E-08	7,04E-08	5,44E-09	1,35E-07	3,12E-07	1,64E-07	7,20E-09	2,01E-09	1,95E-09	1,96E-08	3,41E-09
315	1,26E-06	6,96E-07	5,68E-07	6,13E-07	1,17E-08	9,56E-08	3,25E-07	1,03E-07	6,40E-09	1,42E-07	6,71E-07	6,86E-09	2,20E-07	4,30E-08	3,17E-06	1,89E-09	1,89E-09	1,95E-09	1,08E-08	2,09E-09
400	1,73E-06	9,26E-07</																		

Tabela 5.5 - Valores das velocidades para o subsistema 1 sem amortecedor

Velocidade 1 - SA (Posição 1 do shaker)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
100	2,87E-07	9,25E-07	8,20E-08	1,19E-07	2,80E-08	1,41E-08	8,78E-09	1,02E-08	2,07E-08	2,08E-08	1,98E-08	1,54E-08	4,37E-07	2,19E-08	1,58E-06	1,33E-06	1,29E-08	1,79E-08	6,30E-09	6,30E-09
125	9,96E-07	4,16E-06	6,53E-07	1,07E-07	4,77E-09	1,92E-09	4,16E-09	2,02E-09	3,88E-09	5,05E-08	6,82E-08	4,37E-09	1,68E-07	5,04E-08	2,81E-07	2,16E-06	2,72E-09	4,74E-09	2,74E-09	2,74E-09
160	2,00E-07	6,22E-07	1,02E-06	6,02E-08	3,78E-09	4,29E-09	1,69E-09	2,01E-10	1,95E-09	1,03E-08	1,67E-08	1,34E-09	2,90E-08	6,00E-08	1,55E-08	1,64E-06	1,63E-09	1,65E-09	3,68E-09	3,68E-09
200	2,78E-07	4,29E-06	3,68E-07	1,31E-07	1,39E-09	5,45E-09	4,00E-09	1,10E-09	5,19E-09	1,86E-08	2,20E-08	4,44E-09	7,52E-08	5,97E-08	9,89E-08	2,93E-06	1,54E-09	6,19E-10	4,57E-09	4,57E-09
250	4,33E-07	3,71E-07	7,57E-08	4,85E-07	3,36E-09	7,30E-09	5,88E-09	6,21E-09	2,03E-08	7,09E-08	7,20E-08	6,67E-09	1,39E-07	1,37E-07	4,99E-07	3,56E-07	8,49E-09	3,87E-09	2,13E-08	2,13E-08
315	2,25E-07	3,80E-06	2,64E-07	3,96E-07	4,38E-09	9,57E-09	2,25E-08	1,36E-08	4,40E-09	1,88E-07	5,29E-07	6,90E-09	9,86E-08	1,14E-07	2,34E-06	1,36E-07	3,95E-09	3,41E-09	1,86E-08	1,86E-08
400	5,38E-07	2,10E-06	1,16E-07	5,88E-08	2,48E-09	4,00E-08	4,89E-08	5,89E-09	3,88E-09	1,08E-07	6,00E-07	5,04E-08	2,49E-07	8,87E-07	7,04E-07	5,62E-08	6,10E-09	1,19E-09	1,08E-08	1,08E-08
500	1,79E-07	8,83E-07	9,57E-08	4,95E-08	7,68E-09	6,27E-08	3,81E-08	2,34E-08	3,65E-09	5,09E-08	8,75E-08	3,05E-08	3,50E-08	1,13E-07	2,96E-07	4,21E-08	4,43E-09	1,91E-09	2,88E-08	2,88E-08
630	5,39E-08	3,83E-07	6,12E-08	1,44E-07	3,03E-09	1,29E-08	8,73E-08	1,38E-08	6,35E-09	1,83E-08	3,09E-08	3,79E-08	8,24E-09	3,87E-08	5,49E-08	2,76E-08	6,71E-09	2,34E-09	4,55E-08	4,55E-08
800	9,30E-08	2,94E-07	9,47E-08	1,31E-07	4,94E-07	7,97E-08	1,58E-08	3,74E-09	1,33E-08	5,49E-08	9,14E-08	8,75E-08	8,38E-09	5,95E-08	8,68E-08	4,58E-08	3,77E-09	1,41E-09	1,57E-08	1,57E-08
1000	1,19E-07	3,78E-07	4,64E-08	7,50E-08	3,79E-08	2,06E-08	6,81E-08	2,83E-08	5,90E-09	4,41E-08	1,92E-08	5,93E-08	8,79E-09	4,46E-08	2,09E-08	5,62E-08	1,04E-08	4,83E-10	1,73E-08	1,73E-08
1250	5,05E-08	2,59E-07	4,36E-08	6,40E-08	4,37E-08	5,15E-08	1,60E-07	7,52E-08	7,15E-09	3,89E-08	2,30E-08	3,51E-08	1,48E-08	5,54E-08	2,80E-08	5,73E-08	3,17E-08	4,49E-10	2,53E-08	2,53E-08
1600	5,98E-08	3,18E-07	8,65E-08	4,93E-08	6,63E-08	5,82E-08	8,47E-08	5,11E-08	3,89E-08	5,06E-08	2,11E-08	4,56E-08	5,25E-08	4,89E-08	4,99E-09	3,45E-08	7,30E-09	6,58E-10	1,64E-08	1,64E-08
2000	1,24E-07	4,55E-07	1,70E-07	3,61E-08	2,47E-07	2,26E-08	1,28E-07	1,96E-07	5,34E-08	1,20E-07	3,42E-08	7,11E-08	3,26E-07	1,09E-07	7,10E-08	6,26E-08	3,57E-08	8,36E-10	7,08E-08	7,08E-08
2500	3,58E-08	1,77E-07	2,74E-07	3,26E-08	5,12E-08	7,03E-08	6,35E-08	1,60E-07	3,78E-08	5,07E-08	1,09E-08	5,00E-08	3,48E-08	3,54E-08	2,68E-08	2,11E-08	2,21E-08	8,80E-10	1,33E-08	1,33E-08
3150	1,73E-08	6,02E-08	1,06E-07	1,81E-08	1,77E-08	1,68E-08	2,71E-08	4,84E-08	3,21E-08	2,16E-08	6,19E-09	1,90E-08	1,59E-08	1,35E-08	1,04E-08	7,87E-09	7,34E-09	5,85E-10	2,21E-09	2,21E-09
4000	5,46E-10	2,18E-09	3,66E-09	1,11E-09	1,56E-09	4,13E-09	6,78E-10	1,12E-09	1,23E-09	5,15E-10	6,36E-10	7,14E-10	5,21E-10	2,64E-10	1,05E-09	4,70E-10	1,05E-09	2,78E-11	3,72E-10	3,72E-10
5000	9,21E-11	4,80E-10	5,76E-10	1,35E-10	1,14E-10	1,94E-10	2,12E-10	1,18E-09	8,94E-11	5,69E-11	5,78E-11	5,22E-11	6,99E-11	4,94E-11	7,98E-11	5,72E-11	4,52E-11	1,61E-12	1,31E-11	1,31E-11

Velocidade 2 - SA (Posição 2 do shaker)

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
100	1,94E-07	1,36E-06	1,36E-06	8,06E-08	8,06E-08	8,06E-08	5,67E-09	4,19E-09	9,40E-09	9,88E-09	7,85E-08	6,72E-09	3,40E-07	7,02E-09	3,65E-07	8,74E-07	6,57E-09	8,42E-09	2,78E-09	1,65E-09
125	2,23E-07	4,80E-06	4,80E-06	8,37E-08	8,37E-08	8,37E-08	3,39E-09	1,81E-09	1,46E-09	1,92E-09	6,70E-09	3,81E-09	1,27E-07	3,87E-08	1,25E-07	1,48E-06	1,56E-09	2,81E-09	1,35E-09	5,57E-10
160	1,59E-07	3,78E-06	3,78E-06	9,03E-08	9,03E-08	9,03E-08	3,43E-09	5,84E-10	3,69E-09	2,00E-08	9,68E-09	2,06E-09	7,19E-08	1,29E-07	2,99E-08	4,06E-06	2,56E-09	2,83E-09	7,85E-09	3,56E-09
200	1,83E-07	6,46E-06	6,46E-06	9,08E-08	9,08E-08	9,08E-08	6,43E-09	1,12E-09	5,10E-09	2,59E-08	3,43E-08	6,00E-09	1,01E-07	8,79E-08	1,07E-07	3,07E-06	1,30E-09	3,77E-10	2,80E-09	1,00E-09
250	6,80E-07	4,92E-06	4,92E-06	2,50E-07	2,50E-07	2,50E-07	1,75E-08	5,65E-09	1,88E-08	4,70E-08	1,19E-07	4,71E-09	1,63E-07	4,36E-07	3,34E-07	3,93E-07	9,88E-09	5,14E-09	1,75E-08	5,67E-09
315	1,99E-07	2,25E-06	2,25E-06	1,85E-07	1,85E-07	1,85E-07	3,14E-08	8,56E-09	3,06E-09	1,37E-07	3,17E-07	5,78E-09	6,47E-08	1,71E-07	1,05E-06	1,44E-07	2,87E-09	2,80E-09	1,53E-08	3,08E-09
400	4,86E-07	1,42E-06	1,42E-06	1,76E-07	1,76E-07	1,76E-07	1,09E-07	9,41E-09	4,40E-09	2,38E-07	5,82E-07	3,29E-08	2,40E-07	9,70E-07	6,22E-07	7,18E-08	8,43E-09	2,08E-09	1,65E-08	4,18E-09
500	2,14E-07	1,81E-06	1,81E-06	1,49E-07	1,49E-07	1,49E-07	6,75E-07	3,80E-08	1,28E-08	1,36E-07	1,74E-07	6,03E-08	4,90E-08	1,15E-07	4,97E-07	1,13E-07	2,09E-08	4,88E-09	7,22E-08	4,78E-09
630	6,50E-08	3,21E-07	3,21E-07	1,70E-07	1,70E-07	1,70E-07	1,03E-07	2,76E-08	6,36E-09	4,15E-08	5,53E-08	7,91E-08	1,89E-08	5,18E-08	6,27E-08	7,55E-08	1,30E-08	4,28E-09	7,56E-08	7,31E-09
800	8,56E-08	8,24E-07	8,24E-06	1,31E-07	1,31E-07	1,31E-07	2,75E-08	5,19E-09	1,13E-08	7,92E-08	4,20E-08	1,10E-07	1,09E-08	9,61E-08	2,19E-07	1,26E-07	8,87E-09	1,98E-09	2,25E-08	9,85E-09
1000	9,68E-08	5,08E-07	5,08E-07	1,71E-07	1,71E-07	1,71E-07	9,14E-08	2,68E-08	1,25E-08	9,72E-08	2,78E-08	8,34E-08	1,37E-08	8,80E-08	4,55E-08	1,74E-07	2,12E-08	1,01E-09	4,27E-08	2,29E-08
1250	3,97E-07	6,96E-07	6,96E-07	3,33E-07	3,33E-07	3,33E-07	3,51E-07	1,40E-07	5,32E-08	2,18E-07	7,30E-08	1,77E-07	5,42E-08	1,29E-07	5,78E-08	1,95E-07	7,44E-08	1,82E-09	1,06E-07	4,15E-08
1600	1,67E-07	5,67E-07	5,67E-07	1,51E-07	1,51E-07	1,51E-07	3,73E-08	1,59E-08	3,13E-08	1,36E-07	3,40E-08	7,95E-08	3,69E-08	6,84E-08	2,48E-08	4,27E-08	1,14E-08	1,38E-09	3,06E-08	1,08E-08
2000	1,47E-09	7,31E-09	7,31E-09	1,01E-09	1,01E-09	1,01E-09	1,21E-09	1,30E-09	6,70E-10	2,42E-09	7,20E-10	1,50E-09	2,52E-09	7,20E-10	1,15E-09	2,85E-09	6,63E-10	1,68E-11	6,55E-10	1,69E-10
2500	1,77E-10	7,14E-10	7,14E-10	1,09E-10	1,09E-10	1,09E-10	4,39E-10	4,40E-10	2,06E-10	3,85E-10	6,36E-11	3,54E-10	1,68E-10	2,99E-10	3,41E-10	2,29E-10	1,73E-10	6,40E-12	1,80E-10	2,54E-10
3150	1,85E-09	5,91E-09	5,91E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	3,23E-09	2,99E-09	3,47E-09	3,17E-09	2,40E-09	1,97E-09	2,09E-09	1,19E-09	2,43E-09	1,42E-09	1,18E-08	2,15E-10	7,92E-10	1,40E-09
4000	1,99E-08	8,02E-08	8,02E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,22E-08	1,42E-08	3,95E-08	1,30E-08	1,56E-08	2,89E-08	1,06E-08	1,07E-08	2,38E-08	2,92E-08	2,01E-08	1,21E-09	1,38E-08	6,12E-08
5000	3,31E-10	2,03E-09	2,03E-09	2,84E-10	2,84E-10	2,84E-10	4,68E-10	3,26E-10	4,61E-10	1,79E-10	2,47E-10	2,92E-10	1,73E-10	1,26E-10	3,78E-10	2,74E-10	1,29E-10	1,12E-11	8,69E-11	4,01E-10

Velocidade 3 - SA (Posição 3 do shaker)

	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
100	1,21E-07	1,65E-07	1,28E-08	1,92E-08	6,19E-09	8,05E-09	4,90E-09	1,88E-09	6,50E-09	6,80E-09	1,13E-08	4,77E-09	3,54E-07	7,89E-09	5,37E-07	4,50E-07	4,87E-09	3,67E-09	2,15E-09	2,57E-09
125	4,81E-07	2,68E-07	9,26E-08	3,39E-08	1,73E-09	4,34E-10	4,78E-10	1,59E-10	3,56E-09	1,03E-08	3,05E-08	9,52E-10	2,72E-08	9,75E-09	3,68E-08	3,29E-07	7,81E-10	1,11E-09	1,35E-09	7,24E-10
160	2,82E-07	4,56E-07	1,37E-06	1,35E-07	6,71E-09	2,05E-09	1,28E-09	3,12E-10	4,05E-09	2,31E-08	7,83E-09	1,77E-09	3,59E-08	8,74E-08	6,70E-09	9,57E-07	1,63E-09	2,31E-09	5,98E-09	2,43E-08
200	2,29E-07	2,43E-06	2,38E-07	7,58E-08	1,22E-09	2,96E-09	7,48E-09	1,09E-09	5,96E-09	2,54E-08	4,53E-08	4,77E-09	7,83E-08	5,22E-08	9,62E-08	2,20E-06	4,84E-10	3,78E-10	2,40E-09	6,29E-10
250	4,63E-07	4,89E-07	1,11E-07	2,19E-07	2,87E-09	8,35E-09	1,34E-08	2,40E-09	2,38E-08	2,73E-08	5,23E-08	3,62E-09	8,59E-08	8,38E-08	2,19E-07	1,65E-07	4,04E-09	1,30E-09	1,79E-08	2,58E-09
315	2,71E-07	3,74E-07	2,20E-07	1,60E-07	3,84E-09	1,78E-08	7,88E-08	3,58E-08	5,26E-08	1,84E-07	6,16E-07	6,88E-09	2,11E-07	6,46E-08	2,94E-06	2,07E-07	2,51E-08	2,28E-09	1,03E-08	1,47E-09
400	4,36E-07	6,75E-07</																		

Para uma melhor compreensão e uma melhor visualização do comportamento das velocidades do subsistema e tendo como objetivo o cálculo da energia cinética do mesmo, convencionou-se em separar as velocidades por subsistema considerando os três pontos de excitação para cada banda de um terço de oitava. Com isso, separaram-se as doze leituras de cada subsistema para se saber qual a energia cinética média dos subsistemas da porta sempre se observando a aplicação ou não dos amortecedores na porta do modelo Palio.

Para calcular a energia cinética média de cada subsistema há a necessidade de se conhecer a massa de cada subsistema da porta em questão. Diante desta massa total desconhecida, foi pesada uma porta do modelo Palio para se saber qual seria a massa total da porta. E em seguida, foi separado cada subsistema através de corte com maçarico, no qual se reproduziu os subsistemas modelados no AutoSea2[®]. Com os subsistemas já separados em cinco partes distintas foi feito a pesagem de cada subsistema passando-se assim a se conhecer a massa de cada subsistema da porta. A seguir na Tab. 5.6, serão apresentadas as massas de cada subsistema e o peso total da porta.

Tabela 5.6 – Peso dos subsistemas e peso total da porta

<u>Subsistemas da Porta</u>	<u>Massa [kg]</u>
1- Painel Externo	m=5,5
2- Fechadura	m=1,4
3- Fundo	m=1,7
4- Ossatura	m=4,5
5- Dobradiça	m=2,6
6- Vão vidro	m=4,3
Peso total da porta do Palio	m= 20 kg

A partir da determinação das massas de cada subsistemas, iniciou-se os cálculos das energias cinéticas conforme tabelas abaixo.

Tabela 5.7 - Cálculo da energia cinética (subsistema 1)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 1 - Com Amortecedor [m/s]^2														Energia Cinética [kgm/s^2]
	Pos	1	2	3	4	21	22	23	24	41	42	43	44	Média	
100	3,86123E-07	1,39369E-08	9,42290E-08	1,59110E-07	3,12760E-07	2,54604E-06	5,56222E-08	1,42980E-07	3,56379E-07	7,62482E-07	6,04109E-08	8,85655E-08	5,31533E-07	2,92343E-06	
125	2,12834E-06	5,82563E-06	7,19265E-07	2,00813E-07	5,08153E-07	5,61556E-06	7,19718E-07	1,57636E-07	1,78547E-06	9,72894E-07	5,54451E-07	1,61211E-07	1,61059E-06	8,85826E-06	
160	2,75315E-07	7,74645E-07	1,54782E-06	4,75417E-08	2,83726E-07	3,88795E-06	2,77722E-06	1,25515E-07	1,25803E-06	1,97595E-06	3,45624E-06	6,82218E-07	1,42435E-06	7,83391E-06	
200	2,57321E-07	2,50870E-06	3,68922E-07	1,49378E-07	2,10477E-07	4,57639E-06	2,58388E-07	9,32720E-08	1,16539E-06	5,11022E-06	7,33637E-07	2,71022E-07	1,30858E-06	7,19722E-06	
250	6,28305E-07	2,76473E-06	6,50428E-08	4,53490E-07	6,65968E-07	4,28438E-06	1,91472E-07	3,99279E-07	2,18975E-06	8,95029E-07	3,98588E-07	1,22231E-06	1,17853E-06	6,47091E-06	
315	1,95821E-07	2,21776E-06	1,94257E-07	2,23356E-07	1,69487E-07	2,12410E-06	3,45477E-07	1,79568E-07	1,26103E-06	6,96229E-07	5,67892E-07	6,13312E-07	2,32273E-07	4,02750E-06	
400	7,45905E-07	1,55325E-06	1,44344E-07	9,34125E-08	4,98879E-07	7,82459E-07	7,10524E-07	2,81001E-07	1,73099E-06	9,25951E-07	2,77452E-07	2,28443E-07	6,64376E-07	3,65407E-06	
500	3,36068E-07	5,56580E-07	1,43603E-07	6,54192E-08	1,92313E-07	9,15772E-07	2,89129E-07	1,93980E-07	4,84907E-07	2,42552E-07	3,90557E-07	3,36797E-07	3,43980E-07	1,89139E-06	
630	9,34784E-08	2,95869E-07	1,14319E-07	1,52312E-07	1,06474E-07	3,41045E-07	2,45925E-07	2,46390E-07	3,88562E-07	1,42814E-07	1,39452E-07	1,20921E-06	2,89488E-07	1,59218E-06	
800	1,71024E-07	2,21265E-07	1,92247E-07	1,44615E-07	2,11598E-07	4,22538E-07	2,49351E-07	2,60798E-07	4,02913E-07	1,09673E-07	1,69246E-07	4,16236E-07	2,39292E-07	1,31811E-06	
1000	1,51799E-07	2,45296E-07	6,21811E-08	6,23093E-08	1,29059E-07	2,75217E-07	1,07137E-07	1,33906E-07	5,35317E-07	3,16899E-07	1,41117E-07	5,70172E-07	2,27540E-07	1,25147E-06	
1250	7,72154E-08	2,22033E-07	6,98376E-08	1,13761E-07	5,29056E-07	2,59215E-07	2,49830E-07	3,90138E-07	7,29918E-07	2,54487E-07	8,03644E-08	2,89479E-07	7,27011E-07	1,49806E-06	
1600	2,01985E-07	2,77239E-07	3,55091E-07	1,72213E-07	2,01445E-07	1,38193E-07	1,39809E-07	2,13844E-07	5,84002E-07	1,40754E-07	7,72548E-08	8,23429E-07	2,77055E-07	1,52380E-06	
2000	2,56214E-08	8,58525E-08	1,42361E-07	2,55244E-08	1,77346E-08	6,28562E-09	3,45874E-09	1,31058E-09	8,57990E-07	3,19791E-07	2,63408E-07	8,14151E-07	2,12294E-07	1,16762E-06	
2500	1,14811E-08	1,89341E-08	6,80945E-08	1,20004E-08	2,37443E-10	6,35601E-10	8,28068E-10	3,13524E-10	1,24410E-06	1,22143E-07	2,53498E-07	2,06164E-07	6,15336E-07	8,88447E-07	
3150	3,29185E-08	8,29259E-08	2,28780E-07	5,30885E-08	3,25203E-09	6,74538E-09	1,99339E-08	2,62847E-09	1,13730E-07	1,51347E-08	2,26963E-08	5,36846E-08	5,27831E-08	2,90307E-07	
4000	8,03802E-10	1,90161E-09	3,65637E-09	2,43557E-09	3,85943E-08	8,11556E-08	3,58745E-07	2,17092E-08	4,82902E-09	1,26653E-09	1,21722E-09	2,97032E-09	4,41070E-08	2,42589E-07	
5000	1,09178E-10	2,29453E-10	5,09251E-10	1,70692E-10	3,85957E-10	1,17336E-09	3,28077E-09	3,28939E-10	1,83296E-09	3,08435E-10	1,49511E-10	6,50400E-10	7,60651E-10	4,18356E-09	

Tabela 5.8 - Cálculo da energia cinética (subsistema 2)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 2 - Com Amortecedor [m/s]^2														Energia Cinética [kgm/s^2]
	Pos	5	6	7	8	25	26	27	28	45	46	47	48	Média	
100	3,20286E-08	2,22332E-08	1,23817E-08	1,05195E-08	9,04022E-08	6,96090E-08	2,77950E-08	5,30554E-09	8,71696E-08	2,07524E-08	1,18999E-08	1,58945E-08	2,61027E-08	3,65438E-08	
125	5,58757E-09	7,05554E-09	6,91858E-09	1,15143E-09	1,84904E-08	2,01302E-08	1,31732E-08	2,01209E-09	7,28785E-08	4,88407E-09	1,58389E-09	7,42215E-10	7,41890E-09	1,03865E-08	
160	5,46302E-09	5,81908E-09	1,55699E-09	2,49392E-10	4,91200E-08	9,03094E-08	1,69416E-08	5,86455E-10	2,33812E-08	1,17535E-08	3,25773E-09	1,28002E-08	1,74773E-08	2,44682E-08	
200	1,62956E-09	1,28220E-08	8,36657E-09	2,17068E-09	7,16930E-09	8,35860E-08	1,79793E-08	6,42562E-10	6,50335E-09	1,88770E-08	1,91243E-08	2,11918E-09	1,50825E-08	2,11155E-08	
250	4,29223E-09	6,91780E-09	9,95021E-09	6,97887E-09	1,14807E-08	5,99008E-08	5,56942E-08	5,26884E-09	1,48148E-08	6,92799E-08	6,43400E-08	1,31812E-08	2,88240E-08	3,75537E-08	
315	5,35561E-09	1,83306E-08	3,51630E-08	9,29891E-09	3,15964E-08	4,60865E-08	2,32178E-07	9,74766E-09	1,17094E-08	9,56463E-08	3,25200E-07	1,02823E-07	7,89279E-08	1,07899E-07	
400	3,58410E-09	1,11049E-07	7,68942E-08	4,33415E-09	2,10343E-08	2,64472E-07	3,48723E-07	7,49641E-09	1,26557E-08	2,43510E-07	1,86941E-07	2,43618E-08	1,08755E-07	1,52256E-07	
500	7,16945E-09	9,50928E-08	3,33661E-07	1,13675E-08	5,45651E-08	3,69437E-07	1,55200E-06	1,54270E-08	2,36502E-08	1,99118E-07	1,08415E-06	1,31324E-07	3,23080E-07	4,52312E-07	
630	5,52260E-08	2,35654E-08	9,97298E-08	1,32739E-08	2,17524E-07	1,29495E-07	1,02493E-06	3,87540E-08	6,18805E-08	4,69175E-08	3,75924E-07	1,15345E-07	1,82389E-07	2,55316E-07	
800	5,18091E-07	1,32272E-07	1,75488E-08	3,08029E-09	1,36792E-06	4,57041E-07	1,19657E-07	3,89980E-09	1,10924E-06	8,33068E-08	4,00339E-08	9,44996E-08	3,21794E-07	4,50512E-07	
1000	3,61857E-08	2,74713E-08	4,76748E-08	1,35369E-08	2,28135E-07	1,46896E-07	7,61442E-07	4,53594E-08	5,98299E-08	3,69527E-08	1,82695E-07	8,43726E-08	1,39194E-07	1,94872E-07	
1250	4,53171E-08	8,90980E-08	1,59618E-07	4,22005E-08	6,82069E-07	9,33959E-07	1,87280E-06	1,60478E-07	1,00614E-07	1,32661E-07	2,79865E-07	2,44627E-07	3,93592E-07	5,51029E-07	
1600	2,20773E-07	1,04899E-07	3,53689E-07	2,10262E-07	2,28102E-07	6,01738E-07	1,85140E-07	2,20328E-08	1,92773E-07	1,26565E-07	1,94542E-07	1,64186E-07	2,17056E-07	3,03878E-07	
2000	6,57357E-08	1,25832E-08	8,71995E-08	6,68026E-08	7,21081E-09	3,52030E-08	6,84142E-08	1,27417E-09	6,80801E-07	1,75384E-07	5,19849E-07	2,75748E-07	1,61829E-07	2,26561E-07	
2500	6,83578E-09	1,29917E-08	1,24646E-08	2,96213E-09	6,66833E-10	2,55584E-09	3,31591E-09	4,94109E-10	1,56754E-07	5,81098E-07	7,02714E-07	3,61146E-07	1,55889E-07	2,18243E-07	
3150	3,97178E-08	4,66717E-08	5,41441E-08	9,61008E-08	3,78138E-08	4,41708E-08	1,71497E-08	3,79006E-09	2,07445E-08	9,38939E-09	7,31099E-08	5,41306E-08	4,14110E-08	5,79754E-08	
4000	2,59585E-09	5,56933E-09	1,22027E-09	2,04687E-09	3,48286E-07	4,95823E-07	4,74187E-08	1,26345E-08	2,02863E-09	2,99445E-09	3,00952E-09	2,76679E-09	7,72162E-08	1,08103E-07	
5000	1,51251E-10	2,40695E-10	2,28720E-10	1,90972E-10	1,85991E-09	2,16641E-09	1,27239E-09	3,39810E-10	1,68388E-09	2,40545E-10	4,22322E-10	6,43732E-10	6,80092E-10	9,24129E-10	

Tabela 5.9 - Cálculo da energia cinética (subsistema 3)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 3 - Com Amortecedor [m/s] ²													Energia Cinética [Kgm/s ²]
	Ptos	9	10	11	12	29	30	31	32	49	50	51	52	
100	3,87322E-08	9,14362E-09	1,61520E-08	1,96118E-08	3,13600E-08	4,90658E-08	5,51094E-08	5,78953E-08	5,70517E-08	6,42807E-08	1,26086E-08	3,88635E-09	2,54913E-08	4,33253E-08
125	1,21513E-08	3,31115E-08	1,34288E-07	7,40388E-09	8,09075E-09	1,04693E-07	8,39959E-09	1,81585E-08	6,14979E-09	8,77930E-09	2,91408E-08	1,02490E-09	3,72488E-08	6,33231E-08
160	2,70325E-09	1,50915E-08	2,27467E-08	2,09140E-09	8,39497E-09	9,11809E-08	7,36574E-08	9,26178E-09	4,13413E-09	2,05881E-08	1,07257E-08	1,27168E-09	2,18208E-08	3,70951E-08
200	7,61087E-09	2,70209E-08	2,62263E-08	3,16673E-09	8,20582E-09	8,44401E-08	1,99819E-07	2,16049E-08	3,25382E-08	2,66312E-08	6,03397E-09	3,80895E-09	3,48019E-08	5,91631E-08
250	2,37071E-08	8,16808E-08	9,00686E-08	7,12557E-09	4,69248E-08	1,64670E-07	4,46342E-07	1,49135E-08	2,42362E-08	4,96554E-08	7,03601E-08	5,43558E-09	6,54268E-08	1,45225E-07
315	5,46884E-09	1,24799E-07	4,75883E-07	5,91002E-09	6,50535E-09	4,55065E-07	1,53850E-06	1,42440E-08	6,89535E-09	1,41859E-07	6,70645E-07	6,85528E-09	2,87719E-07	4,89123E-07
400	6,71637E-09	1,23134E-07	8,70863E-07	6,10811E-09	1,80955E-08	1,24493E-06	3,85579E-06	1,24845E-07	1,02841E-08	2,99727E-07	3,02638E-08	8,07702E-08	8,05637E-07	1,38958E-06
500	6,52949E-09	5,84602E-08	1,31505E-07	2,60100E-09	2,96349E-08	3,54209E-07	7,22539E-07	1,96030E-07	1,26594E-08	1,34112E-07	2,43523E-07	8,82901E-08	1,64841E-07	2,80230E-07
630	6,87073E-09	1,33988E-08	2,86209E-08	3,11255E-08	1,64288E-08	1,93255E-07	3,18713E-07	5,49409E-07	3,56078E-08	2,44873E-08	2,82522E-08	6,29032E-08	1,06502E-07	1,81053E-07
800	1,74550E-08	5,13568E-08	9,41706E-08	1,08820E-07	3,46309E-08	3,61580E-07	1,98044E-07	5,13856E-07	7,21305E-09	4,40770E-08	3,43103E-08	9,18075E-08	1,29760E-07	2,20582E-07
1000	9,22674E-09	2,43143E-08	1,83107E-08	9,98128E-08	3,21325E-08	3,28407E-07	1,76371E-07	6,00823E-07	6,89625E-08	3,44239E-08	3,17883E-08	7,51049E-08	1,19793E-07	2,03647E-07
1250	1,53153E-08	2,97758E-08	2,56300E-08	9,38088E-08	1,25892E-07	1,03598E-06	4,05863E-07	1,00944E-06	1,07951E-08	4,21075E-08	9,28520E-08	7,60772E-08	2,39988E-07	4,07997E-07
1600	8,06528E-08	8,29398E-08	3,08978E-08	1,58518E-07	1,02271E-07	4,23927E-07	2,02049E-07	2,58020E-07	3,57255E-08	1,05458E-07	2,02545E-08	1,55000E-07	1,36368E-07	2,31825E-07
2000	2,05930E-08	3,18249E-08	1,45020E-08	5,73967E-08	1,45308E-08	9,24318E-09	2,71534E-08	8,80988E-09	9,53545E-08	3,12546E-07	6,71527E-08	2,90209E-07	7,59834E-08	1,29172E-07
2500	1,21563E-08	1,07283E-08	6,40212E-09	1,56865E-08	6,83035E-10	1,76013E-09	4,88869E-10	2,00131E-09	7,43721E-08	2,35986E-07	4,14570E-08	3,13059E-07	5,95638E-08	1,01258E-07
3150	1,29141E-07	4,22409E-08	6,17013E-08	5,05278E-08	1,16890E-08	1,81840E-08	1,02559E-08	1,40128E-08	2,61383E-08	2,05458E-08	8,95115E-08	2,48944E-08	3,48552E-08	5,82539E-08
4000	2,21922E-09	1,08184E-09	1,33958E-09	1,84901E-09	9,28071E-08	1,08446E-07	6,30385E-08	1,84426E-07	2,54278E-09	7,28303E-10	5,16530E-10	1,34753E-09	3,83451E-09	6,51867E-08
5000	1,47133E-10	1,03484E-10	9,90038E-11	4,84180E-11	1,07498E-09	1,51108E-09	1,18767E-09	1,12822E-09	1,64701E-10	9,57383E-11	7,10561E-11	9,41129E-11	4,78984E-10	8,10839E-10

Tabela 5.10 - Cálculo da energia cinética (subsistema 4)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 4 - Com Amortecedor [m/s] ²													Energia Cinética [Kgm/s ²]
	Ptos	13	14	15	16	33	34	35	36	53	54	55	56	
100	7,14880E-07	4,17023E-08	3,05829E-06	2,08888E-06	3,55788E-07	1,12107E-08	6,56637E-07	8,43885E-07	3,55898E-07	8,39828E-09	3,63840E-07	4,31478E-07	7,44305E-07	3,34937E-06
125	2,74937E-07	1,15584E-07	5,62665E-07	3,57043E-08	1,52688E-07	5,42781E-08	2,23853E-07	1,82140E-08	3,09635E-08	1,23278E-08	2,78528E-08	3,49792E-07	5,99712E-07	2,89871E-06
160	3,56772E-08	1,00475E-07	2,35352E-08	2,20850E-08	7,09680E-08	1,11682E-07	3,11778E-08	4,39686E-06	2,94689E-08	8,27649E-08	7,75707E-09	8,89586E-07	6,84879E-07	2,99186E-06
200	1,40311E-07	7,46006E-08	1,56485E-07	3,95325E-06	6,27871E-07	4,58548E-08	7,47825E-08	2,78269E-06	6,57770E-08	7,43768E-08	9,23871E-08	2,75235E-08	9,03403E-07	4,06531E-06
250	1,11385E-07	2,44799E-07	9,66678E-07	4,80187E-07	1,13733E-07	2,06059E-07	2,45260E-07	1,77852E-07	1,35142E-07	1,25053E-07	3,12116E-07	1,84335E-07	2,73550E-07	1,23097E-06
315	1,00175E-07	1,28531E-07	1,49412E-06	1,42712E-07	3,91389E-08	1,86216E-07	1,39209E-06	1,04246E-07	2,19842E-07	4,29829E-08	3,17008E-06	1,51818E-07	5,97846E-07	2,88941E-06
400	2,09298E-07	6,10231E-07	2,78951E-07	5,93061E-08	1,61100E-07	7,88625E-07	5,87854E-07	5,77049E-08	6,31877E-08	3,02199E-07	9,43016E-07	1,69239E-07	3,52851E-07	1,58693E-06
500	3,93754E-08	8,88658E-08	2,90190E-07	2,83132E-08	3,80985E-08	8,04938E-07	3,41198E-07	4,19807E-08	2,18530E-08	5,35327E-08	2,86843E-07	3,08525E-08	1,72012E-07	7,74052E-07
630	8,80326E-09	3,35421E-08	4,46913E-08	4,42513E-08	1,49153E-08	9,74988E-08	6,30406E-07	8,21511E-08	8,52867E-09	2,80530E-08	7,18263E-08	3,31205E-08	9,12990E-08	4,10846E-07
800	1,13420E-08	8,96330E-08	1,31560E-07	1,09789E-07	6,19888E-08	5,77889E-08	1,27784E-07	9,92198E-08	6,43535E-09	3,85752E-08	1,35661E-07	7,17843E-08	7,38460E-08	3,31407E-07
1000	7,70808E-09	5,76174E-08	1,77084E-08	6,25399E-08	1,11447E-08	8,44838E-08	2,44117E-08	1,57820E-07	3,93296E-09	5,88248E-08	1,54611E-08	4,07972E-08	4,52038E-08	2,03417E-07
1250	1,57187E-08	6,13891E-08	3,30217E-08	5,84408E-08	2,94201E-08	1,27245E-07	4,56352E-08	1,03832E-07	9,37768E-08	2,55394E-08	1,61474E-08	6,54773E-08	4,93535E-08	2,22091E-07
1600	1,12482E-07	1,15744E-07	1,66189E-07	1,25165E-07	5,59090E-08	7,46489E-08	3,33505E-08	4,48530E-08	8,27014E-08	8,83781E-08	5,48781E-08	6,38678E-08	8,48471E-08	3,81812E-07
2000	6,28543E-08	3,39188E-08	5,58006E-08	1,05279E-07	3,75074E-09	1,42858E-09	1,32598E-09	2,81399E-09	2,18080E-07	1,30427E-07	1,02407E-07	1,34033E-07	7,08933E-08	3,19470E-07
2500	7,57135E-08	7,81206E-08	5,95608E-09	5,06555E-09	2,58678E-10	3,04929E-10	2,11391E-10	2,40127E-10	3,17898E-08	5,78474E-08	6,41858E-08	3,03860E-08	1,78293E-08	7,93317E-08
3150	5,11206E-08	3,61896E-08	2,55351E-08	2,43421E-08	3,96795E-08	1,70990E-09	5,80168E-09	2,24402E-09	7,19703E-09	3,78163E-09	4,28276E-09	3,01353E-09	1,40888E-08	6,34447E-08
4000	8,31344E-10	3,78837E-10	2,32406E-09	7,91711E-10	1,21900E-09	6,86190E-09	4,82758E-09	2,15641E-09	3,69324E-10	1,48793E-10	8,15955E-10	9,77533E-10	7,98078E-09	3,58235E-08
5000	6,73559E-11	3,42633E-11	8,49418E-11	3,22928E-11	9,15168E-11	6,94172E-11	2,87162E-10	1,18511E-10	2,74579E-11	1,40944E-11	5,86868E-11	3,23566E-11	7,70880E-11	3,46896E-10

Tabela 5.11 - Cálculo da energia cinética (subsistema 5)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 5 - Com Amortecedor [m/s]^2														Energia Cinética [kgm/s^2]
	Ptos	17	18	19	20	37	38	39	40	57	58	59	60	Média	
100	1,89360E-08	2,42507E-08	8,80265E-09	3,05775E-09	2,81756E-08	3,33061E-08	1,11958E-09	5,71866E-09	4,38337E-09	2,86878E-09	1,89488E-09	3,10759E-09	1,21407E-08	3,15856E-08	
125	5,95658E-09	7,76884E-09	4,11018E-09	1,82133E-09	7,59138E-09	1,20008E-08	7,47174E-09	2,65927E-09	1,12127E-09	1,19714E-09	1,27332E-09	6,91729E-10	4,47180E-09	1,16267E-08	
160	2,28323E-09	1,83128E-09	5,15815E-09	2,49825E-09	9,10413E-09	8,09008E-09	2,44100E-08	1,11912E-08	8,68902E-10	1,87893E-09	5,45425E-09	2,01802E-09	6,23153E-09	1,62020E-08	
200	1,93099E-09	6,49897E-10	5,28706E-09	2,14388E-09	3,81295E-09	1,00771E-09	8,43042E-09	2,50590E-09	7,41308E-10	3,69419E-10	2,41558E-09	6,19498E-10	2,47814E-09	6,43795E-09	
250	3,39920E-09	2,14774E-09	2,68410E-08	5,14013E-09	3,18977E-08	1,17880E-08	5,88899E-08	1,76297E-08	7,19627E-09	2,01044E-09	1,94998E-08	3,41434E-08	1,58037E-08	4,10986E-08	
315	3,27850E-09	3,45791E-09	1,55373E-08	2,44982E-09	6,95169E-09	5,81684E-09	2,87600E-08	6,84082E-09	1,89569E-09	1,94552E-09	1,09337E-08	1,28422E-09	7,42917E-09	1,93158E-08	
400	8,72272E-09	1,81125E-09	1,32303E-08	3,04874E-09	3,18092E-08	1,12435E-08	5,72473E-08	1,48522E-08	8,48414E-09	1,45487E-09	1,39298E-08	3,62249E-09	1,41195E-08	3,87108E-08	
500	5,81896E-09	1,94205E-09	2,39895E-08	2,68220E-09	6,53438E-08	1,16328E-08	1,55538E-07	1,27009E-08	1,03635E-08	1,48085E-09	2,59122E-08	3,86555E-08	2,67522E-08	6,95557E-08	
630	1,08768E-08	1,77311E-09	6,71063E-08	2,81336E-09	6,28257E-07	1,42620E-08	3,63971E-07	3,82701E-08	7,78510E-09	7,32962E-10	7,25255E-08	8,17879E-09	1,01294E-07	2,63365E-07	
800	8,55828E-09	1,99491E-09	2,12144E-08	7,10302E-09	2,58180E-08	4,70653E-09	6,82788E-08	2,48038E-08	2,47058E-08	8,81420E-10	1,23447E-08	2,57228E-09	1,50454E-08	3,91180E-07	
1000	8,55033E-09	4,25055E-10	2,11162E-08	4,88448E-09	5,38594E-08	2,82371E-09	1,48030E-07	3,75449E-08	2,38209E-08	5,38243E-10	2,53585E-08	8,80055E-08	2,79458E-08	7,26582E-08	
1250	3,55065E-08	5,43118E-10	3,72128E-08	1,27381E-08	1,95725E-07	6,19382E-09	3,19919E-07	1,11193E-07	1,90872E-08	2,38128E-10	3,84430E-08	1,14862E-08	6,58903E-08	1,70785E-07	
1600	1,28047E-08	9,88829E-08	4,47865E-08	8,14970E-09	5,06767E-08	5,16437E-09	1,36845E-07	2,77633E-08	6,89837E-09	3,59788E-10	1,87585E-08	8,51291E-09	2,66422E-08	6,92898E-08	
2000	1,26840E-08	3,38861E-10	1,43427E-08	2,02215E-09	2,66273E-09	4,47795E-11	3,48121E-09	6,19828E-10	8,16122E-08	5,97496E-10	5,09577E-08	1,04902E-08	1,49845E-08	3,89597E-08	
2500	5,94022E-09	1,91854E-10	4,92473E-09	4,58780E-09	8,87534E-10	3,12402E-11	6,85997E-10	1,17123E-09	7,09492E-08	8,98029E-11	1,28962E-07	5,97041E-08	2,32428E-08	6,04314E-08	
3150	1,16358E-09	1,71540E-09	3,39544E-09	3,28044E-08	1,09212E-07	2,28535E-09	6,30463E-09	1,12506E-07	2,55728E-09	6,48054E-11	2,46489E-08	5,15083E-09	2,41581E-08	6,28110E-08	
4000	1,11537E-09	2,73845E-11	5,18158E-10	1,40951E-09	2,18894E-07	7,20117E-09	3,27855E-07	4,62844E-10	1,11168E-11	1,47798E-10	6,73998E-10	4,73942E-08	1,23225E-07		
5000	3,80148E-11	1,68684E-12	1,28334E-11	1,00836E-10	4,77789E-10	3,71145E-11	2,03707E-10	1,27081E-09	1,99218E-11	4,88802E-13	1,14185E-11	3,51650E-11	1,83984E-10	4,78307E-10	

Dando prosseguimento ao experimento prático, serão apresentadas a seguir algumas tabelas de cálculos para as energias cinéticas de cada subsistema da porta **sem amortecedor**.

Tabela 5.12 - Cálculo da energia cinética (subsistema 1)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 1 - Sem Amortecedor [m/s]^2														Energia Cinética [kgm/s^2]
	Ptos	1	2	3	4	21	22	23	24	41	42	43	44	Média	
100	2,87375E-07	9,25319E-07	8,20015E-08	1,19141E-07	1,94210E-07	1,38220E-08	5,13709E-08	8,06389E-08	1,21165E-07	1,65453E-07	1,27832E-08	1,91962E-08	2,85069E-07	1,58788E-06	
125	9,96274E-07	4,15983E-06	6,53412E-07	1,07398E-07	2,23218E-07	4,79705E-08	4,21875E-07	8,36800E-08	4,80559E-07	2,88302E-07	9,25882E-08	3,38547E-08	1,02849E-06	5,64567E-06	
160	1,99626E-07	6,22238E-07	1,02920E-06	6,02351E-08	1,58960E-07	3,77890E-08	1,85953E-06	9,02901E-08	2,81628E-07	4,58289E-07	1,37288E-06	1,35223E-07	8,38417E-07	4,60029E-06	
200	2,78292E-07	4,28380E-06	3,68010E-07	1,30503E-07	1,83334E-07	6,46309E-08	3,36387E-07	9,07893E-08	2,28882E-07	2,43118E-06	2,37925E-07	7,57985E-08	1,25983E-06	6,92905E-06	
250	4,33155E-07	3,70710E-07	7,57165E-08	4,85277E-07	6,80177E-07	4,92023E-08	2,82842E-07	2,50381E-07	4,62527E-07	4,88782E-07	1,11218E-07	2,18828E-07	7,28320E-07	4,00578E-06	
315	2,25128E-07	3,60070E-06	2,63875E-07	3,98433E-07	1,98594E-07	2,25368E-06	1,99523E-07	1,84824E-07	2,71423E-07	3,73897E-07	2,19580E-07	1,59760E-07	6,95618E-07	3,82580E-06	
400	5,38888E-07	2,10317E-06	1,16398E-07	5,88059E-08	4,85672E-07	1,42440E-06	3,85972E-07	1,78164E-07	4,38034E-07	6,74779E-07	7,88238E-07	8,49348E-08	5,47002E-07	3,00951E-06	
500	1,78688E-07	8,83453E-07	9,57480E-08	4,94860E-08	2,14285E-07	1,80518E-08	2,22829E-07	1,48569E-07	1,11753E-07	1,17285E-07	1,47374E-07	8,31463E-08	3,39155E-07	1,85985E-06	
630	5,39277E-08	3,82922E-07	6,12387E-08	1,43980E-07	6,50313E-08	3,20717E-07	1,39168E-07	1,70028E-07	1,17928E-07	1,06712E-07	6,46852E-08	2,59938E-07	1,57189E-07	8,84538E-07	
800	9,29614E-08	2,94042E-07	9,47122E-08	1,30818E-07	8,56213E-08	8,24261E-07	1,75167E-07	1,31486E-07	8,84088E-08	6,78051E-08	4,30420E-08	9,71249E-08	1,77104E-07	9,74073E-07	
1000	1,19087E-07	3,7750E-07	4,63872E-08	7,49825E-08	9,88025E-08	5,08203E-07	9,59819E-08	1,70594E-07	1,32379E-07	1,11433E-07	5,44829E-08	1,79514E-07	1,83798E-07	9,00878E-07	
1250	5,04898E-08	2,58620E-07	4,35883E-08	6,40278E-08	3,98521E-07	6,98397E-07	3,07200E-07	3,33286E-07	1,06758E-07	9,75789E-08	3,53861E-08	1,24062E-07	2,09489E-07	1,15219E-06	
1600	5,98301E-08	3,18492E-07	8,64525E-08	4,93344E-08	1,87110E-07	5,67081E-07	1,13845E-07	1,51477E-07	1,78443E-07	1,01003E-07	6,35348E-08	3,08580E-07	1,80265E-07	9,91459E-07	
2000	1,24204E-07	4,54884E-07	1,68905E-07	3,80709E-08	1,46700E-08	7,31258E-09	3,14951E-09	1,00750E-09	1,65804E-07	1,08685E-07	6,87168E-08	3,05098E-07	1,20497E-07	6,82734E-07	
2500	3,58808E-08	1,77234E-07	2,73889E-07	3,26414E-08	1,78840E-08	7,14078E-10	7,08872E-10	1,08537E-10	1,19229E-07	2,49593E-08	2,48006E-08	6,28998E-08	6,27688E-08	3,45217E-07	
3150	1,73041E-08	8,02142E-08	1,05515E-07	1,81104E-08	1,85374E-08	5,91247E-09	1,23879E-08	1,03218E-08	4,28688E-08	1,78526E-08	1,97807E-08	3,29518E-08	2,79485E-08	1,53717E-07	
4000	5,47802E-10	2,18240E-08	3,65729E-09	1,10897E-09	1,98626E-08	8,02071E-08	1,81572E-07	1,33735E-08	1,55108E-09	6,59718E-10	6,87982E-10	7,22924E-10	2,55094E-08	1,40302E-07	
5000	9,20517E-11	4,58831E-10	5,75882E-10	1,35037E-10	3,31000E-10	2,02835E-09	2,58203E-09	2,84134E-10	2,18545E-10	1,15811E-10	5,78887E-11	2,15979E-10	5,91327E-10	3,25230E-09	

Tabela 5.13 - Cálculo da energia cinética (subsistema 2)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 2 - Sem Amortecedor [m/s] ²														Energia Cinética [kgm/s ²]
	Ptos	5	6	7	8	25	26	27	28	45	46	47	48	Média	
100	2,60057E-08	1,41208E-08	8,75758E-09	1,02124E-08	1,15158E-08	7,01181E-08	5,86511E-09	4,18802E-09	6,19225E-09	8,05420E-09	4,88688E-09	1,88726E-09	9,04227E-09	1,26582E-08	
125	4,77480E-09	1,92209E-09	4,16090E-09	2,01827E-09	2,05820E-09	1,73975E-09	3,39403E-09	1,80681E-09	1,72797E-09	4,33682E-10	4,78117E-10	1,58719E-10	2,05628E-09	2,87879E-09	
160	3,75572E-09	4,28808E-09	1,68570E-09	2,01215E-10	9,21320E-09	1,25637E-08	3,43148E-09	5,83727E-10	6,71151E-09	2,05320E-09	1,28291E-09	3,12158E-10	3,84021E-09	5,37630E-09	
200	1,39420E-09	5,45363E-09	3,99778E-09	1,09544E-09	1,17241E-09	1,21532E-08	6,42840E-09	1,12210E-09	1,22438E-09	2,95729E-09	7,48359E-09	1,08379E-09	3,78802E-09	5,31722E-09	
250	3,35709E-09	7,29829E-09	5,88281E-09	6,20803E-09	2,40046E-09	1,18280E-08	1,75261E-08	5,84942E-09	2,86870E-09	8,34740E-09	1,33984E-09	2,38739E-09	7,26342E-09	1,01888E-08	
315	4,38409E-09	9,57293E-09	2,24557E-08	1,35634E-08	5,84889E-09	1,18578E-08	3,14132E-08	8,55704E-09	3,84359E-09	1,78184E-08	7,87884E-08	3,57805E-08	2,03235E-08	2,84528E-08	
400	2,48378E-09	3,99707E-08	4,88884E-08	5,88677E-09	2,89435E-09	1,42690E-07	1,08679E-07	9,41334E-09	2,83554E-09	3,68625E-08	4,30472E-08	5,48783E-09	3,74373E-08	5,24122E-08	
500	7,68038E-09	6,26853E-08	3,81481E-08	2,33588E-08	1,66182E-08	7,56367E-08	8,75265E-07	3,80053E-08	5,05739E-08	2,65317E-08	2,34811E-07	2,88831E-08	1,02730E-07	1,43822E-07	
630	3,02705E-08	1,26539E-08	8,72941E-08	1,36127E-08	4,14188E-08	2,47604E-08	1,02675E-07	2,75870E-08	1,30287E-08	1,09418E-08	1,40186E-07	3,69132E-08	4,51283E-08	6,31787E-08	
800	4,93823E-07	7,96885E-08	1,58114E-08	3,73879E-09	4,37768E-07	6,49789E-08	2,75070E-08	5,19180E-09	1,43208E-07	2,29514E-08	8,18487E-09	2,19028E-09	1,08738E-07	1,52233E-07	
1000	3,79351E-08	2,06034E-08	6,80908E-08	2,82748E-08	7,91705E-08	3,84417E-08	9,14146E-08	2,67752E-08	1,88568E-08	8,82550E-09	6,52875E-08	2,55297E-08	4,22671E-08	5,91739E-08	
1250	4,37422E-08	5,14581E-08	1,60103E-07	7,52080E-08	1,66201E-07	1,47358E-07	3,50568E-07	1,38742E-07	3,39239E-08	3,14405E-08	9,87197E-09	5,96720E-08	1,13177E-07	1,58448E-07	
1600	6,63483E-08	5,82029E-08	8,47498E-08	5,10800E-08	4,47291E-08	4,18478E-08	3,73467E-08	1,58548E-08	9,11280E-08	2,17785E-08	5,54831E-08	4,73039E-08	5,13180E-08	7,18452E-08	
2000	2,48880E-07	2,25634E-08	1,25979E-07	1,98424E-07	2,00184E-09	4,77822E-10	1,20557E-09	1,30381E-09	1,73125E-07	1,81121E-08	5,79432E-08	5,20028E-08	7,48089E-08	1,04734E-07	
2500	5,12418E-08	7,03210E-08	8,34854E-08	1,58551E-07	1,83478E-10	7,54318E-10	4,38727E-10	4,40128E-10	1,39880E-08	1,13728E-08	7,86271E-08	4,34133E-08	4,09329E-08	5,73081E-08	
3150	1,78859E-08	1,87540E-08	2,71348E-08	4,83818E-08	4,47577E-09	7,61272E-09	3,22849E-09	2,99309E-09	6,13789E-09	2,48741E-09	3,80701E-08	1,92541E-08	1,60180E-08	2,24252E-08	
4000	1,55796E-09	4,12799E-09	6,78360E-10	1,12217E-09	5,55651E-09	1,00526E-07	2,11598E-08	1,42484E-08	4,83739E-10	5,83812E-10	6,02877E-10	6,71675E-10	1,60273E-09	2,24382E-08	
5000	1,13893E-10	1,93892E-10	2,11828E-10	1,18069E-09	4,84208E-10	8,83417E-10	4,65798E-10	3,26171E-10	3,04088E-11	6,62873E-11	1,08336E-10	1,18715E-10	3,58945E-10	4,98724E-10	

Tabela 5.14 - Cálculo da energia cinética (subsistema 3)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 3 - Sem Amortecedor [m/s] ²														Energia Cinética [kgm/s ²]
	Ptos	9	10	11	12	29	30	31	32	49	50	51	52	Média	
100	2,08885E-08	2,08047E-08	1,98017E-08	1,53850E-08	9,40219E-09	9,88350E-09	7,85328E-09	6,72311E-09	6,50188E-09	6,78512E-09	1,13210E-08	4,77079E-09	1,16592E-08	1,98207E-08	
125	3,68478E-09	5,05428E-08	6,82429E-08	4,36792E-09	1,45630E-09	1,91938E-08	6,68807E-09	3,80538E-09	3,58281E-09	1,03044E-08	3,04500E-08	9,52130E-10	1,68384E-08	2,87954E-08	
160	1,84805E-09	1,03177E-08	1,88622E-08	1,34367E-09	3,59306E-09	2,00356E-08	9,68122E-09	2,06389E-09	4,04594E-09	2,30862E-08	7,83288E-09	1,78650E-09	6,52971E-09	1,45005E-08	
200	5,18294E-09	1,65839E-08	2,20418E-08	4,43845E-09	5,10389E-09	2,58889E-08	3,42847E-08	5,98843E-09	5,98220E-09	2,54089E-08	4,53325E-09	4,77481E-09	1,33500E-08	2,28950E-08	
250	2,02812E-08	7,08385E-08	7,19803E-08	6,86631E-09	1,88286E-08	4,88848E-08	1,19412E-07	4,70881E-09	2,38219E-08	2,73065E-08	5,23408E-08	3,82026E-08	3,89041E-08	6,61370E-08	
315	4,39818E-09	1,86250E-07	5,28525E-07	6,89901E-09	3,06395E-09	1,37472E-07	3,18723E-07	5,77788E-09	5,28024E-09	1,84030E-07	6,16408E-07	6,87597E-09	1,68807E-07	2,83571E-07	
400	3,57732E-09	1,08225E-07	6,00239E-07	5,03520E-08	4,40158E-09	2,38179E-07	5,82388E-07	3,29113E-08	1,04850E-08	2,67877E-07	2,46404E-06	8,23085E-08	3,70415E-07	6,29706E-07	
500	3,64885E-09	5,08712E-08	8,75254E-08	3,05397E-08	1,28238E-08	1,36208E-07	1,73888E-07	6,02794E-08	8,17086E-08	1,28587E-07	2,00830E-07	8,15049E-08	8,12563E-08	1,38136E-07	
630	6,38132E-09	1,82852E-08	3,08894E-08	3,79442E-08	6,35844E-09	4,14932E-08	5,52894E-08	7,80684E-08	2,52988E-08	1,93221E-08	2,52842E-08	4,10870E-08	3,03218E-08	5,15471E-08	
800	1,32845E-08	5,48813E-08	9,13751E-08	8,74671E-08	1,12781E-08	7,91581E-08	4,20111E-08	1,09821E-07	5,88622E-09	4,24705E-08	2,88791E-08	6,25298E-08	5,22525E-08	8,88292E-08	
1000	5,90090E-09	4,41348E-08	1,92201E-08	5,92588E-08	1,25486E-08	9,71534E-08	2,77745E-08	8,34478E-08	6,33954E-08	2,74386E-08	2,48143E-08	7,01931E-08	3,98805E-08	6,77629E-08	
1250	7,14787E-09	3,57786E-08	2,30394E-08	3,50834E-08	5,32063E-08	2,18087E-07	7,30047E-08	1,77042E-07	1,04513E-08	4,79069E-08	8,85898E-09	6,73981E-08	6,30835E-08	1,07242E-07	
1600	3,68868E-08	5,05675E-08	2,10550E-08	4,55538E-08	3,12880E-08	1,35883E-07	3,40118E-08	7,95094E-08	5,92770E-08	1,48994E-07	3,01618E-08	1,75875E-07	7,07628E-08	1,20297E-07	
2000	5,34228E-08	1,18951E-07	3,42004E-08	7,11354E-08	6,89857E-10	2,42144E-09	7,20342E-10	1,50428E-09	6,15915E-08	1,42114E-07	4,78078E-08	1,26228E-07	5,51470E-08	9,37500E-08	
2500	3,77558E-08	5,07089E-08	1,09188E-08	4,99798E-08	2,05889E-10	3,84828E-10	6,36289E-11	3,54200E-10	2,18500E-08	1,06048E-07	3,00332E-08	7,81648E-08	3,22053E-08	5,47490E-08	
3150	3,20507E-08	2,15600E-08	6,18523E-09	1,89550E-08	3,47305E-08	3,16629E-08	2,38568E-09	1,97478E-09	2,98672E-08	6,68873E-08	2,05125E-08	4,20153E-08	2,07703E-08	3,53094E-08	
4000	1,23344E-09	5,14795E-10	8,36249E-10	7,14154E-10	3,94778E-09	1,30318E-08	1,56470E-08	2,88822E-08	2,34660E-08	7,30128E-10	5,30286E-10	7,87875E-10	8,71188E-09	1,48102E-08	
5000	8,84085E-11	5,69148E-11	5,78003E-11	5,22439E-11	4,80842E-10	1,78910E-10	2,46805E-10	2,91878E-10	1,30612E-10	8,17102E-11	5,37453E-11	4,91134E-11	1,45815E-10	2,47888E-10	

Tabela 5.15 - Cálculo da energia cinética (subsistema 4)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 4 - Sem Amortecedor [m/s]^2												Energia Cinética [kgm/s^2]	
	Ptos	13	14	15	16	33	34	35	36	53	54	55		56
100	4,36706E-07	2,18803E-08	1,58551E-08	1,32705E-08	3,40310E-07	7,02072E-08	3,64886E-07	8,73650E-07	3,54350E-07	7,68500E-09	5,36931E-07	4,50085E-07	5,25505E-07	2,36477E-06
125	1,68222E-07	5,03542E-08	2,80879E-07	2,18413E-08	1,26770E-07	3,87101E-08	1,25120E-07	1,47625E-08	2,71518E-08	9,75152E-09	3,65887E-08	3,28543E-07	4,04373E-07	1,81968E-06
160	2,89605E-08	5,99743E-08	1,55375E-08	1,63899E-08	7,19043E-08	1,29451E-07	2,99112E-08	4,05618E-06	3,58689E-08	8,73503E-08	6,70251E-09	9,56727E-07	5,93122E-07	2,66905E-06
200	7,51735E-08	5,68600E-08	9,69291E-08	2,93488E-08	1,00785E-07	8,78834E-08	1,07419E-07	3,06882E-08	7,93327E-08	5,21754E-08	9,62470E-08	2,19965E-06	7,46421E-07	3,35890E-06
250	1,38578E-07	1,37430E-07	4,99398E-07	3,55722E-07	1,62502E-07	4,36456E-07	3,34408E-07	3,92566E-07	8,59194E-08	8,37575E-08	2,19186E-07	1,64560E-07	2,50873E-07	1,12893E-06
315	9,86251E-08	1,14422E-07	2,34494E-08	1,35991E-07	6,47220E-08	1,71171E-07	1,05144E-06	1,44161E-07	2,10666E-07	6,45519E-08	2,93959E-08	2,06829E-07	6,28926E-07	2,83017E-06
400	2,49223E-07	8,87324E-07	7,04382E-07	5,61788E-08	2,39733E-07	9,70087E-07	6,21684E-07	7,79968E-08	6,59212E-08	2,42155E-07	7,81886E-07	1,81025E-07	4,21466E-07	1,89860E-06
500	3,50074E-08	1,13287E-07	2,96443E-07	4,20850E-08	4,90163E-08	1,14629E-07	4,86778E-07	1,12875E-07	2,21871E-08	4,79396E-08	3,25783E-07	3,33502E-08	1,40782E-07	6,33517E-07
630	8,23738E-09	3,86747E-08	5,48902E-08	2,75790E-08	1,88716E-08	5,18069E-08	6,27113E-08	7,55354E-08	1,02019E-08	3,43641E-08	7,27532E-08	4,71810E-08	4,19006E-08	1,88553E-07
800	8,38162E-09	5,95283E-08	8,68186E-08	4,57695E-08	1,09390E-08	9,60559E-08	2,18516E-07	1,26041E-07	5,73273E-09	3,73598E-08	1,22644E-07	7,41885E-08	7,43276E-08	3,34474E-07
1000	8,78662E-09	4,45881E-08	2,09380E-08	5,81948E-08	1,36966E-08	8,79691E-08	4,54906E-08	1,73969E-07	6,89146E-09	9,81426E-08	1,85915E-08	6,55658E-08	5,34022E-08	2,40310E-07
1250	1,48132E-09	5,36696E-08	2,79601E-08	5,72883E-08	5,41844E-08	1,28999E-07	5,77654E-08	1,94947E-07	1,45285E-08	2,46653E-08	3,21428E-08	9,15683E-08	2,28441E-08	2,82798E-07
1600	5,25433E-08	4,89163E-08	4,99172E-09	3,45467E-08	3,68832E-08	8,83785E-08	2,48189E-08	4,26871E-08	9,50011E-09	1,12589E-07	6,80594E-08	1,24723E-07	5,93449E-08	2,67052E-07
2000	3,26233E-07	1,09316E-07	7,09944E-08	6,26138E-08	2,51856E-08	7,19356E-10	1,14734E-09	2,85081E-09	1,18071E-07	6,44937E-08	9,91282E-08	1,67492E-07	6,54647E-08	3,84591E-07
2500	3,47731E-08	3,53787E-08	2,68193E-08	2,11043E-08	1,68427E-10	2,99153E-10	3,41388E-10	2,28753E-10	1,73032E-08	1,78728E-08	2,82338E-08	1,10717E-08	1,81996E-08	7,28980E-08
3150	1,58668E-08	1,34629E-08	1,03783E-08	7,86688E-09	2,09109E-09	1,19336E-09	2,42606E-09	1,42284E-09	3,21879E-09	1,12126E-08	1,23965E-08	5,81316E-09	9,69487E-09	4,36268E-08
4000	5,21092E-10	2,64234E-10	1,05086E-09	4,70047E-10	1,06438E-09	1,06807E-08	2,37706E-08	2,91671E-08	3,65248E-10	1,92088E-10	8,96675E-10	9,52514E-10	6,58125E-09	2,96156E-08
5000	6,99051E-11	4,93823E-11	7,98251E-11	5,71572E-11	1,72956E-10	1,25613E-10	3,78364E-10	2,73528E-10	2,69160E-11	1,27274E-11	7,95439E-11	2,42301E-11	1,12346E-10	5,05556E-10

Tabela 5.16 - Cálculo da energia cinética (subsistema 5)

Frequência Central	Velocidades Subsistema 5 - Sem Amortecedor [m/s]^2												Energia Cinética [kgm/s^2]	
	Ptos	17	18	19	20	37	38	39	40	57	58	59		60
100	1,28891E-08	1,79418E-08	6,29626E-09	1,90458E-08	6,56859E-09	8,41846E-08	2,77857E-09	1,64545E-09	4,87302E-09	3,67198E-09	2,15195E-09	2,56772E-09	5,97561E-09	1,55366E-08
125	2,72399E-08	4,74452E-09	2,73823E-09	1,00678E-09	1,56082E-09	2,81045E-09	1,34600E-09	5,57180E-10	7,81205E-10	1,10733E-09	1,35238E-09	7,24274E-10	1,78785E-09	4,64940E-09
160	1,62528E-08	1,65131E-09	3,88036E-09	1,66678E-09	2,55749E-09	2,82854E-09	7,84818E-09	3,55812E-09	1,62604E-09	2,30923E-09	5,97524E-09	2,34473E-09	4,97265E-09	1,29289E-08
200	1,53560E-09	6,19074E-10	4,66593E-09	1,79294E-09	1,29574E-09	3,72771E-10	2,60452E-09	1,00418E-09	4,84150E-10	3,75795E-10	2,40475E-09	6,29287E-10	1,47410E-09	3,83267E-09
250	8,48819E-09	3,87151E-09	2,13364E-08	8,81905E-09	9,87661E-09	5,14417E-09	1,75387E-08	5,67421E-09	4,04372E-09	1,29864E-09	1,79099E-08	2,58358E-09	6,71547E-09	2,26602E-08
315	3,95225E-08	3,41024E-09	1,88486E-08	2,62411E-09	2,86559E-09	2,79986E-09	1,53441E-08	3,08121E-09	2,51371E-09	2,27998E-09	1,02750E-08	1,46730E-09	5,77166E-09	1,50063E-08
400	6,09547E-09	1,19385E-09	1,08123E-08	1,59438E-09	8,43098E-09	2,08173E-09	1,65132E-08	4,17863E-09	7,58583E-09	1,68079E-08	2,20811E-08	3,56907E-09	8,57870E-09	2,23046E-08
500	4,42515E-09	1,90655E-09	2,88146E-08	2,13586E-09	2,09162E-08	4,88194E-09	7,21558E-08	4,77841E-09	1,24966E-08	1,51257E-09	5,53051E-08	4,58232E-09	1,78268E-08	4,83496E-08
630	6,71208E-09	2,33525E-09	4,55293E-08	3,94788E-09	1,28514E-08	4,27789E-09	7,56074E-08	7,31459E-09	7,98938E-09	1,12053E-08	9,82314E-08	1,18137E-08	2,31442E-08	6,01750E-08
800	3,77275E-09	1,40506E-09	1,58955E-08	5,07659E-09	8,86726E-09	1,97870E-09	2,25478E-08	9,85050E-09	4,48202E-09	1,01833E-09	1,35548E-08	2,77490E-09	7,58518E-09	1,97215E-08
1000	1,03955E-08	4,02932E-10	1,73474E-08	9,08657E-09	2,12354E-08	1,01088E-08	4,26721E-08	2,29462E-08	3,00485E-08	4,35208E-10	4,65870E-08	1,08452E-08	1,77494E-08	4,61485E-08
1250	3,17237E-08	4,49440E-10	2,52812E-08	6,86438E-08	7,43903E-08	1,82418E-08	1,07767E-07	4,14620E-08	3,53869E-08	3,36895E-10	7,28203E-08	1,99091E-08	3,48513E-08	9,06133E-08
1600	7,29782E-09	6,57629E-10	1,63718E-08	4,44220E-09	1,13949E-08	1,35991E-08	3,05874E-09	1,06138E-08	8,55538E-09	4,50409E-10	3,99994E-08	9,42155E-09	1,17627E-08	3,05830E-08
2000	3,57253E-08	8,35628E-10	7,07850E-08	8,34021E-09	6,83208E-10	1,86522E-11	8,54534E-10	1,88825E-10	4,87489E-08	5,93374E-10	6,46232E-08	3,34775E-09	1,93736E-08	5,03714E-08
2500	2,20894E-08	8,58988E-10	1,33087E-08	5,19729E-08	1,73128E-10	6,40261E-12	1,79882E-10	2,54096E-10	1,08151E-08	2,19777E-10	1,02366E-08	1,49426E-08	1,04214E-08	2,70956E-08
3150	7,34071E-09	5,85205E-10	2,20924E-09	1,77118E-08	1,17527E-08	2,14934E-10	7,92062E-10	1,39894E-08	4,82257E-09	1,47968E-10	1,95993E-09	6,40238E-09	5,64239E-09	1,46702E-08
4000	1,05260E-09	2,77611E-11	3,71969E-10	1,53870E-09	2,00826E-08	1,21430E-09	1,37867E-08	6,12245E-08	6,08946E-10	9,56195E-12	1,37498E-10	8,04173E-10	8,40493E-09	2,18528E-08
5000	4,52336E-11	1,80638E-12	1,30652E-11	1,24398E-10	1,28241E-10	1,11710E-11	8,88292E-11	4,01417E-10	2,35373E-11	3,27934E-13	1,00183E-11	4,75932E-11	7,45449E-11	1,93817E-10

Para melhor exemplificar e visualizar os subsistema a ser analisado em separado será mostrado a seguir, na Fig. 5.3, as fotos de cada subsistema a ser analisado em função da dissipação de energia na porta com ou sem amortecedor (insonorizante).

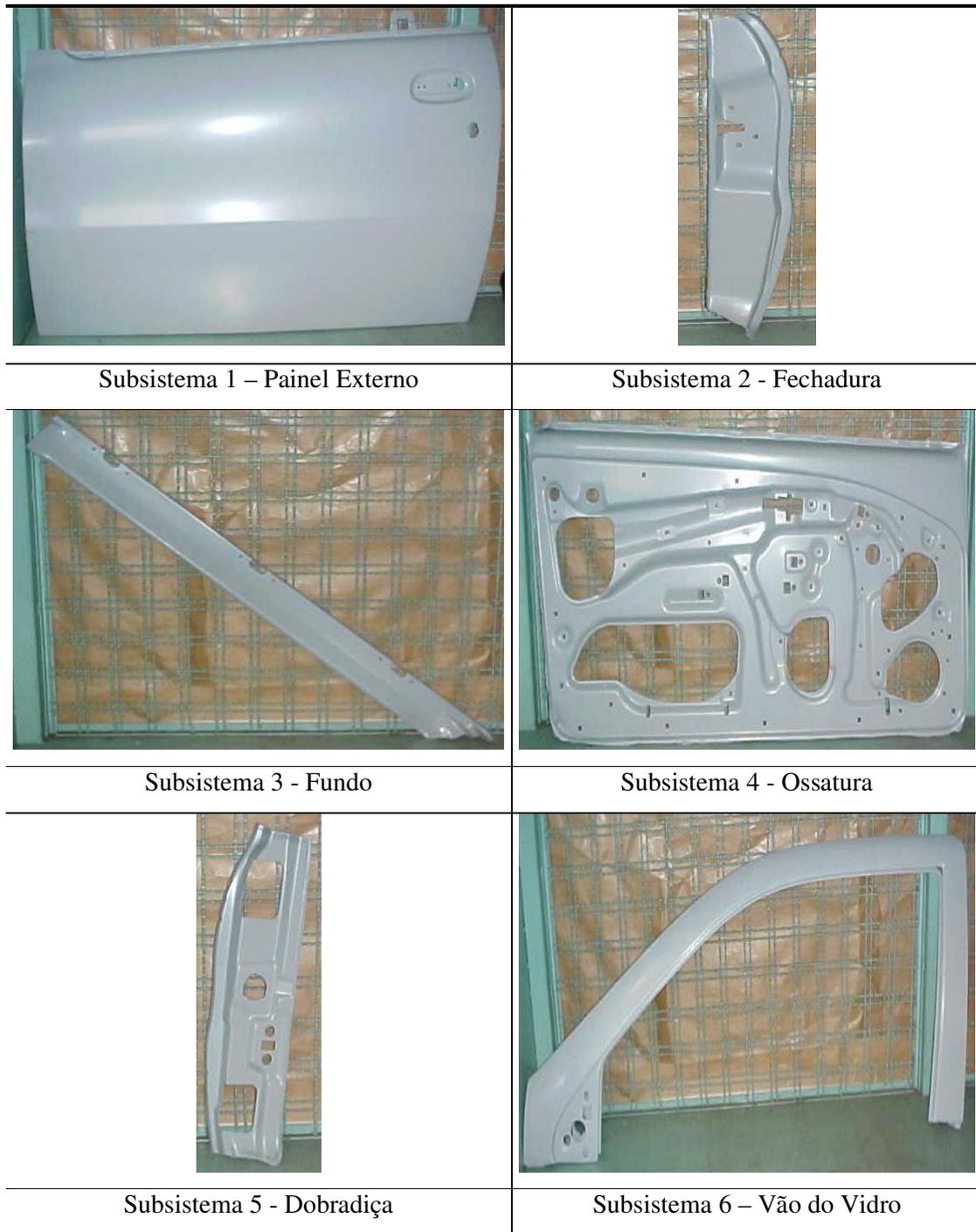


Figura 5.3 – Relação dos subsistemas da porta do modelo Palio

Deve-se ser chamada a atenção para o subsistema do vão do vidro, pois para o mesmo não foi mensurado a potência de entrada e nem a velocidade cinética do subsistema, por se trata de uma estrutura muito rígida e de pouca área com placa de aço.

Com os valores extraídos das tabelas de cálculos das energias cinéticas médias, passou-se então à confecção dos gráficos para as energias cinéticas médias de cada um dos cinco subsistemas da porta para o amortecimento estrutural com a adição de amortecedor (insonorizante) e bem como as energias cinéticas médias da porta sem a adição de amortecedor (insonorizante) na porta. Serão mostrados a seguir, alguns gráficos em escala logarítmica, gerados pelos valores das energias cinéticas de cada subsistema da porta para que se conheça o comportamento da curva em cada subsistema.

Subsistemas com a adição de amortecedor

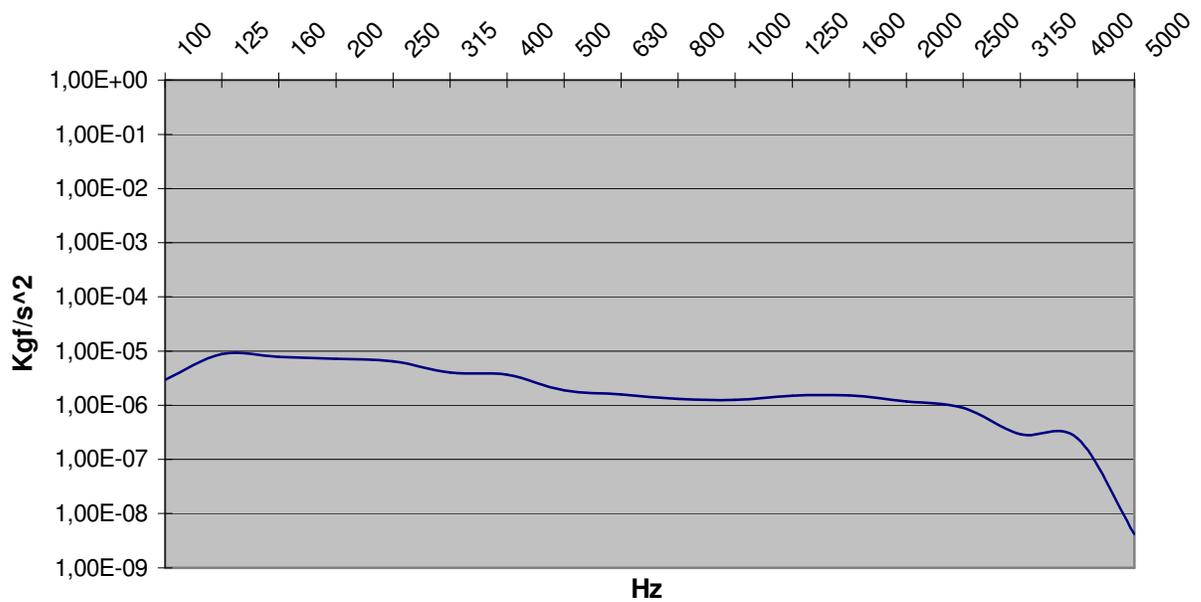


Figura 5.4 – Energia do Subsistema 1 com Amortecedor

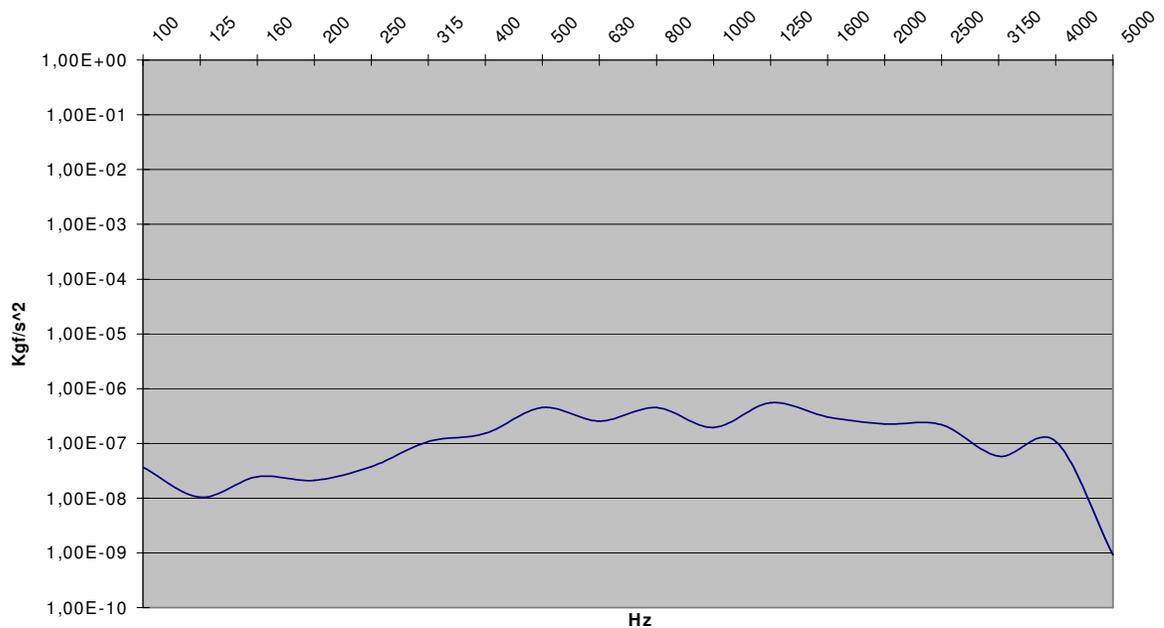


Figura 5.5 – Energia do Subsistema 2 com Amortecedor

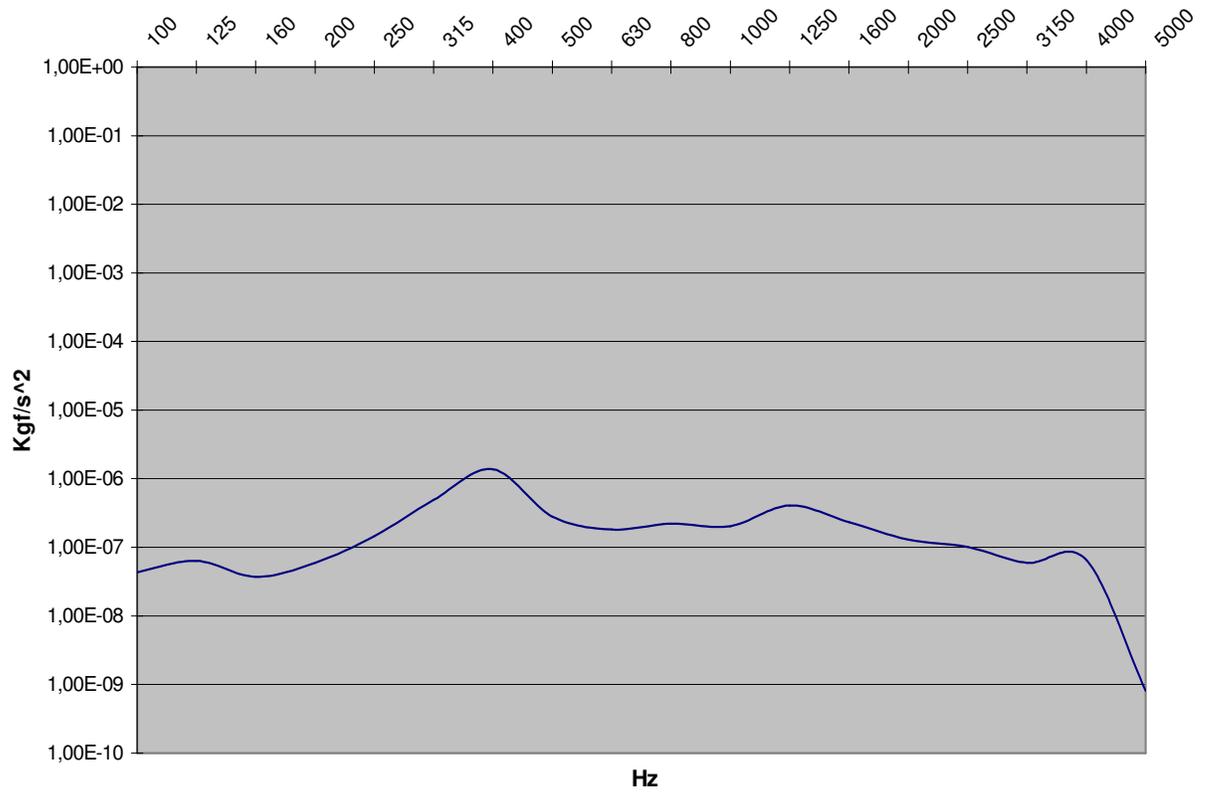


Figura 5.6 – Energia do Subsistema 3 com Amortecedor

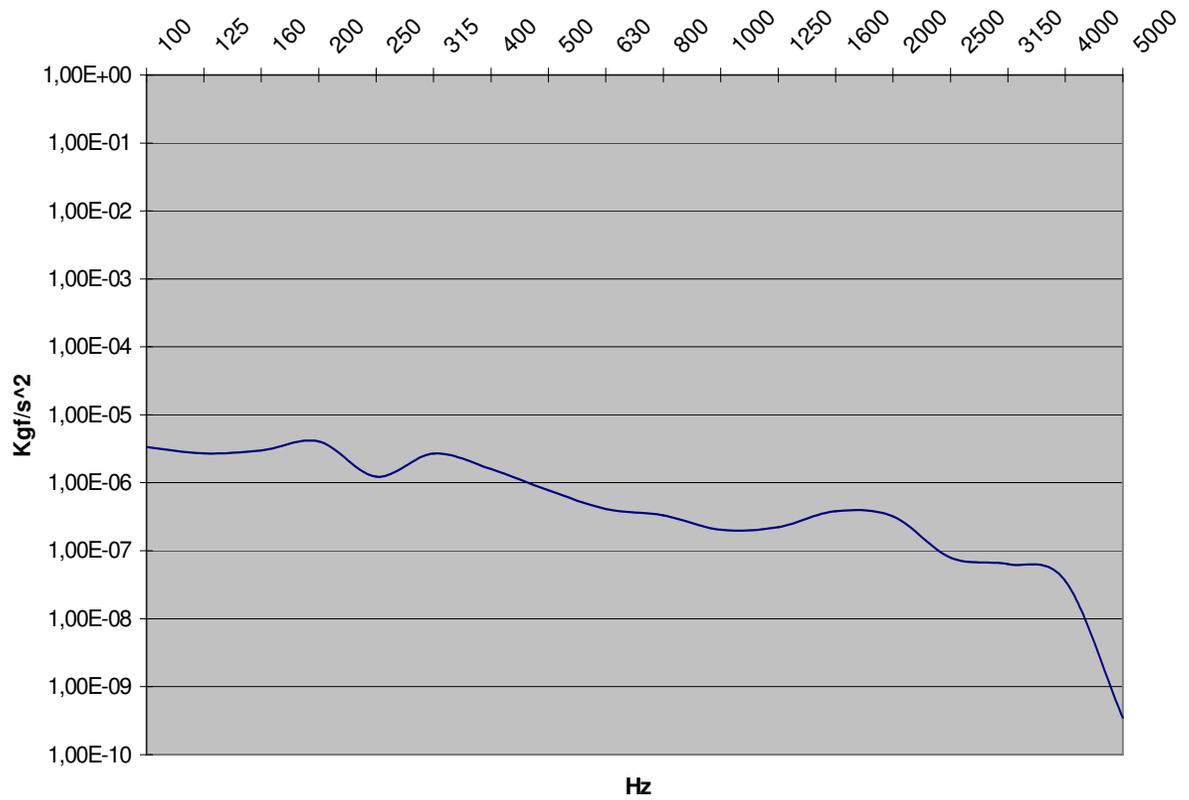


Figura 5.7 – Energia do Subsistema 4 com Amortecedor

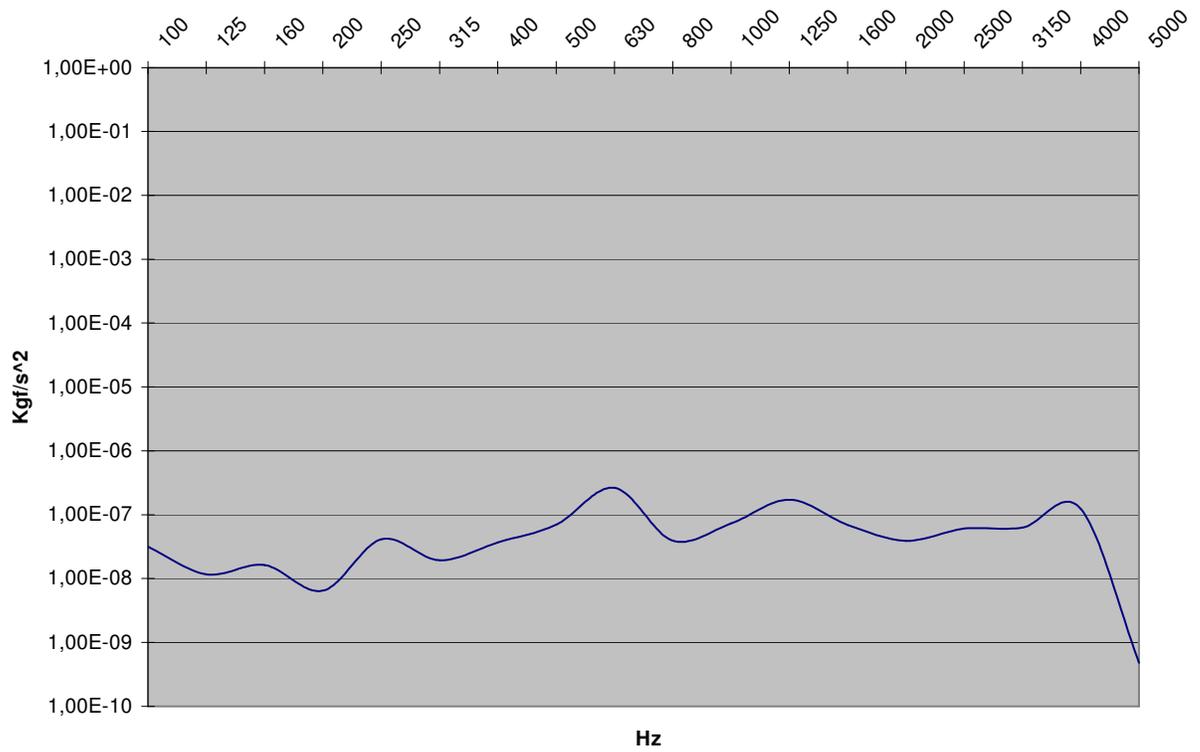


Figura 5.8 – Energia do Subsistema 5 com Amortecedor

Subsistemas sem a adição de amortecedor

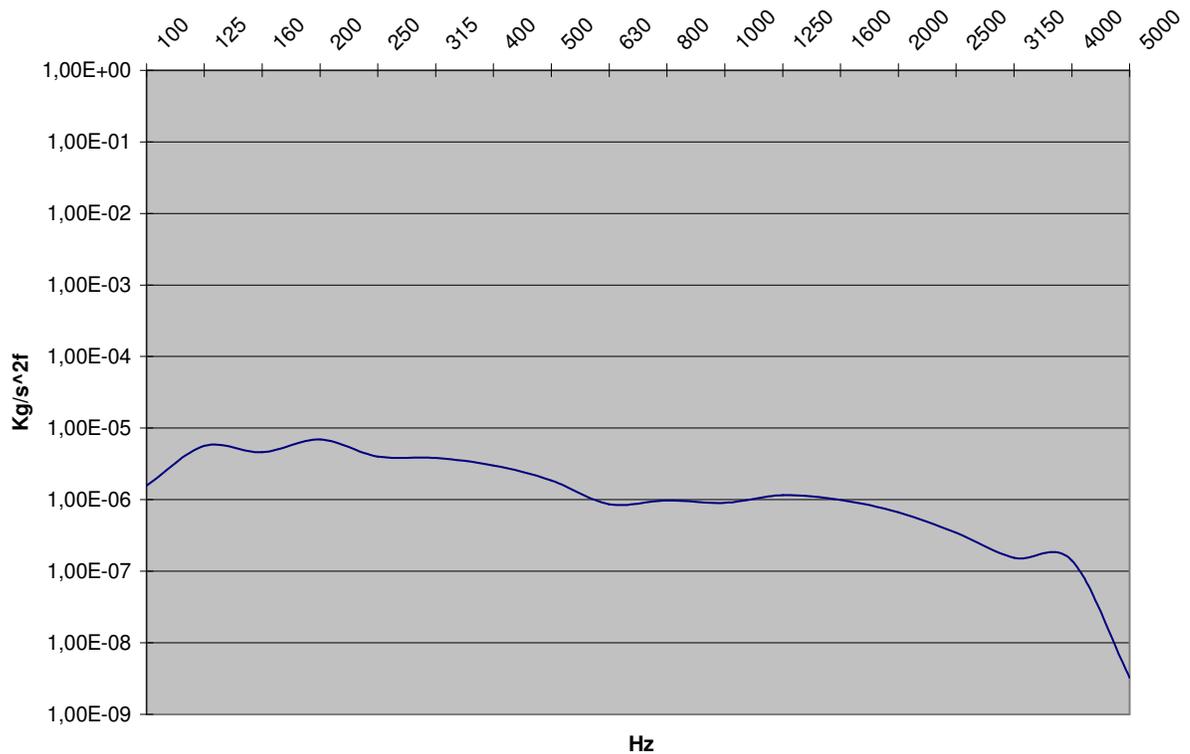


Figura 5.9 – Energia do Subsistema 1 sem Amortecedor

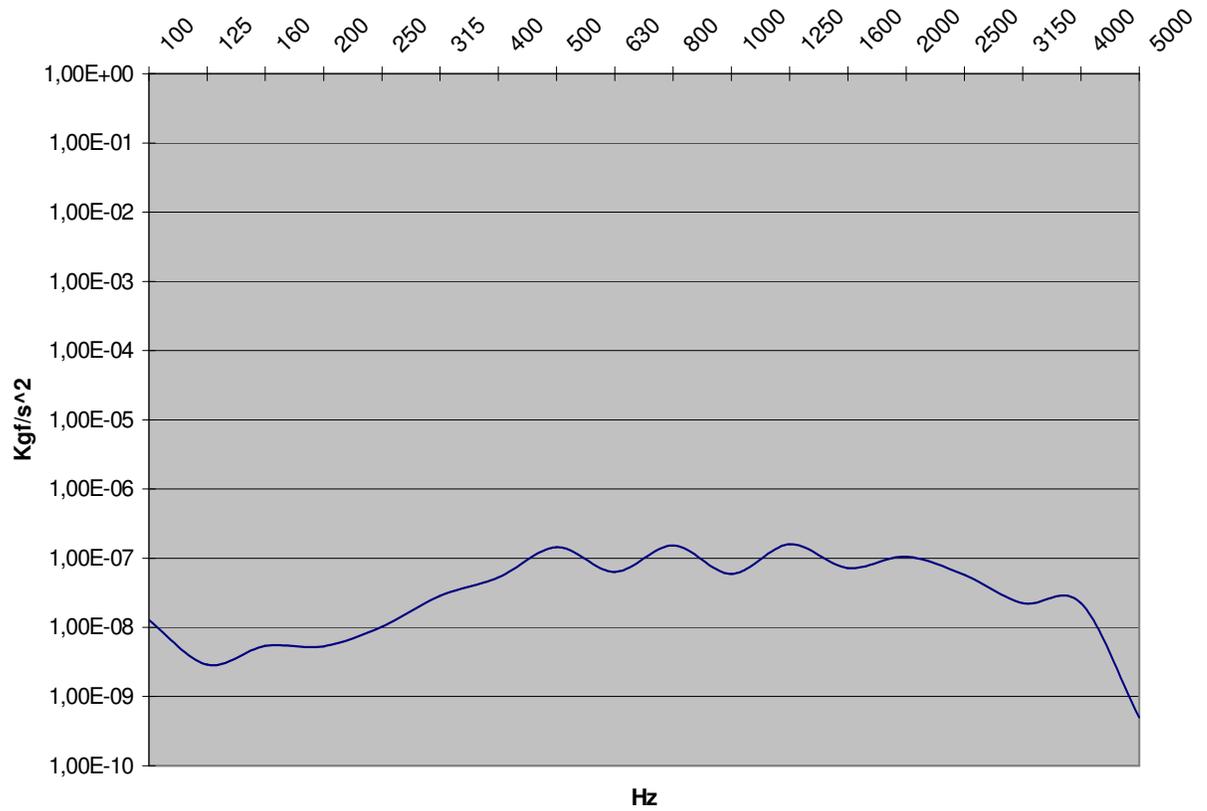


Figura 5.10 – Energia do Subistema 2 sem Amortecedor

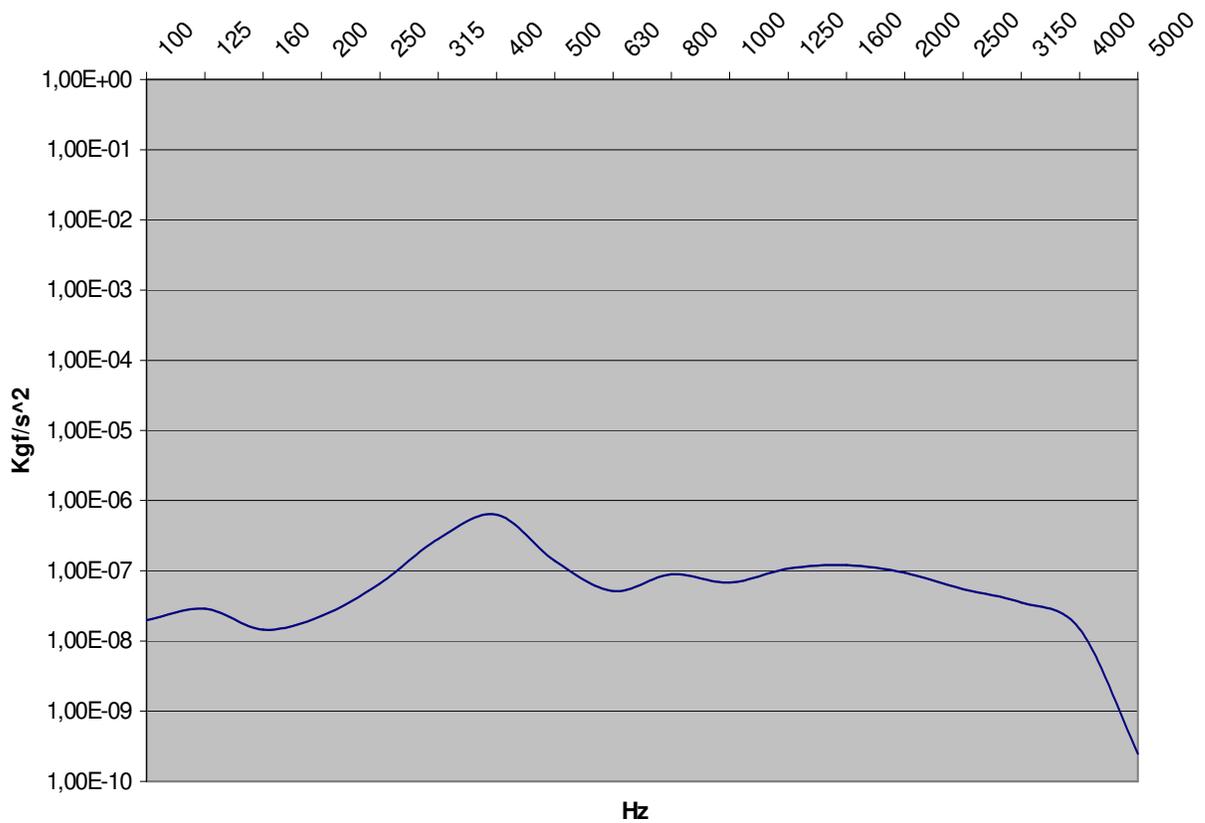


Figura 5.11 – Energia do Subistema 3 sem Amortecedor

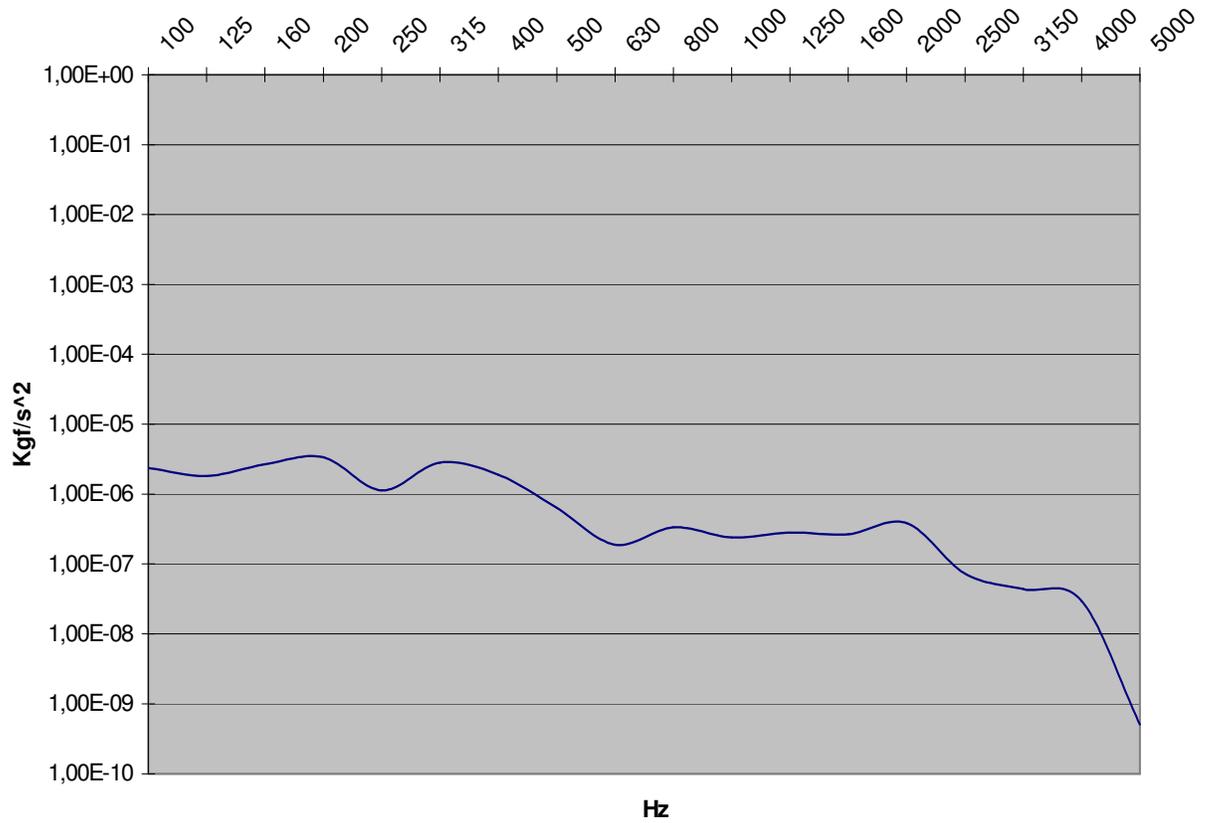


Figura 5.12 – Energia do Subsistema 4 sem Amortecedor

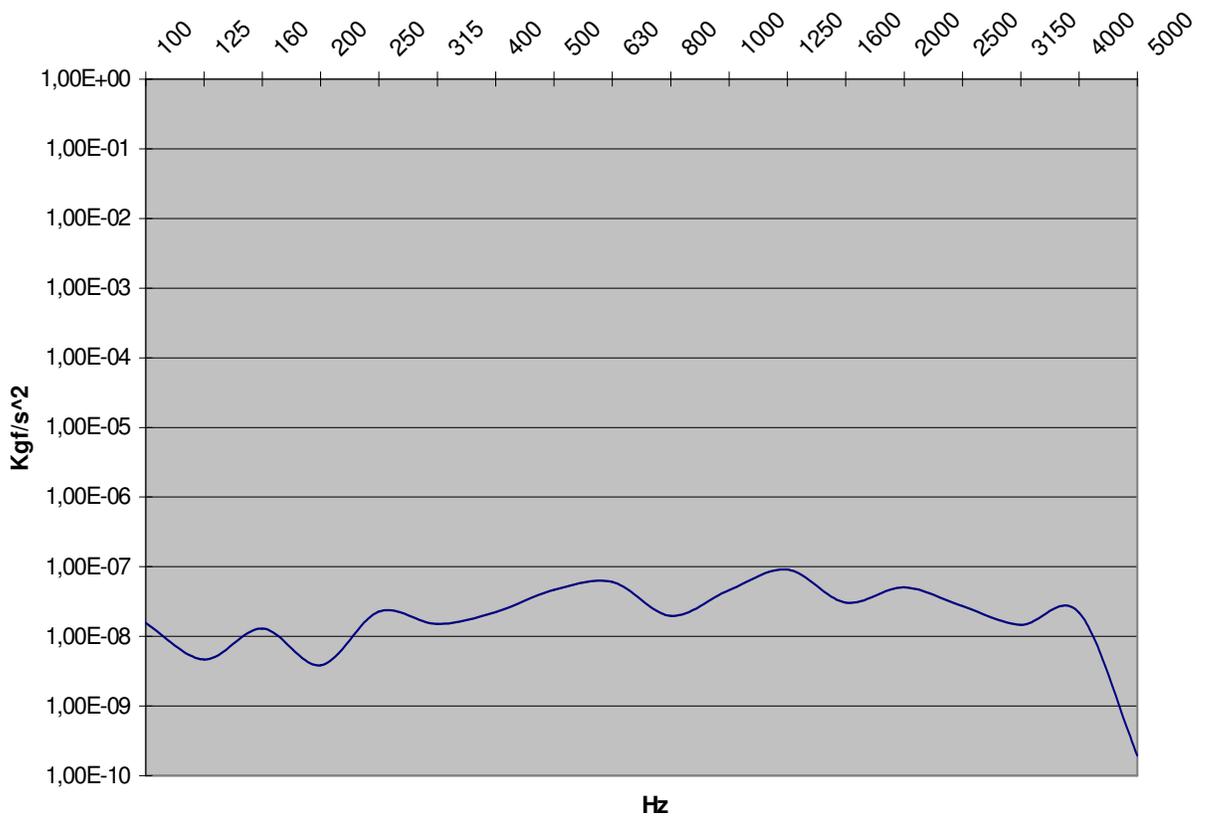


Figura 5.13 – Energia do Subsistema 5 sem Amortecedor

Quanto às energias cinéticas dos subsistemas da porta, pode-se salientar que o nível de energia para a situação com adição de amortecedor é consideravelmente maior, devido à sua potência de entrada também ser maior.

Outro ponto de relevância é que os subsistemas que apresentam as maiores energias também mostram altas contribuições em baixas frequências (até 500Hz com amortecedor e até 800 Hz sem amortecedor).

Através dos gráficos dos subsistemas 1 e 4 para a adição de amortecedor e também sem a adição de amortecedor há a percepção de que as maiores energias estão ali concentradas, devido à sua maior área, maior velocidade e por serem mais flexíveis à força ali aplicada.

Os outros subsistemas 2, 3 e 5 apresentam respostas mais baixas em frequências um pouco mais altas, como por exemplo, na faixa de frequências de 400 Hz a 2000 Hz, devido provavelmente a sua rigidez estrutural.

Em resumo, ao final desta etapa têm-se a potência de entrada média e as energias cinéticas para cada um dos cinco subsistemas em cada banda de um terço de oitava com adição e sem a adição do amortecedor (insonorizante) na porta do modelo Palio pelo método experimental.

5.3 – Parâmetro em SEA

5.3.1 – Configuração do Modelo

Antes de entrar com os dados obtidos através dos cálculos matemáticos para as potências de entrada com e sem adição de material, há a necessidade de se verificar o modelo e entrar com as propriedades dos materiais a serem utilizados na simulação computacional.

Desta forma foram feitas algumas conferências antes que se pudesse fazer qualquer simulação com o modelo. Para que se pudesse confiar totalmente no modelo construído foram cumpridas as etapas que são descritas a seguir:

1-Verificação das dimensões da porta

Durante esta etapa foi verificada a dimensão de cada subsistema para que se tenha um modelo o mais próximo da realidade da dimensão da porta do modelo Palio.

2-Verificação da espessura das placas

Foi feita a configuração do *setup* do AutoSea2 para que todos os subsistemas utilizassem a espessura de 0,8mm e foi configurado para reconhecer todas as placas como placas plana, isto é, o software reconheceria que todos os subsistemas seriam inteiramente planos sem os altos e baixos relevos dos subsistemas da porta, facilitando assim a simulação e a construção do modelo.

3-Verificação das propriedades do amortecedor

Foi configurado o *software* para que se reconheça a espessura do amortecedor (insonorizante) de 2 mm que é aplicado na porta do modelo Palio.

4-Verificação das junções de todos os subsistemas

Depois da construção do modelo, isto é, construção de cada subsistema em separado partiu-se então para a união de todos os subsistemas formando assim o modelo da porta do Palio. Em seguida, o software tem uma função chamada “*junctions*” que faz a junção de todos os subsistemas automaticamente tornando-os acoplados e confiáveis.

5-Aplicação das propriedades das placas nos subsistemas

Para o modelo da porta do Palio o *setup* do AutoSea2[®] foi configurado para que se utilizassem as propriedades já contidas na configuração do *software*, isto é, foram utilizados os valores da densidade, do módulo de elasticidade, e o módulo de cisalhamento para o aço em questão sem necessidade de entrar com estes dados.

6-Aplicação das propriedades do amortecedor nos subsistemas

Conforme descrito no capítulo II, onde foram calculados os módulos de elasticidade do material e sendo utilizado na simulação o valor médio e bem como o valor da densidade e o valor do coeficiente de Poisson que foram assumidos para a simulação, estes valores foram configurados no *setup* do AutoSea2[®] para que durante a execução do método numérico o *software* utilizasse como propriedades do material. O amortecedor ocupa uma área de 13% em relação ao tamanho da porta.

7-Inserção das bandas inicial e final para a simulação computacional

Para dar continuidade a etapa das configurações no AutoSea2[®] foi inserido no seu *setup* a banda inicial de 100 Hz e a banda final de 5000 Hz para que o AutoSea2[®] pudesse fazer as simulações nestas faixas de frequências.

8-Entrada com os fatores de perda (η) no software

A entrada dos dados ocorreu com a inserção dos valores obtidos através do método de potência de entrada, onde foi configurado via *software* que para cada faixa de frequências de 100 a 5000 Hz os valores correspondentes ao fator de perda (η) com a adição do amortecedor de 2mm (insonorizante) no painel externo da porta (lado interno) onde seria inserida a potência de entrada média. De forma similar ocorreu também para a simulação numérica da porta sem o amortecedor no painel externo, onde foram inseridos os valores do fator perda para a porta sem amortecedor.

9-Posicionamento da potência de entrada

E para finalizar as configurações foi escolhido o local onde seria inserida a potência de entrada média no painel externo da porta, bastando somente, entrar com os valores da potência de entrada média para a adição de amortecedor e a potência de entrada média sem a adição de amortecedor para a simulação computacional, calculadas através do método experimental. Com isso seriam obtidos os gráficos da energia para cada subsistema e bem como gráficos das velocidades para a porta do modelo Palio.

5.3.2 – Validação do Modelo

Para Taner Onsay [20], depois da construção do modelo estar completa e checados todos os detalhes para uma performance confiável, segue-se então para o processo de validação do modelo para que se obtenham resultados confiáveis através da simulação. Em geral, para se validar um modelo, há possibilidade de se utilizar dois caminhos distintos utilizando-se de uma contagem dos modos para um determinado segmento usando FEM (Elementos Finitos) ou técnica de testes. Para o caso das portas de um veículo automotor e com sistemas altamente complexos, adotou-se uma validação através de técnicas de testes, por se tratar de comparações feitas através de aplicação de amortecedores (insonorizantes) na

porta, fazendo com que este tipo de tratamento seja significativamente percebido através do um espectro como um efeito eficaz na porta do veículo.

A validação do modelo compreenderá em se comparar os resultados obtidos através da excitação feita pelo *shaker* na porta, experimentalmente, com a adição do amortecedor de 2mm de espessura em seu painel externo (aplicação lado interno da porta), por se tratar do amortecedor utilizado hoje em escala industrial na FIAT Automóveis. Bem como, será utilizado na simulação computacional numérica a adição do amortecedor de 2mm no painel externo, portanto, será feita a comparação entre as energias cinéticas de cada subsistema correlacionando o método experimental com o método numérico.

No presente trabalho, o modelo começou a ser validado de uma forma mais simplificada possível, procurando interpretar o comportamento de cada subsistema:

Primeiramente, foi posicionada a potência de entrada média na parte central do painel externo e inserindo os valores de amortecimento (η) para o amortecedor de 2mm. A figura 5.14 mostra a localização exata da potência de entrada na porta.

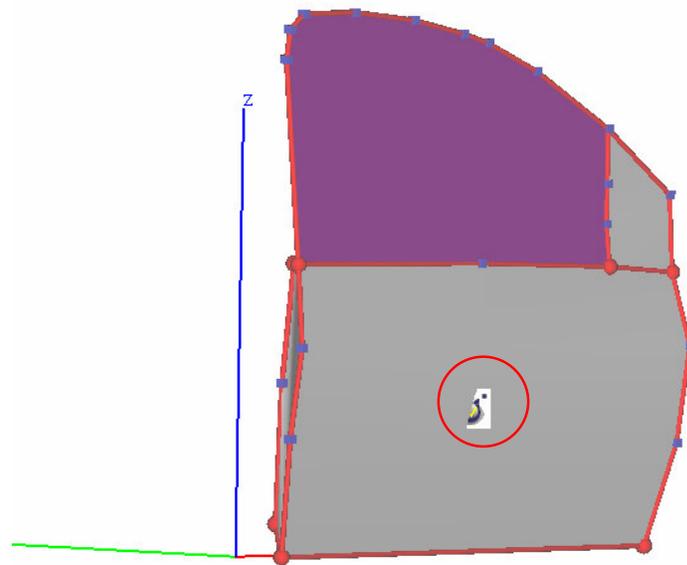


Figura 5.14 – Posicionamento da potência de entrada média na porta

Em seguida, se iniciou a simulação computacional com os dados já alimentando o sistema do AutoSea2[®]. Com o comando já executado se obteve os seguintes gráficos de energias para o subsistema 1 (painel externo) com adição de amortecedor na porta.

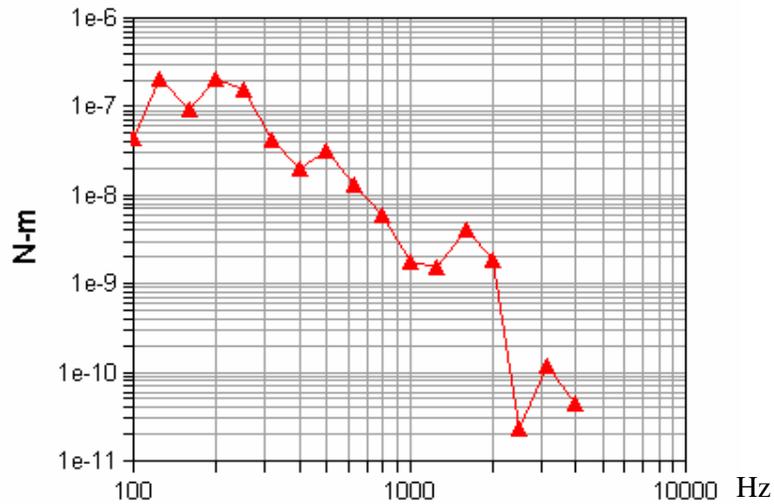


Figura 5.15 – Energia do subsistema 1 com amortecedor

De forma similar, com a mesma potência de entrada média e com a adição do amortecedor foram gerados os gráficos para os demais subsistemas da porta do modelo Palio. Sendo que os mesmos serão apresentados a seguir, em gráficos extraídos do AutoSea2[®].

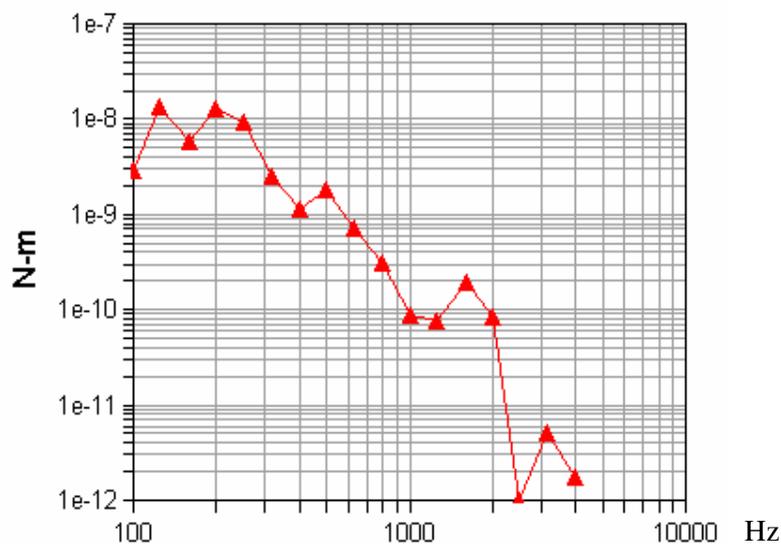


Figura 5.16 – Energia do subsistema 2 com amortecedor

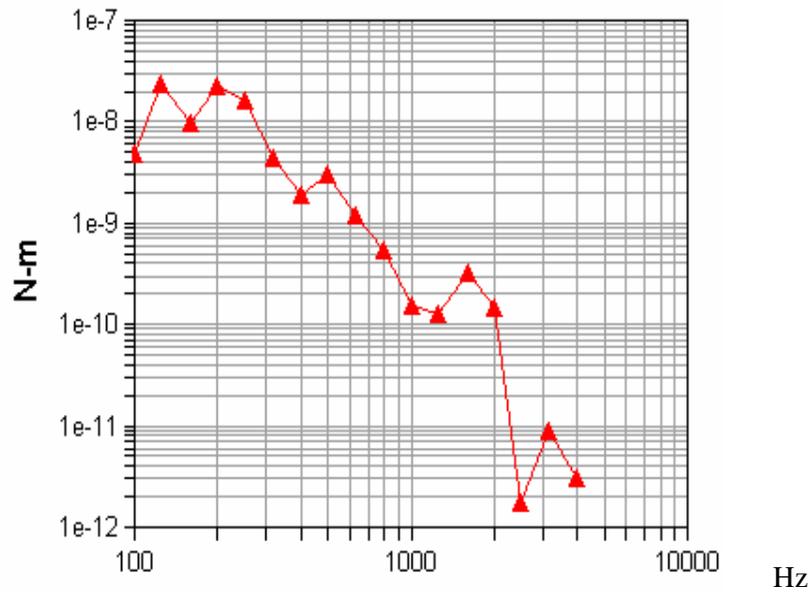


Figura 5.17– Energia do subsistema 3 com amortecedor

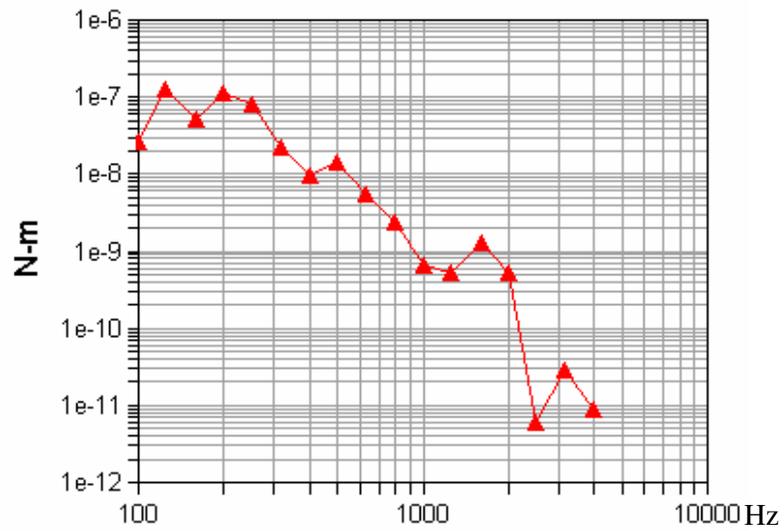


Figura 5.18– Energia do subsistema 4 com amortecedor

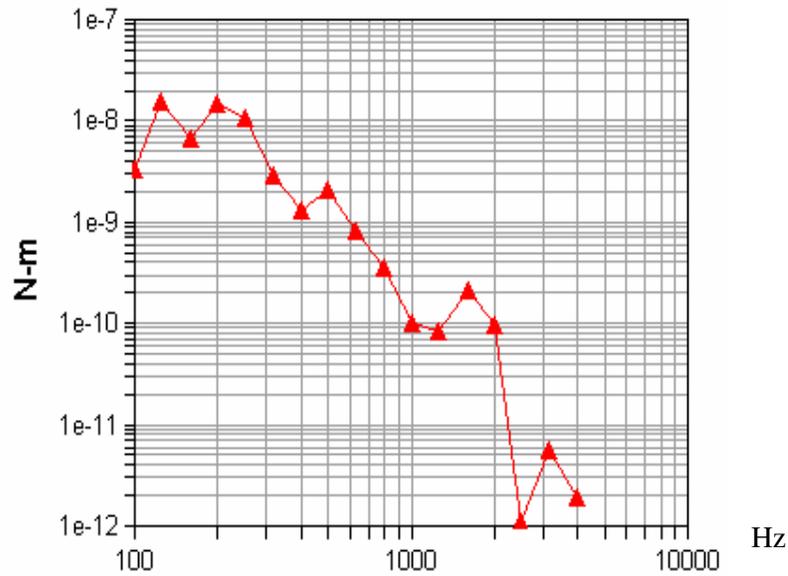


Figura 5.19 – Energia do subsistema 5 com amortecedor

De forma análoga, foi feito a configuração dos valores do amortecimento (fator de perda) sem a adição de amortecedor na porta, sendo que esta reconfiguração foi feita via *software* AutoSea2® e em seguida reprocessado a simulação via *software* agora sem a adição de amortecedor (insonorizante) em relação às energias cinéticas de cada subsistema para cada bandas de um terço de oitava. Com isso se obteve os gráficos das energias cinéticas sem a adição do amortecedor no subsistema 1 da porta.

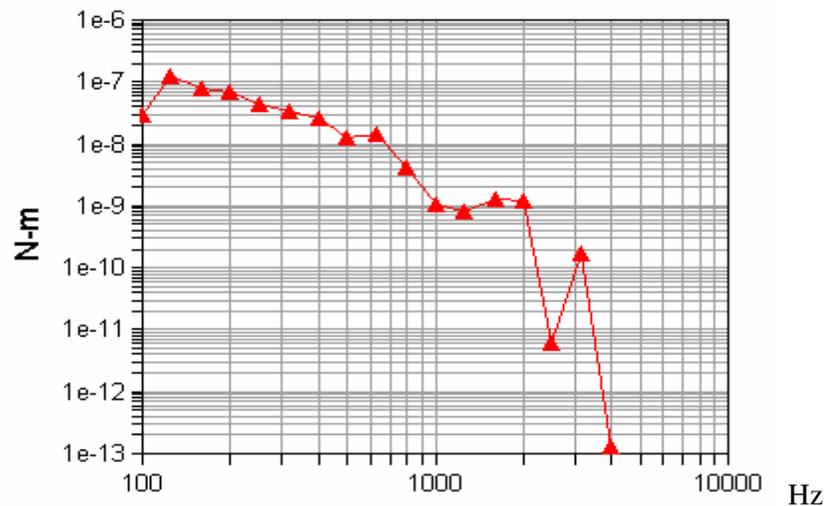


Figura 5.20 – Energia do subsistema 1 sem amortecedor

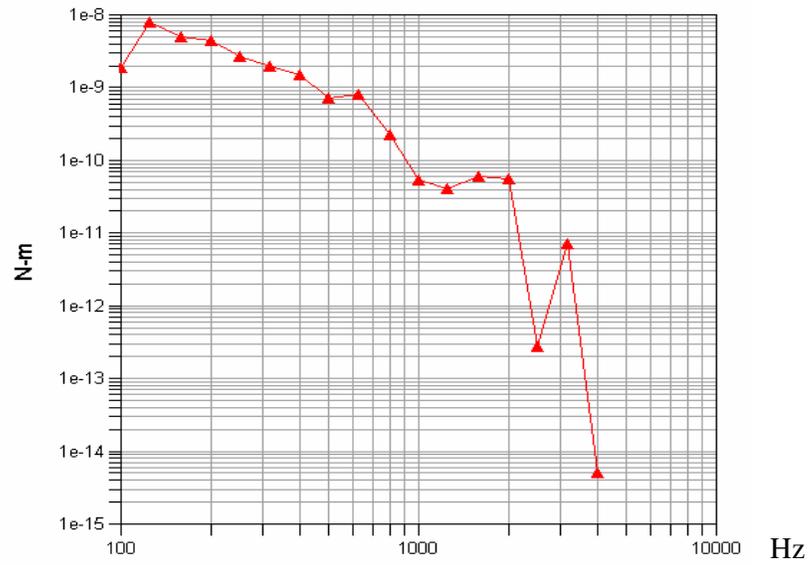


Figura 5.21 – Energia do subsistema 2 sem amortecedor

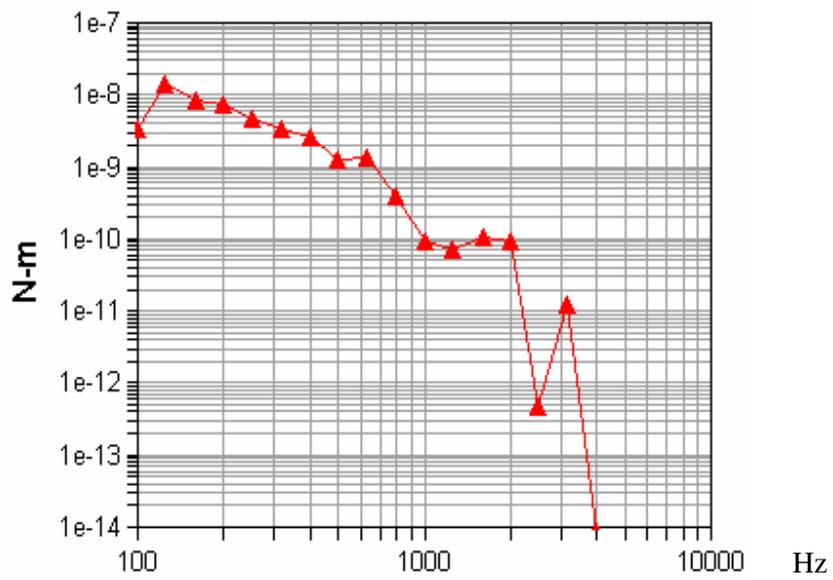


Figura 5.22 – Energia do subsistema 3 sem amortecedor

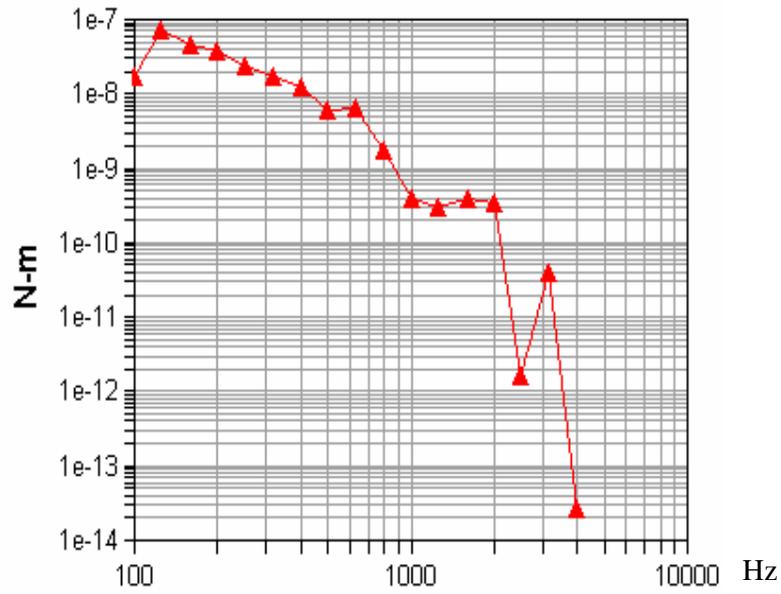


Figura 5.23 – Energia do subsistema 4 sem amortecedor

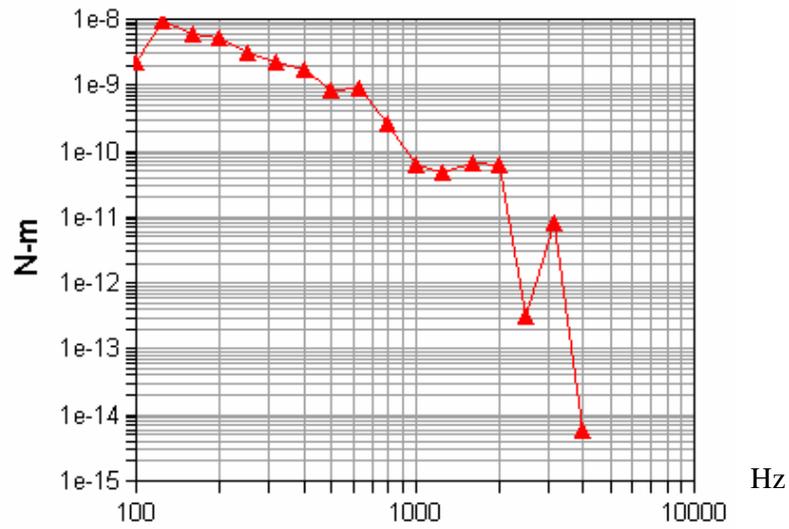


Figura 5.24 – Energia do subsistema 5 sem amortecedor

Diante dos gráficos apresentados há a necessidade se investigar com uma maior atenção o que está ocorrendo com o modelo construído no AutoSea2[®], fazendo outras simulações com o próprio modelo tendo com objetivo averiguar o que houve de errado com o método numérico utilizado.

Dando prosseguimento aos testes de validação do modelo, foi calculado o fator de perda (η) para estruturas metálicas considerando a impossibilidade de cálculo via software foi adotando a seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{0,1}{\sqrt{f}}, \text{ sendo } f \text{ a frequência central em Hz.} \quad (5.1)$$

Tabela 5.17 – Fator de perda para estruturas metálicas

Freq. [Hz]	Amort. [η]
100	0,0100
125	0,0090
160	0,0079
200	0,0071
250	0,0063
315	0,0056
400	0,0050
500	0,0045
630	0,0040
800	0,0035
1000	0,0032
1250	0,0028
1600	0,0025
2000	0,0023
2500	0,0020
3150	0,0018
4000	0,0016
5000	0,0014

Os valores da coluna do amortecimento serviram como “*input*” no AutoSea2, pois cada subsistema da porta, exceto o painel externo, foram alimentados com os valores da tabela acima por se tratar de estruturas fortemente acopladas. Para cada faixa de frequência há um valor correspondente ao fator de perda para o subsistema, pois para a simulação com a adição de amortecedor os valores acima foram incorporados aos subsistemas 2, 3, 4 e 5 sendo que somente o painel externo estava configurado para os fatores de perda do amortecedor de 2 mm. Da mesma forma se procedeu para a simulação da porta sem o amortecedor fazendo com que somente os subsistemas 2, 3, 4 e 5 estivesse com o fator de perda apresentado acima.

5.3.2.1 – Densidade Modal

A densidade modal, para cada faixa de frequências, deve ser suficientemente elevada para permitir uma adequada troca de energia entre os grupos de modos de cada subsistema.

Sem amortecedor

Subsistema 1

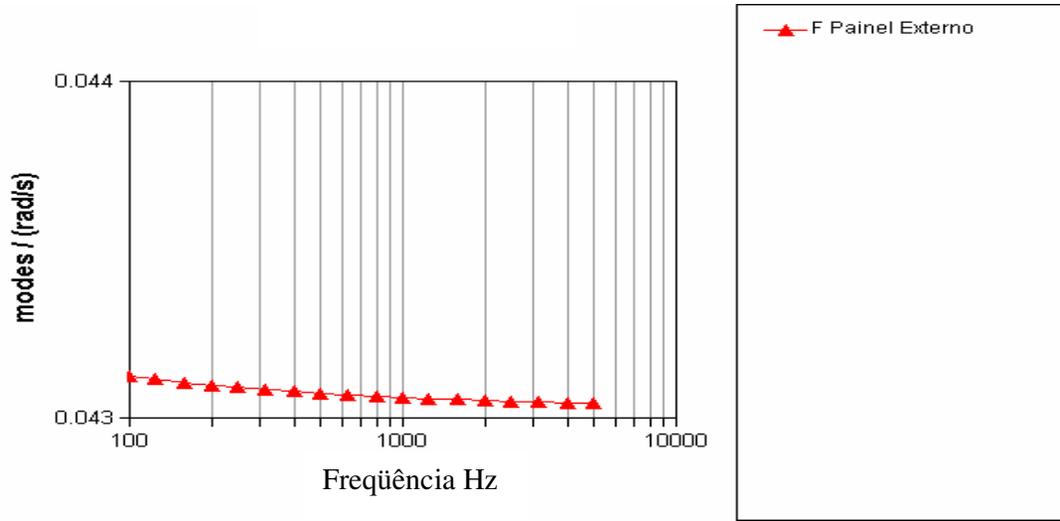


Figura 5.25 – Densidade modal do subsistema 1 sem amortecedor

Subsistema 2

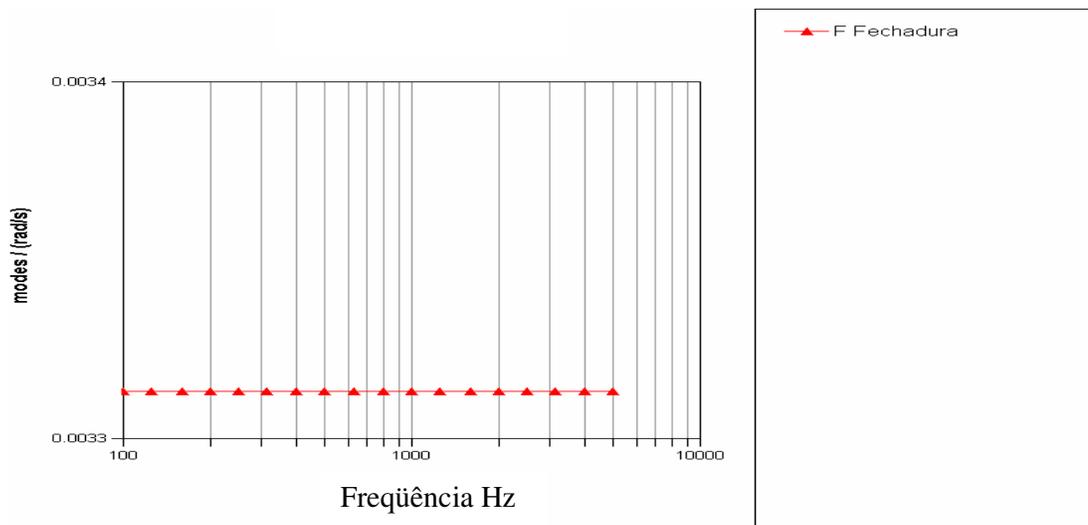


Figura 5.26 – Densidade modal do subsistema 2 sem amortecedor

Subsistema 3

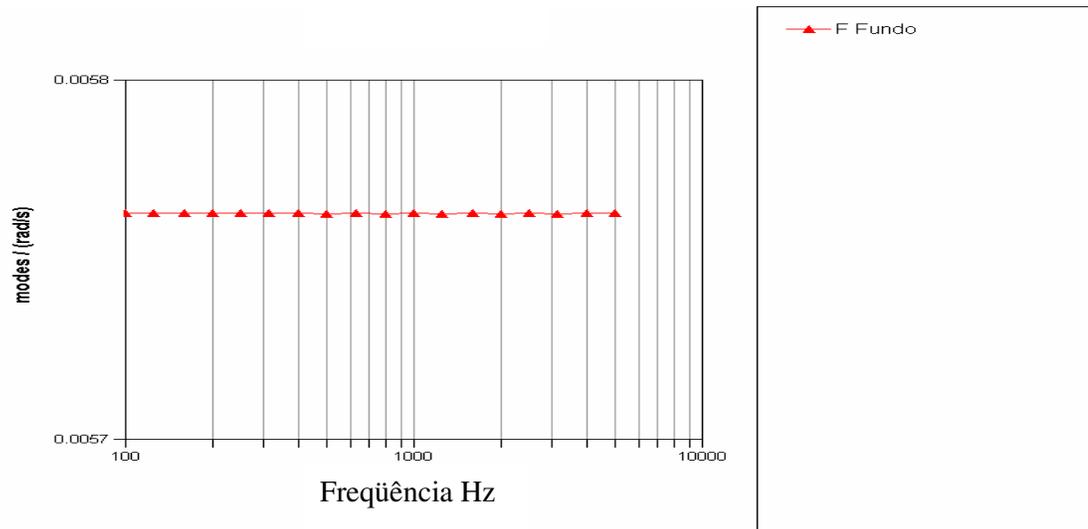


Figura 5.27 – Densidade modal do subsistema 3 sem amortecedor

Subsistema 4

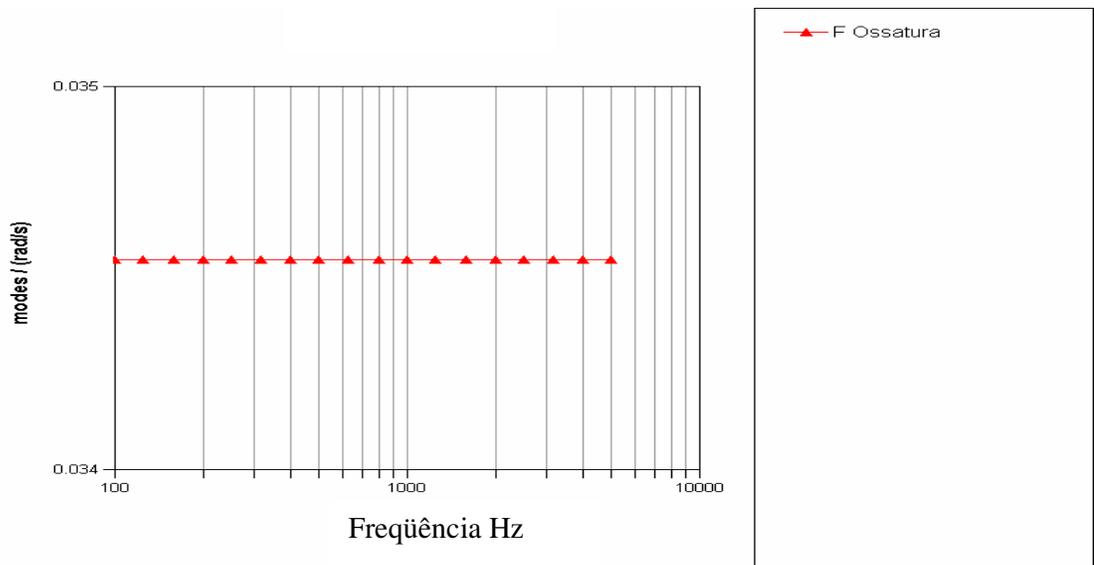


Figura 5.28 – Densidade modal do subsistema 4 sem amortecedor

Subsistema 5

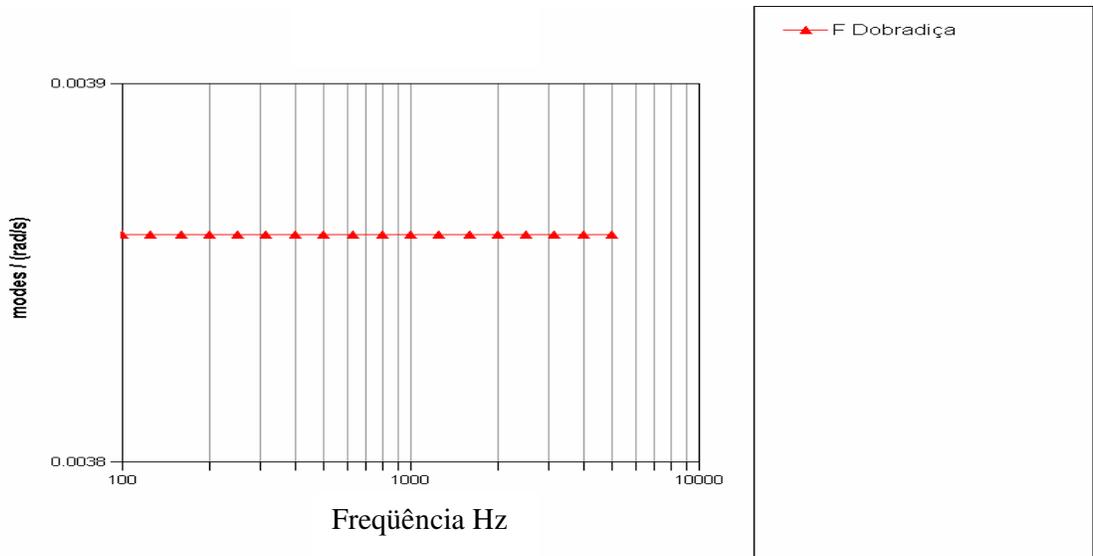


Figura 5.29 – Densidade modal do subsistema 4 sem amortecedor

Com amortecedor:

Subsistema 1

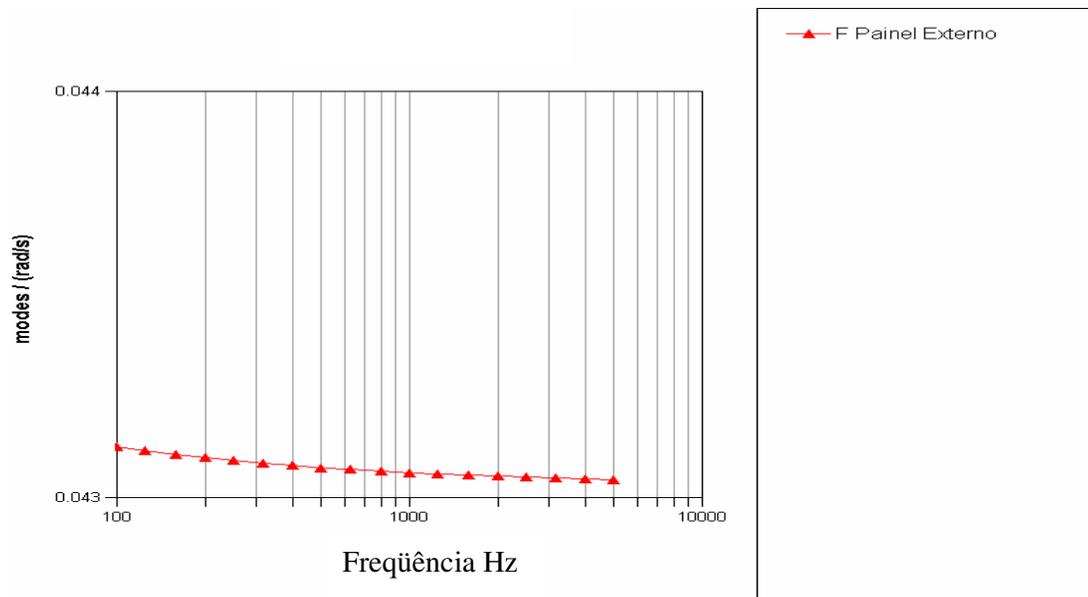


Figura 5.30 – Densidade modal do subsistema 1 com amortecedor

Subsistema 2:

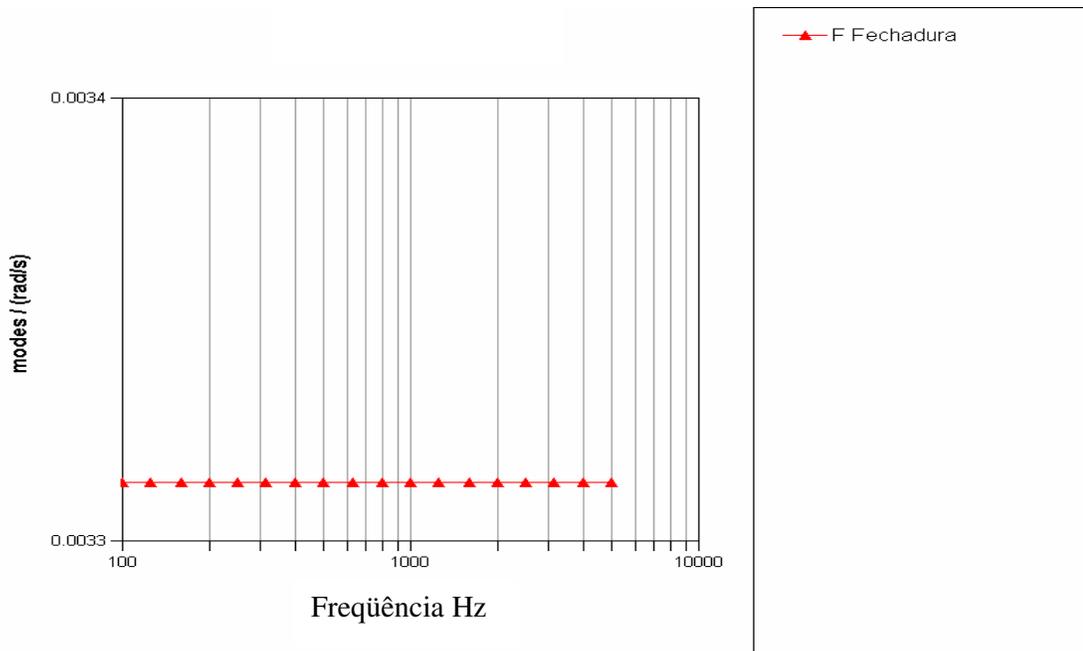


Figura 5.31 – Densidade modal do subsistema 2 com amortecedor

Subsistema 3:

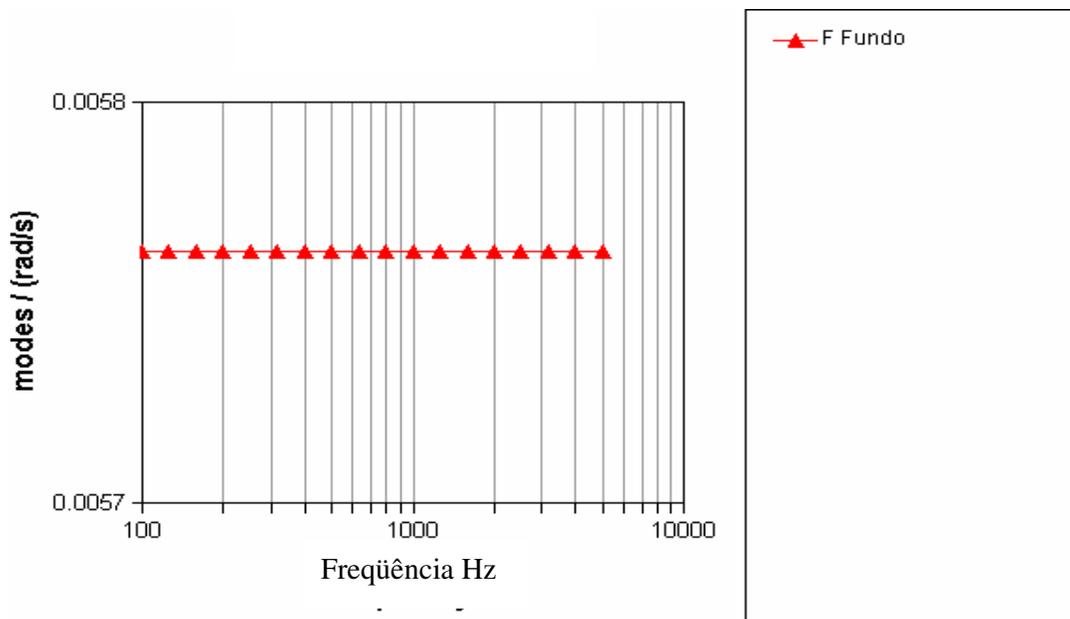


Figura 5.32 – Densidade modal do subsistema 3 com amortecedor

Subsistema 4:

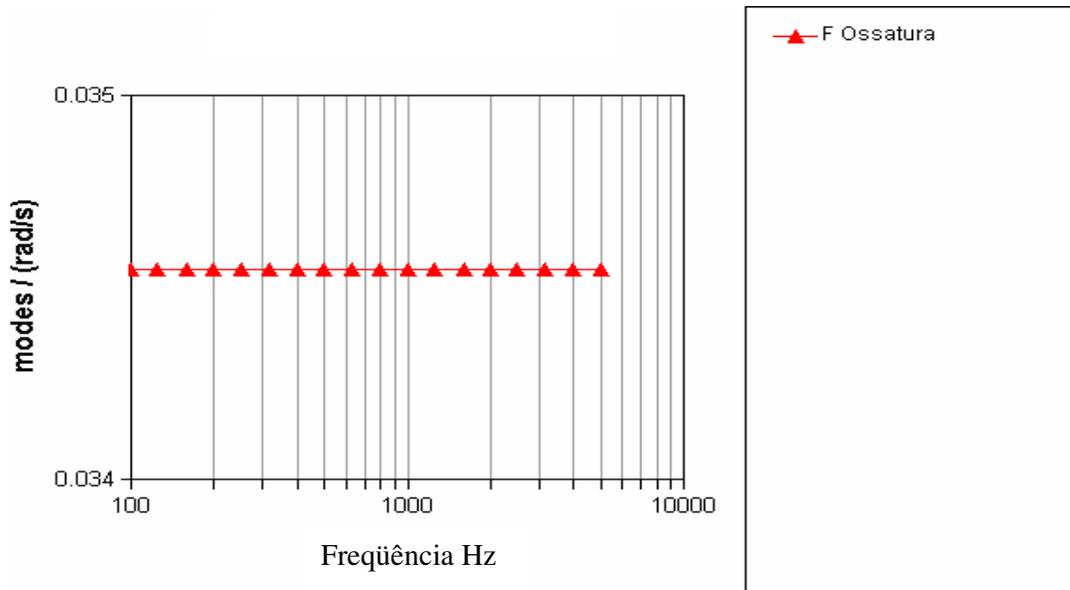


Figura 5.33 – Densidade modal do subsistema 4 com amortecedor

Subsistema 5:

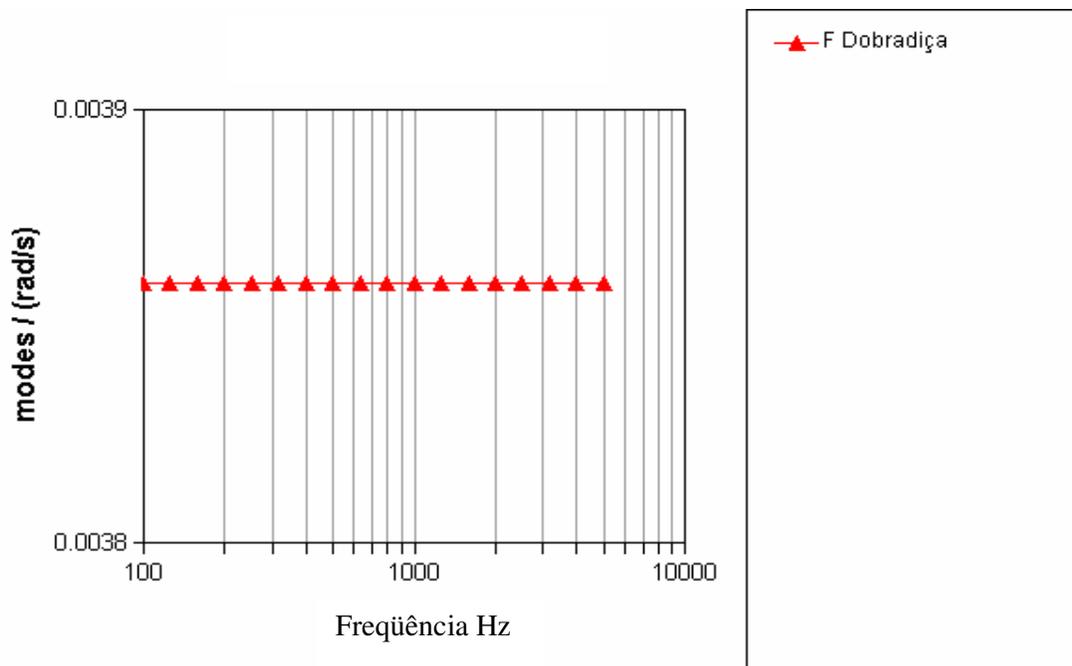


Figura 5.34 – Densidade modal do subsistema 5 com amortecedor

Diante da apresentação dos gráficos da densidade modal, foi constada que os subsistemas 1 e 4 (painel externo e ossatura) tanto para a adição de amortecedor quanto sem amortecedor apresentaram valores maiores em relação aos demais subsistemas por terem áreas maiores e portanto são os melhores subsistemas de densidade modal.

5.3.2.2 – Número de modos por faixa de frequência

O número de modos por banda normalmente, é recomendado que seja no mínimo de 6 modos sendo que o valor ideal é de 10 modos por faixa de frequência para uma boa troca de energia.

Desta forma foram obtidos gráficos com o n° de modos por faixa de frequência.

Sem amortecedor

Subsistema 1

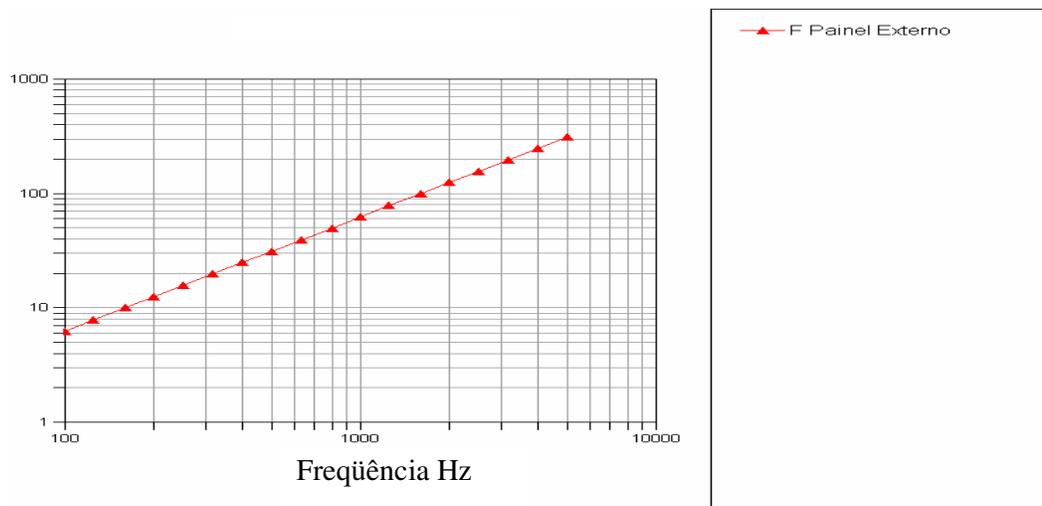


Figura 5.35 – Número de modos do subsistema 1 sem amortecedor

Subsistema 2

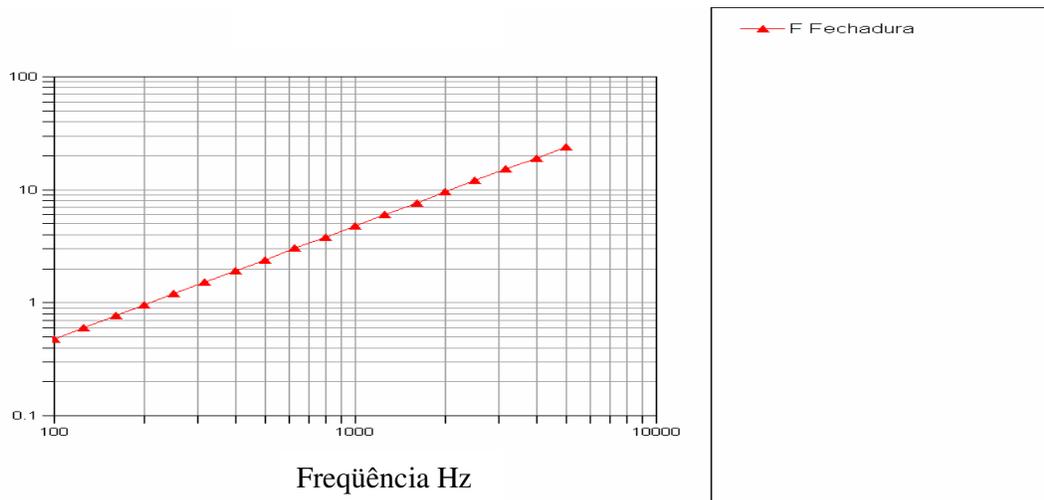


Figura 5.36 – Número de modos do subsistema 2 sem amortecedor

Subsistema 3

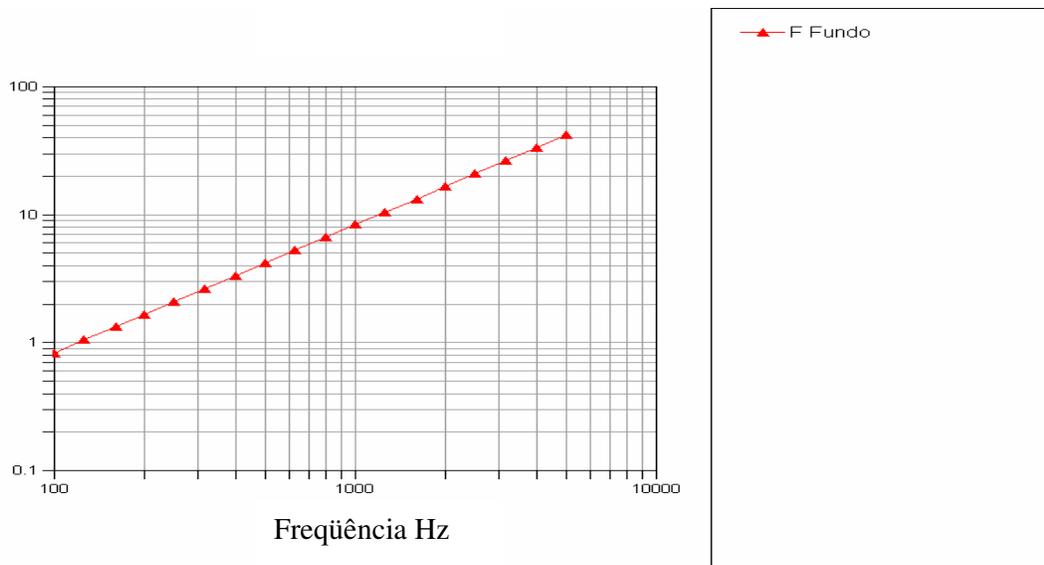


Figura 5.37 – Número de modos do subsistema 3 sem amortecedor

Subsistema 4

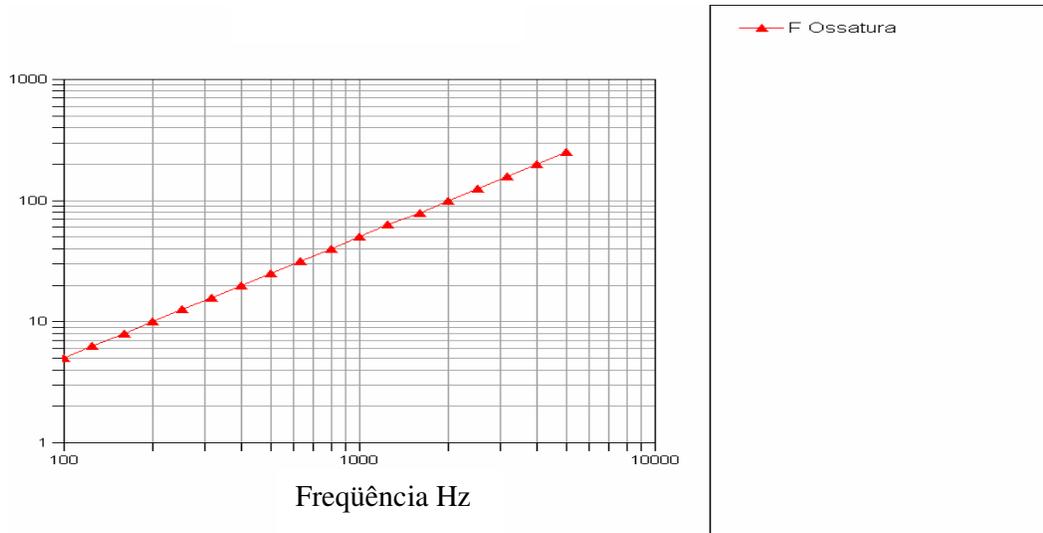


Figura 5.38 – Número de modos do subsistema 4 sem amortecedor

Subsistema 5

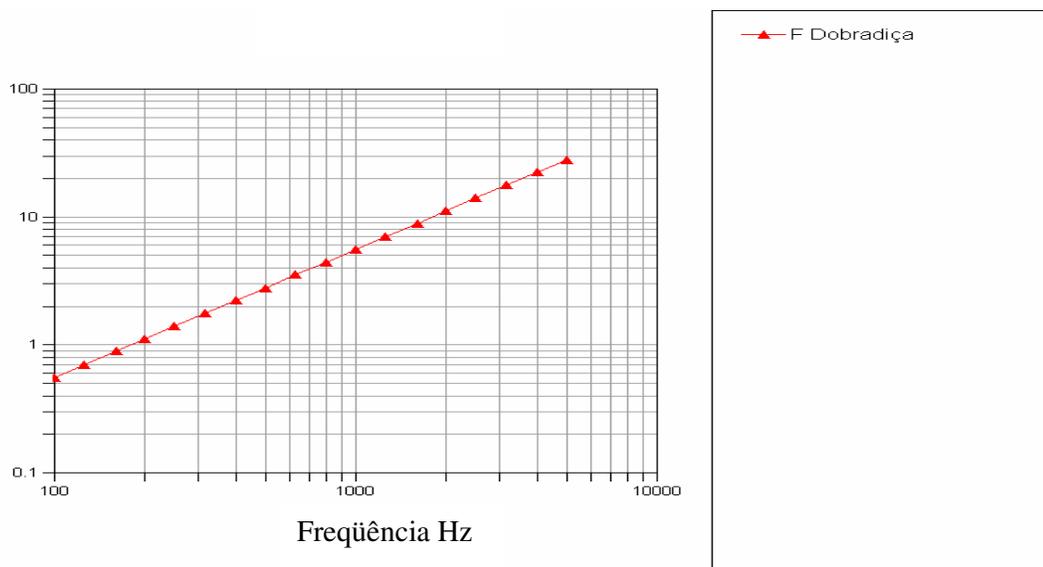


Figura 5.39 – Número de modos do subsistema 5 sem amortecedor

Com amortecedor

Subsistema 1

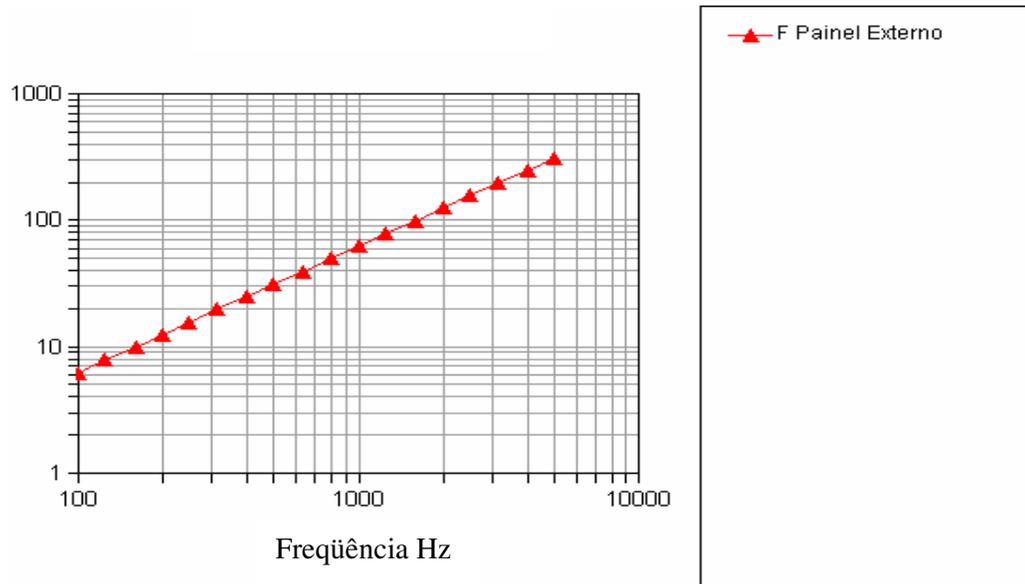


Figura 5.40 – Número de modos do subsistema 1 com amortecedor

Subsistema 2

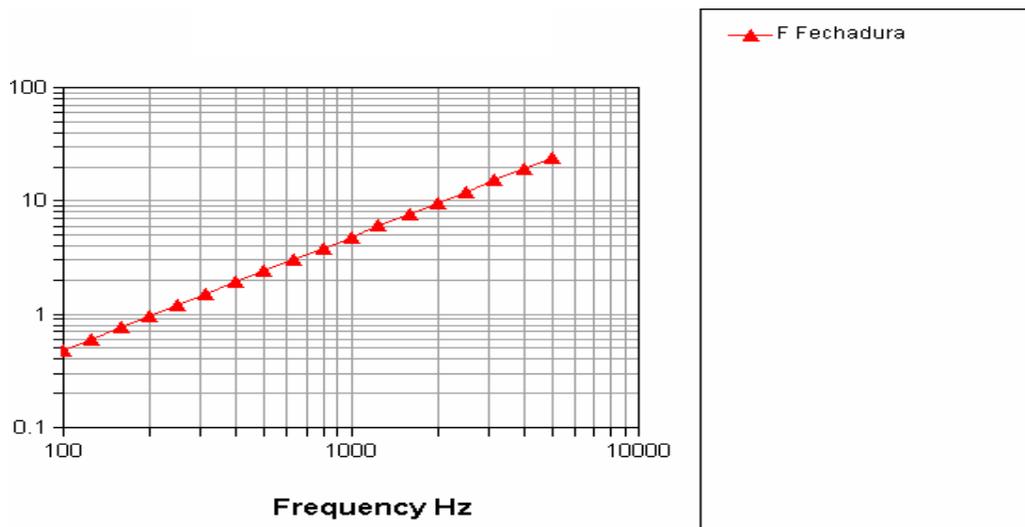


Figura 5.41 – Número de modos do subsistema 2 com amortecedor

Subsistema 3

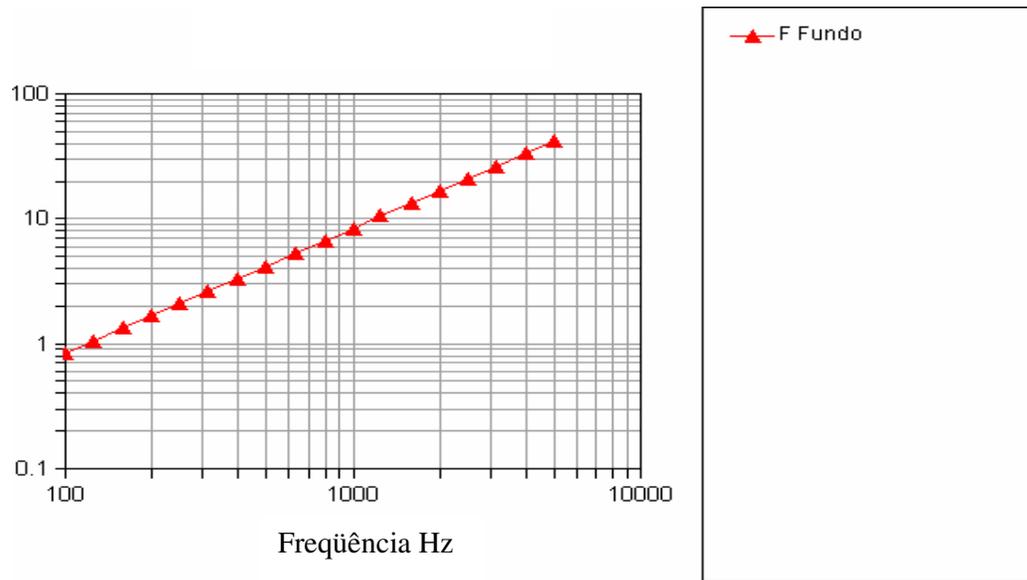


Figura 5.42 – Número de modos do subsistema 3 com amortecedor

Subsistema 4

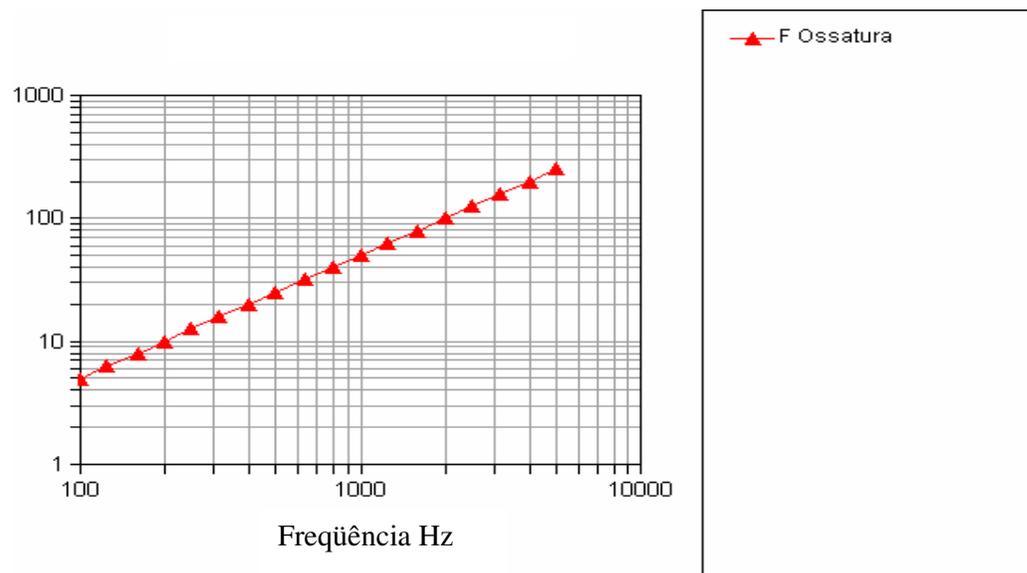


Figura 5.43 – Número de modos do subsistema 4 com amortecedor

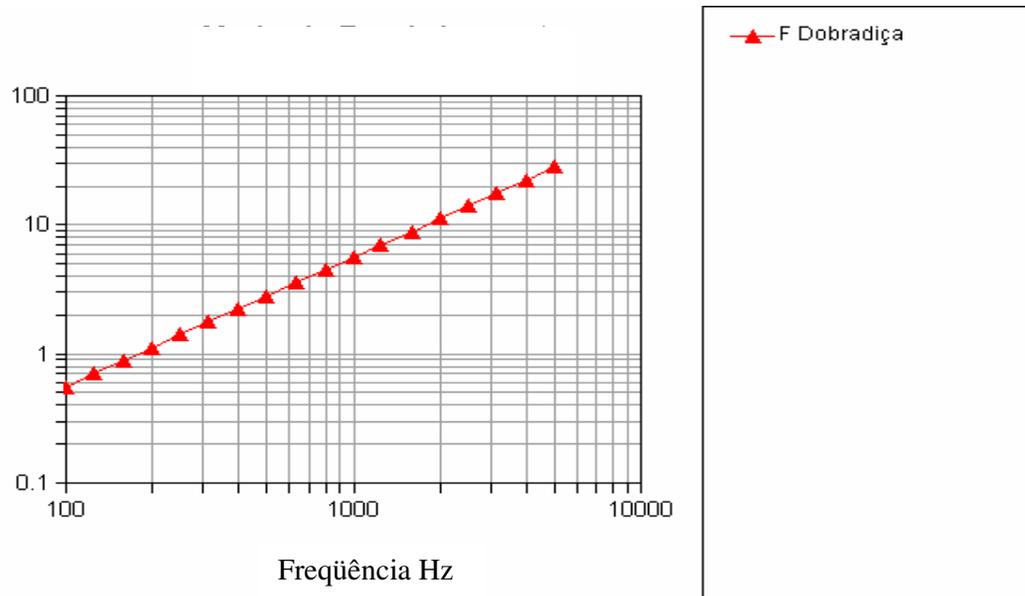
Subsistema 5

Figura 5.44 – Número de modos do subsistema 5 com amortecedor

Com as análises dos gráficos foram verificadas que os subsistemas 1 e 4 (painel externo e ossatura) apresentam os requisitos básico para a aplicação teoria de SEA, apresentando o n° de modos suficiente. Os demais subsistemas serão encontrados dificuldades, pois não há n° de modos para se aplicar a teoria de SEA.

5.3.2.3 – Modal Overlap Factor (MOF)

Complementando o *Modal Overlap Fator* (MOF) é adotado atualmente com um critério que se recomenda o fator de superposição modal (MOF) deve ser maior que 0,33 aproximadamente para se ter uma boa troca de energia vibratória entre os subsistemas. Se este valor for muito menor, não se pode esperar bons resultados na simulação.

Sem Amortecedor

Subsistema 1

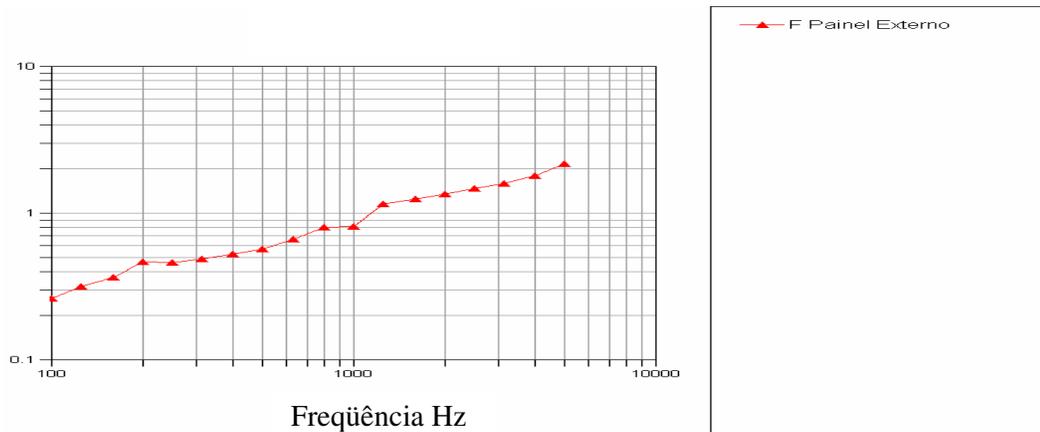


Figura 5.45 – Modal overlap factor do subsistema 1 sem amortecedor

Subsistema 2

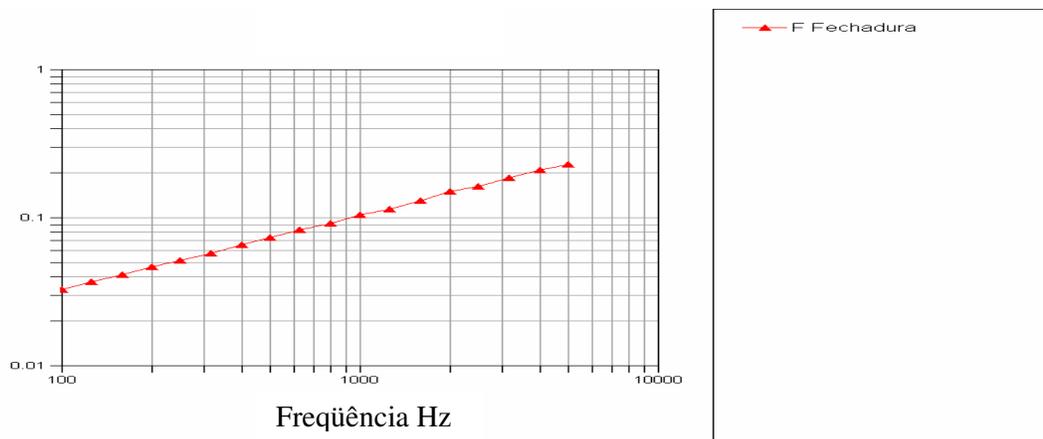


Figura 5.46 – Modal overlap factor do subsistema 2 sem amortecedor

Subsistema 3

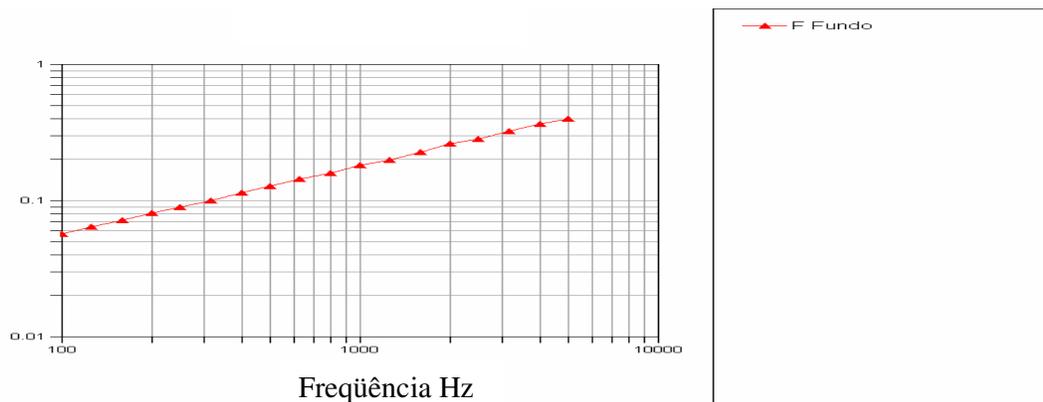


Figura 5.47 – Modal overlap factor do subsistema 3 sem amortecedor

Subsistema 4

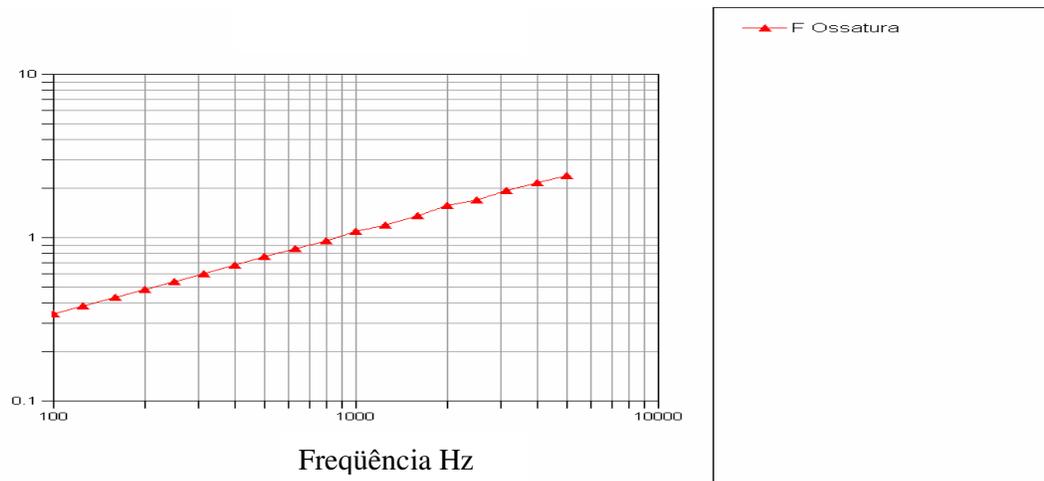


Figura 5.48 – Modal overlap factor do subsistema 4 sem amortecedor

Subsistema 5

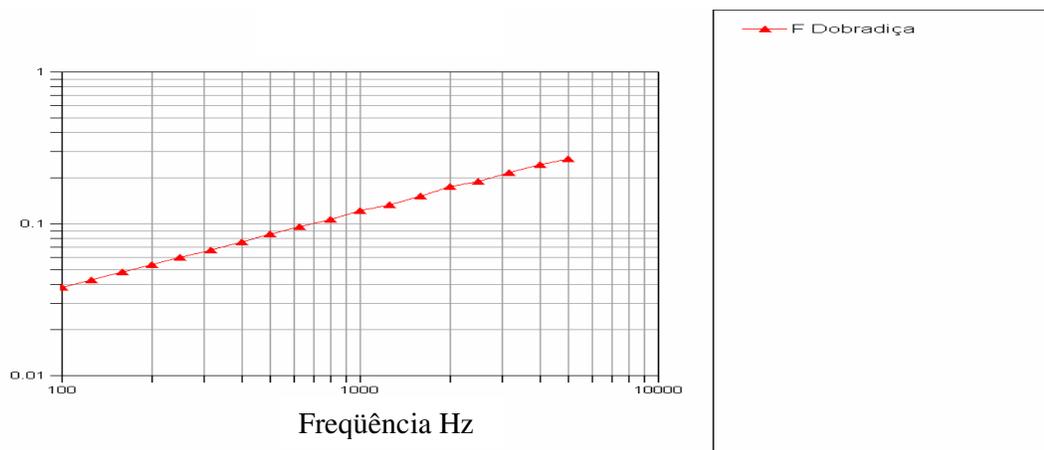


Figura 5.49 – Modal overlap factor do subsistema 5 sem amortecedor

Com Amortecedor

Subsistema 1

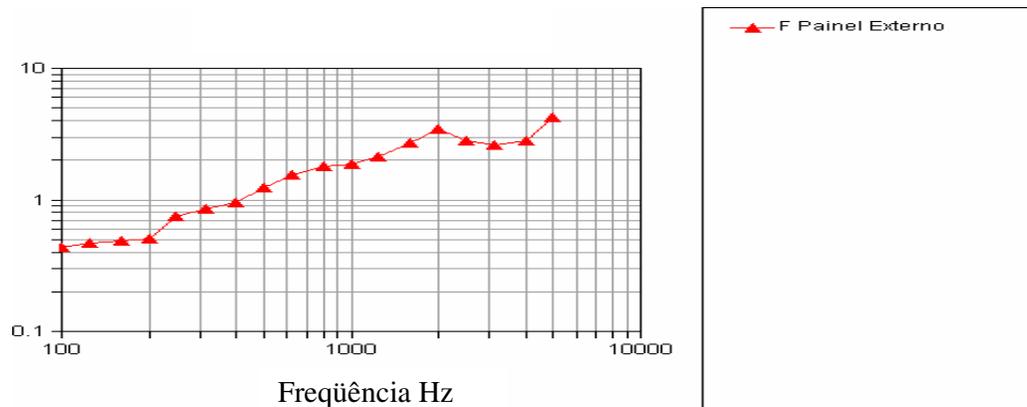


Figura 5.50 – Modal overlap factor do subsistema 1 com amortecedor

Subsistema 2

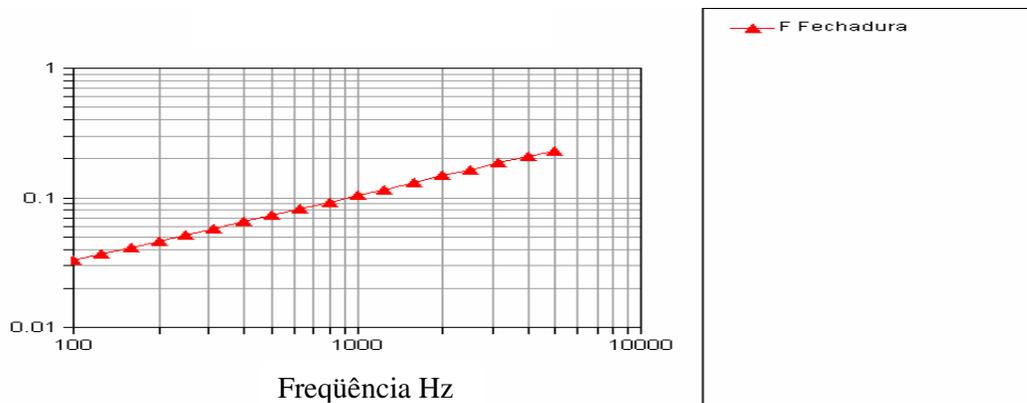


Figura 5.51 – Modal overlap factor do subsistema 2 com amortecedor

Subsistema 3

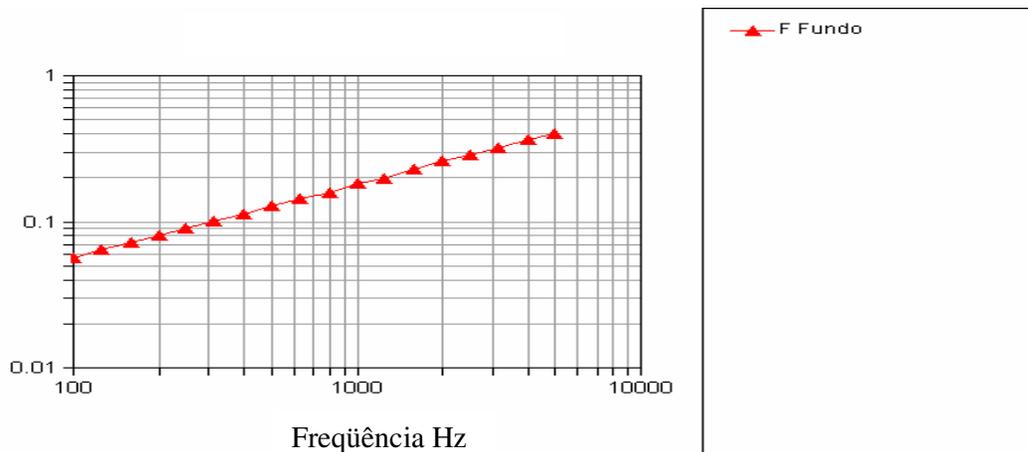


Figura 5.52 – Modal overlap factor do subsistema 3 com amortecedor

Subsistema 4

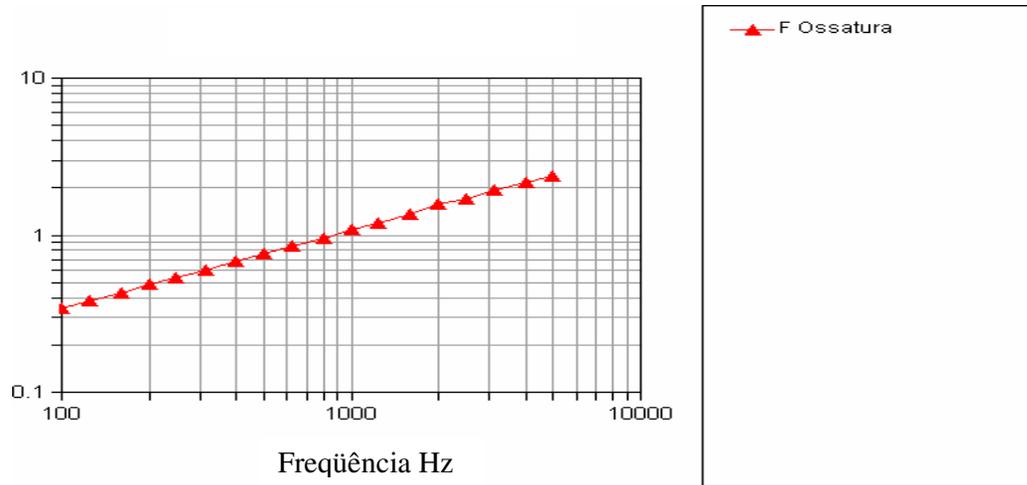


Figura 5.53 – Modal overlap factor do subsistema 4 com amortecedor

Subsistema 5

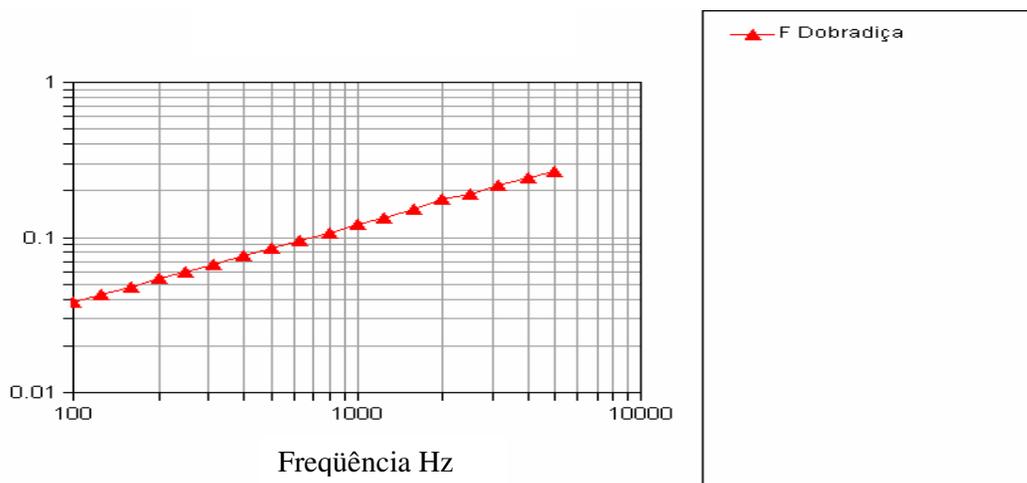


Figura 5.54 – Modal overlap factor do subsistema 5 com amortecedor

Como já era de se esperar, com base nas análises passadas, os subsistemas 2, 3 e 5 não apresentaram condições favoráveis se obter uma boa simulação, pois estes subsistemas são muito pequenos e rígidos.

5.3.2.4 – Fator de perda

O fator de perda teve o seguinte comportamento no painel externo sem amortecedor:

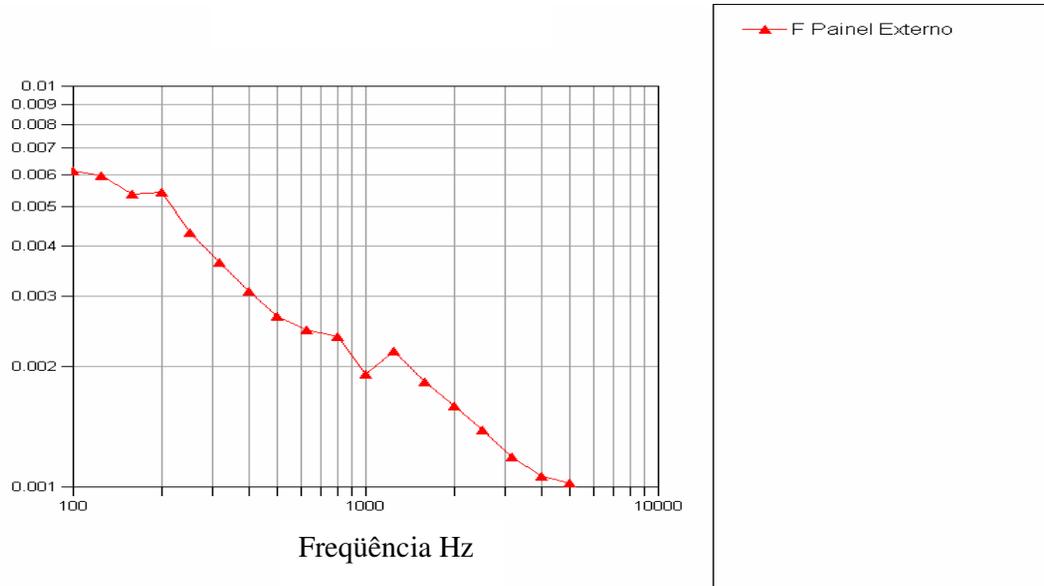


Figura 5.55 – Fator de perda da placa sem amortecedor

O fator de perda do gráfico acima apresentou os seguintes resultados, pois consideramos que todas as placas da portas seriam planas desconsiderando os altos e baixos relevos da porta. A impossibilidade de se calcular o fator de perda de cada subsistema, devido a porta se unida por pontos de solda e dobraduras, adotou-se então por calcular o fator de perda dos demais subsistemas a para se pudesse configurar o software e fazer a simulação

O fator de perda teve o seguinte comportamento no painel externo com amortecedor:

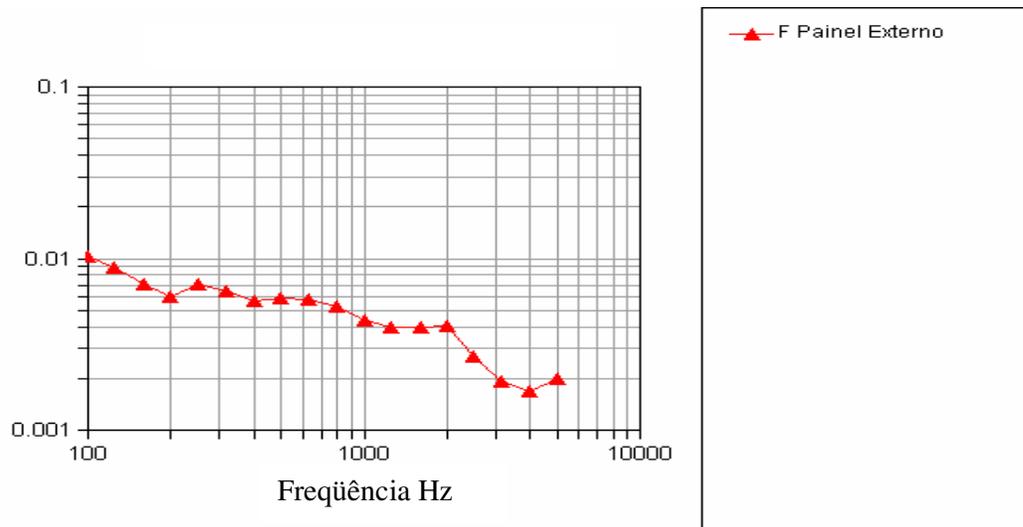


Figura 5.56 – Fator de perda da placa com amortecedor

5.3.2.5 – Fator de acoplamento

O cálculo do fator de acoplamento resolvido via software AutoSea2.

Com amortecedor

1- Subsistema 1 com subsistema 2

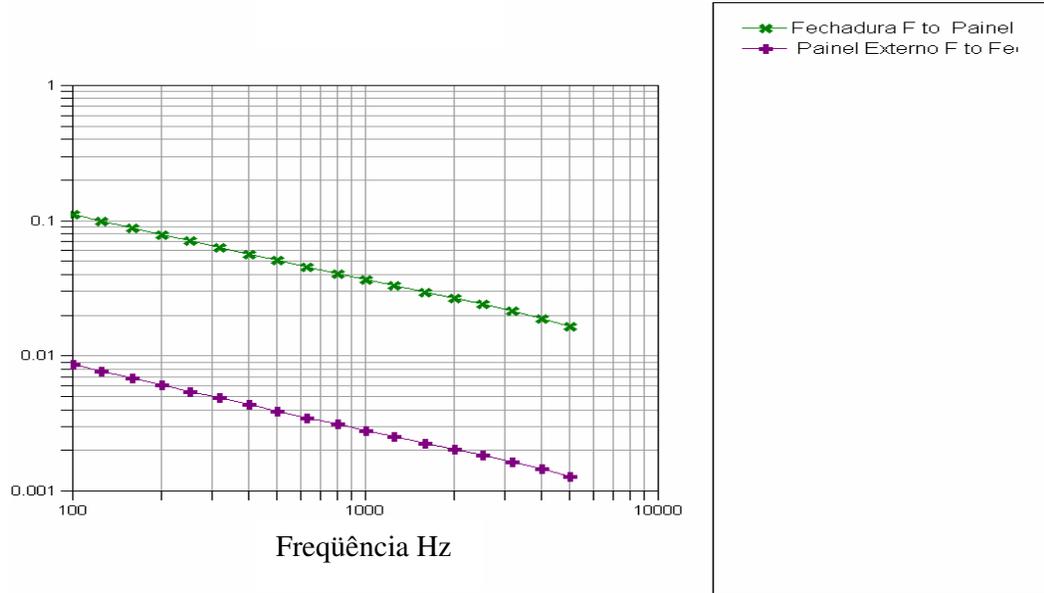


Figura 5.57 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (1-2)

2- Subsistema 1 com subsistema 3

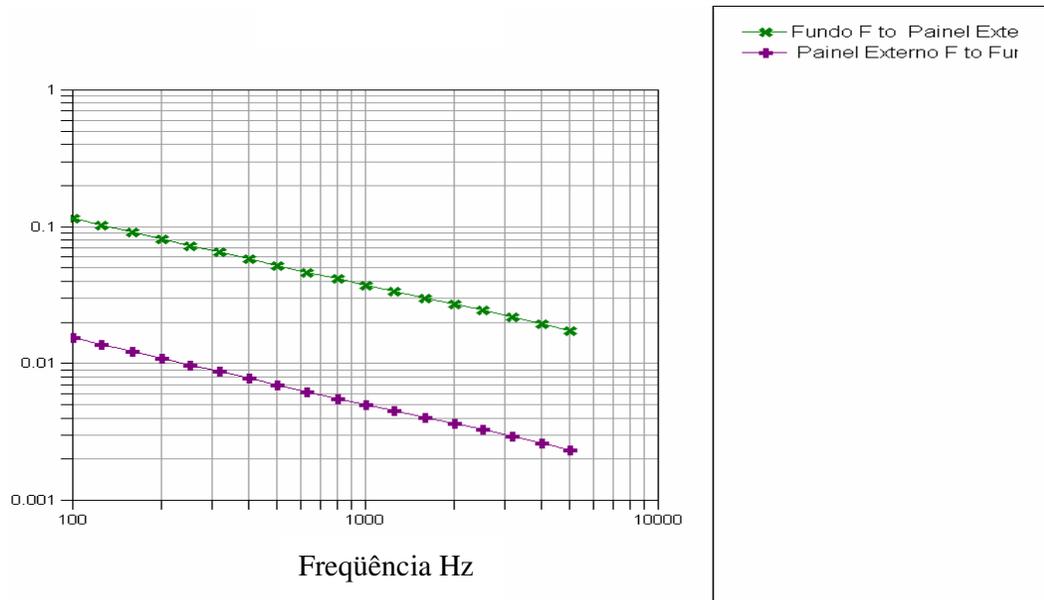


Figura 5.58 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (1-3)

3- Subsistema 1 com subsistema 5

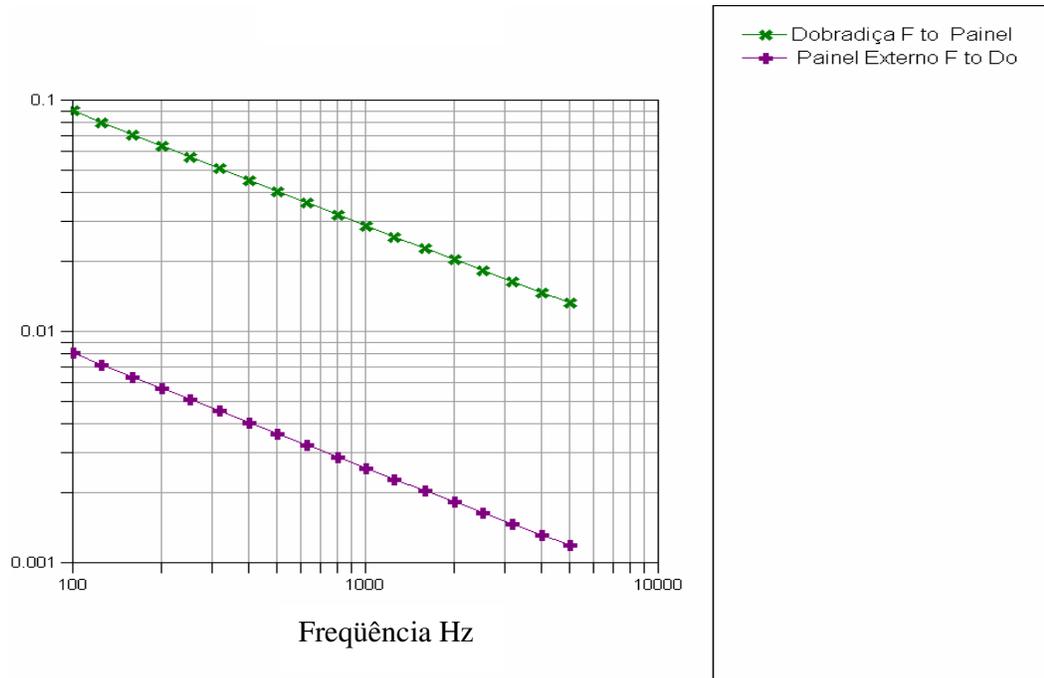


Figura 5.59 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (1-5)

4- Subsistema 2 com subsistema 3

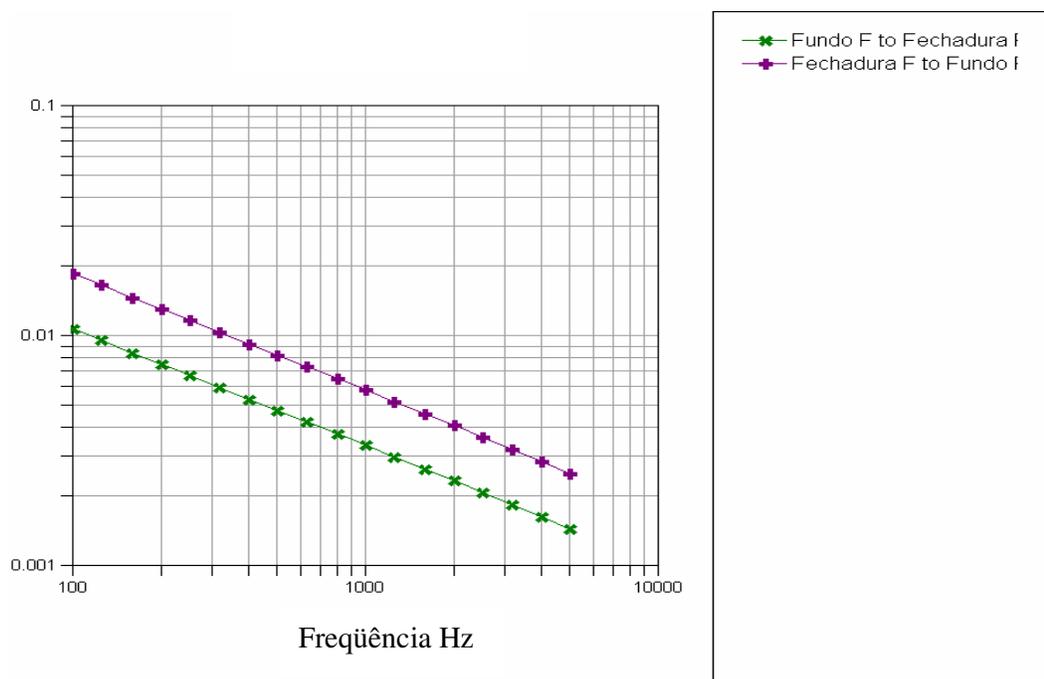


Figura 5.60 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (2-3)

5- Subsistema 2 com subsistema 4

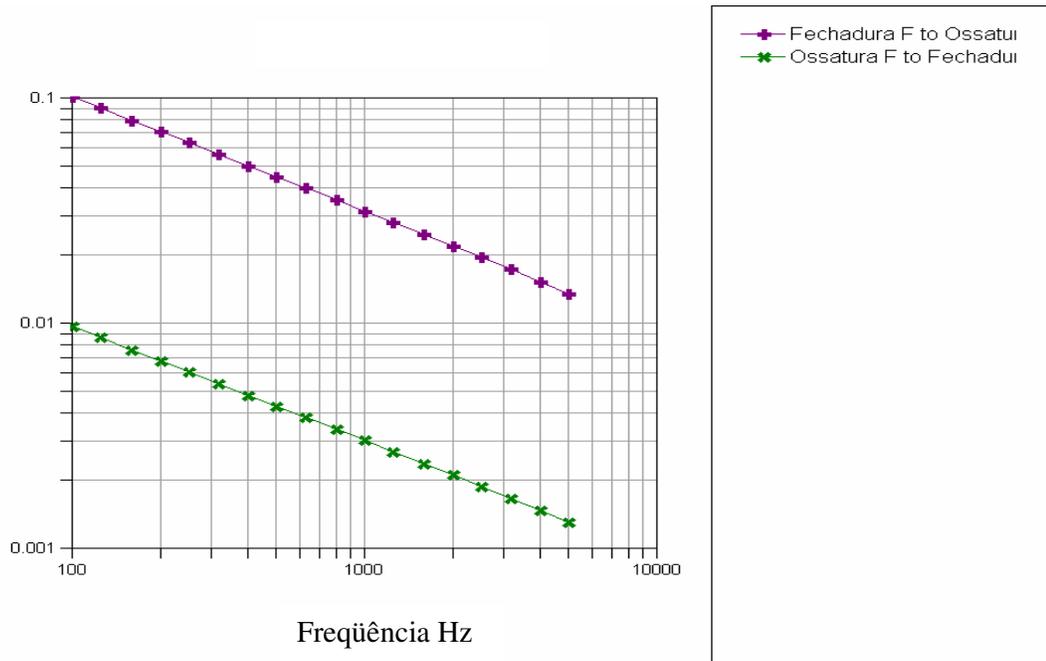


Figura 5.61 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (2-4)

6- Subsistema 3 com subsistema 4

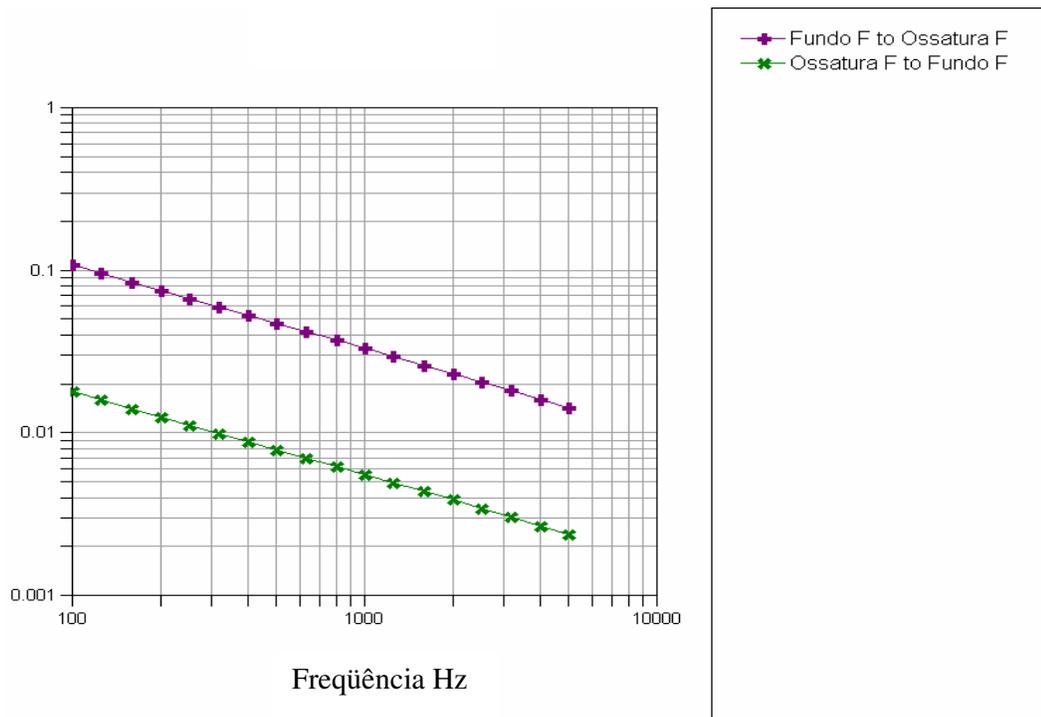


Figura 5.62 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (3-4)

7- Subsistema 3 com subsistema 5

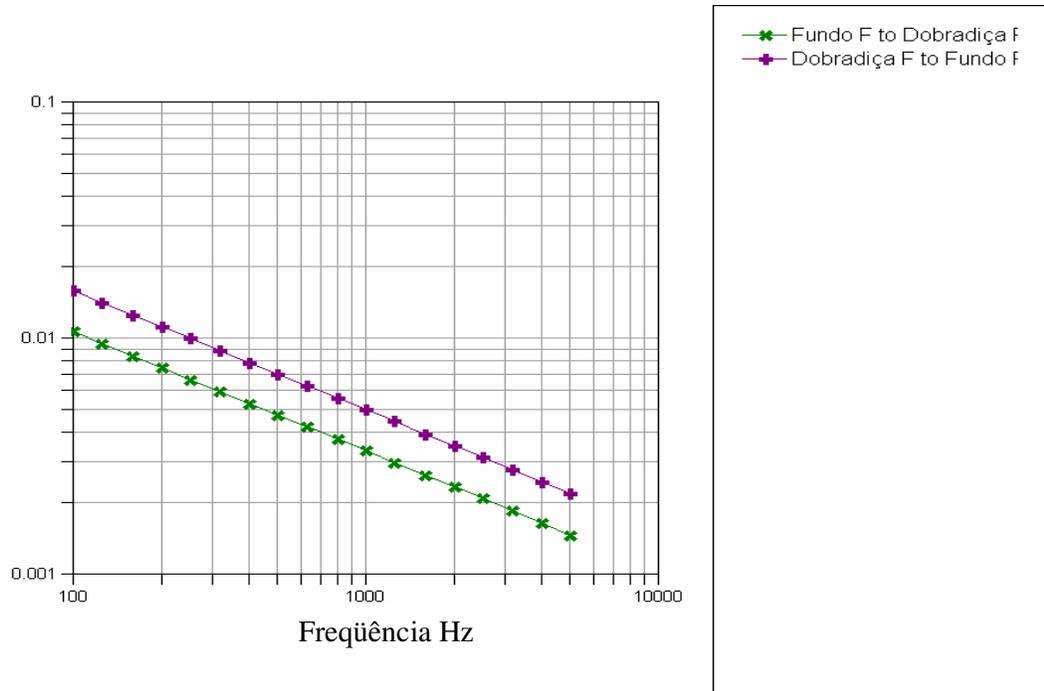


Figura 5.63 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (3-5)

8- Subsistema 4 com subsistema 5

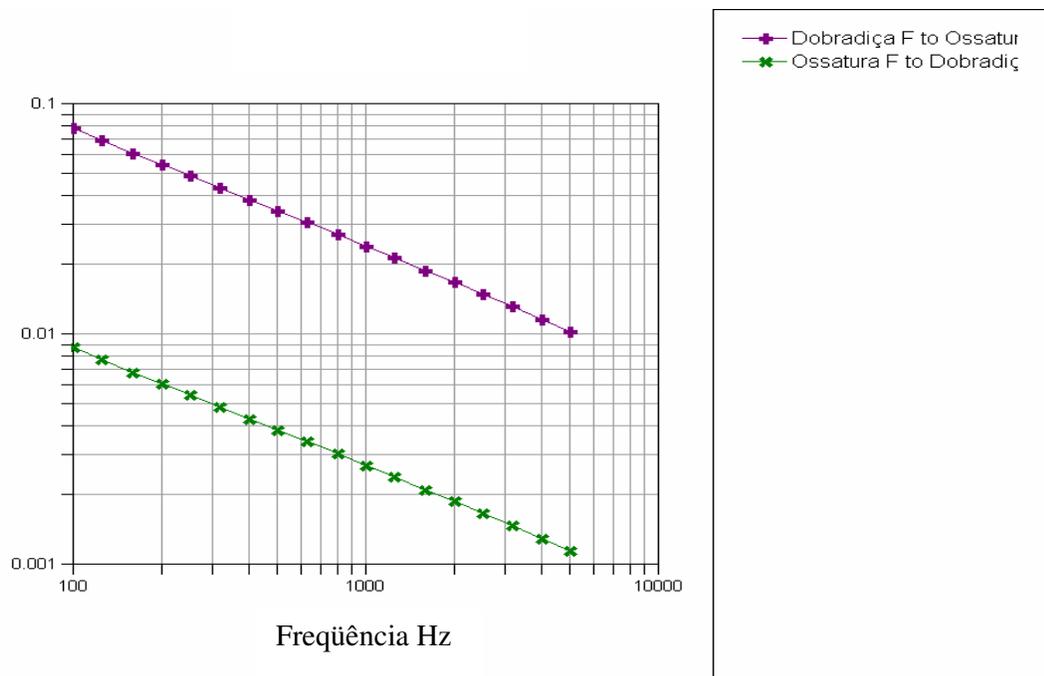


Figura 5.64 – Fator de acoplamento da placa com amortecedor (4-5)

Sem amortecedor

1- Subsistema 1 com subsistema 2

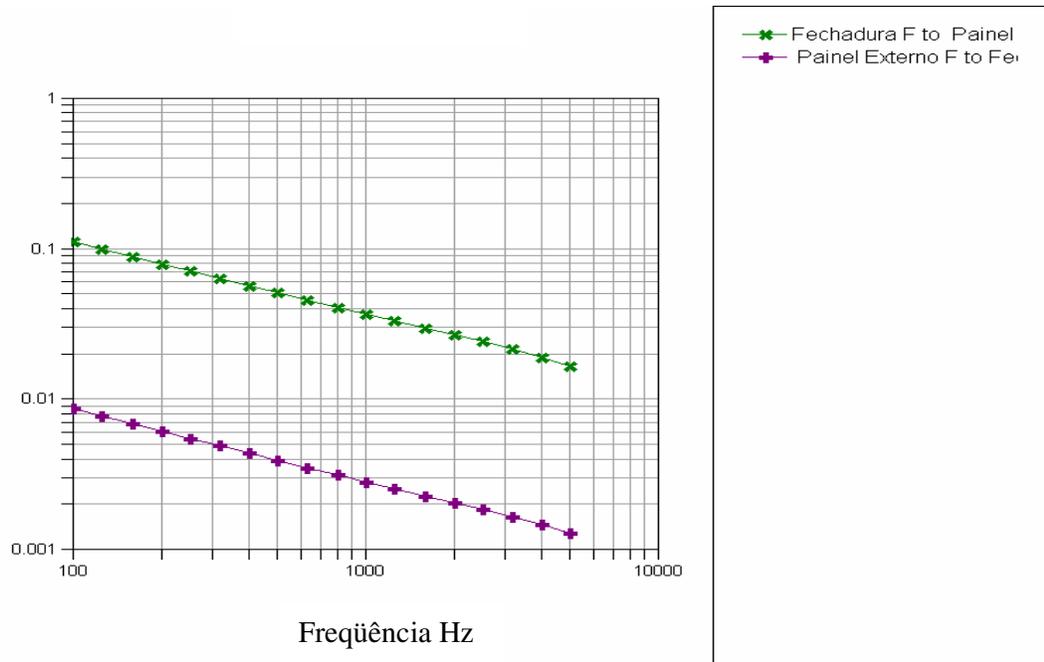


Figura 5.65 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (1-2)

2- Subsistema 1 com subsistema 3

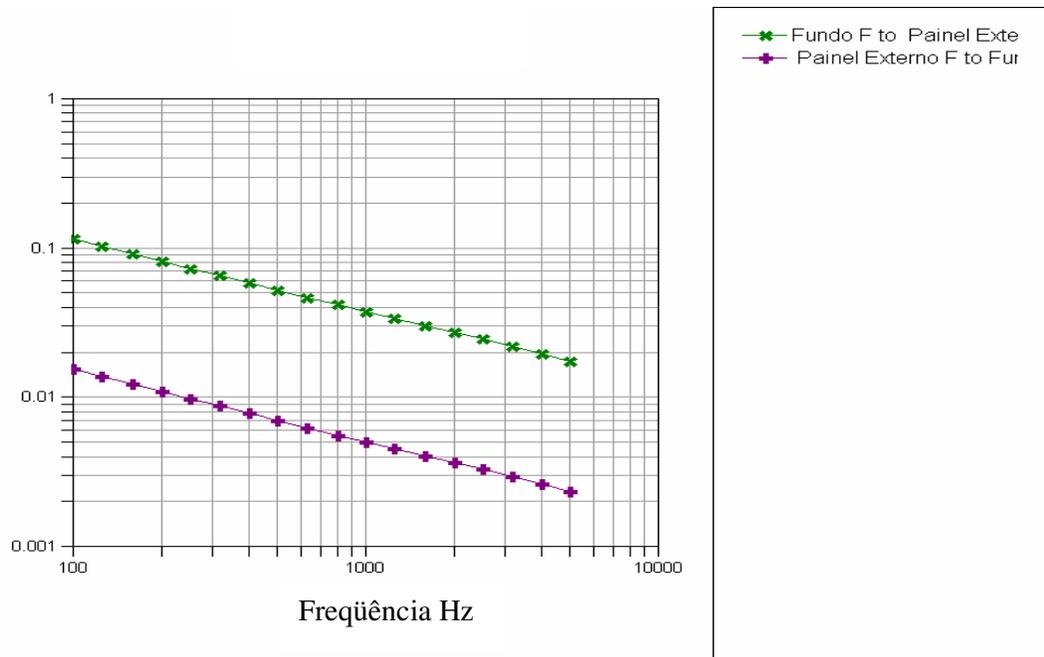


Figura 5.66 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (1-3)

3- Subsistema 1 com subsistema 5

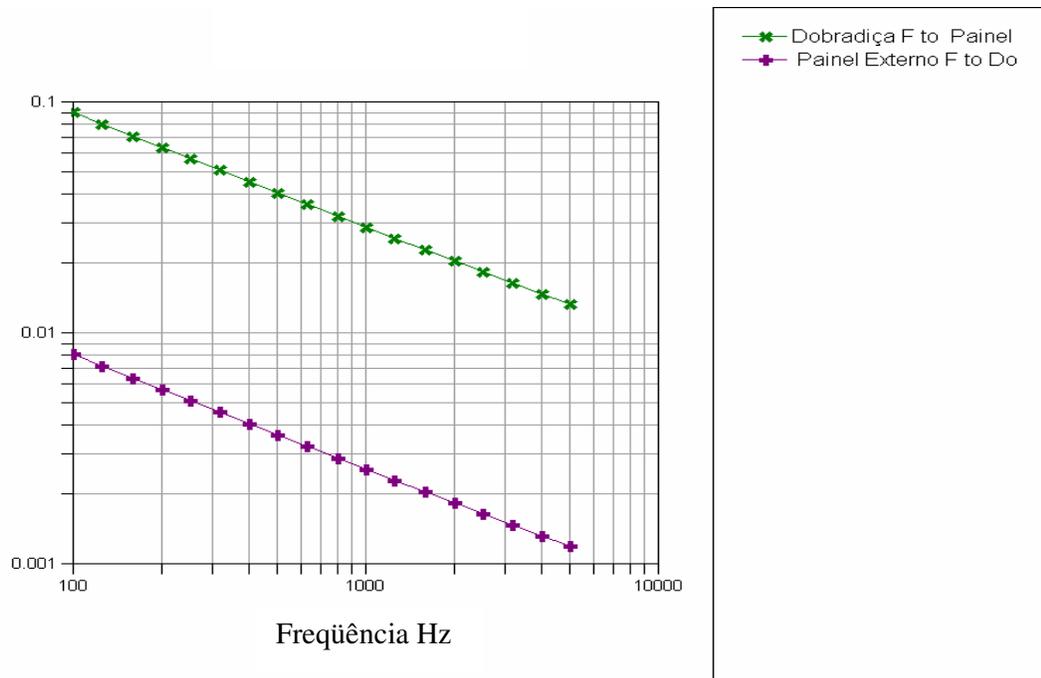


Figura 5.67 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (1-5)

4- Subsistema 2 com subsistema 3

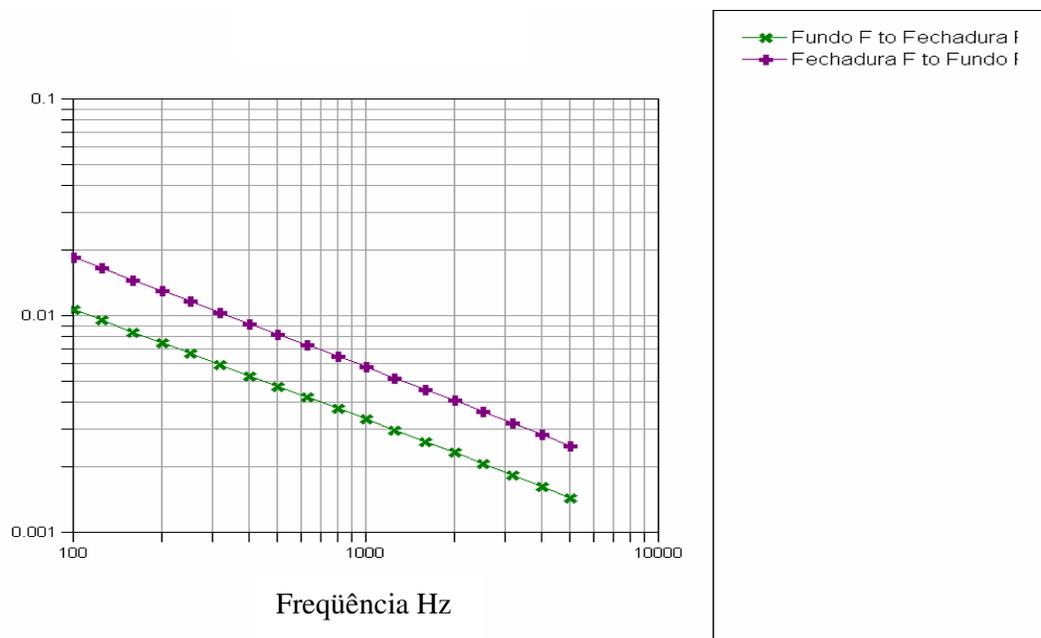


Figura 5.68 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (2-3)

5- Subsistema 2 com subsistema 4

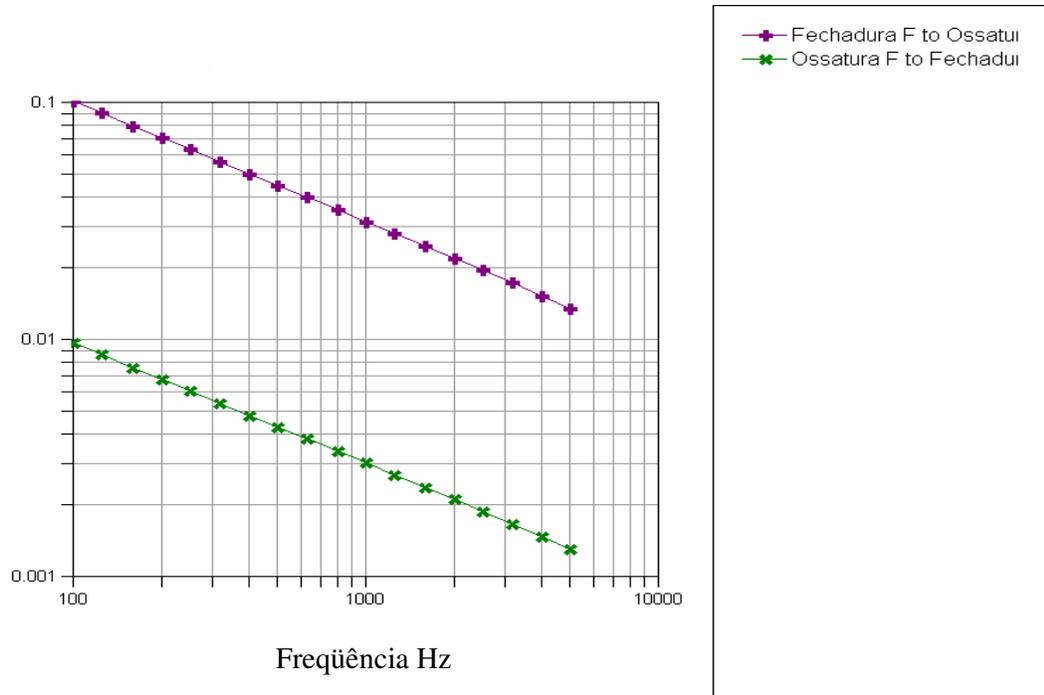


Figura 5.69 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (2-4)

6- Subsistema 3 com subsistema 4

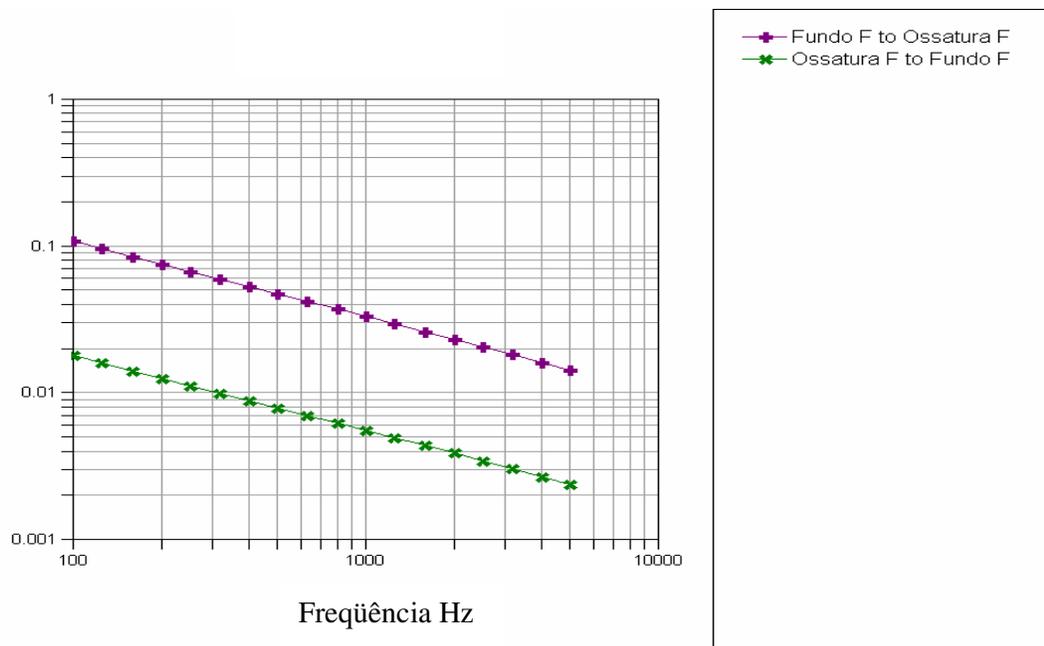


Figura 5.70 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (3-4)

7- Subsistema 3 com subsistema 5

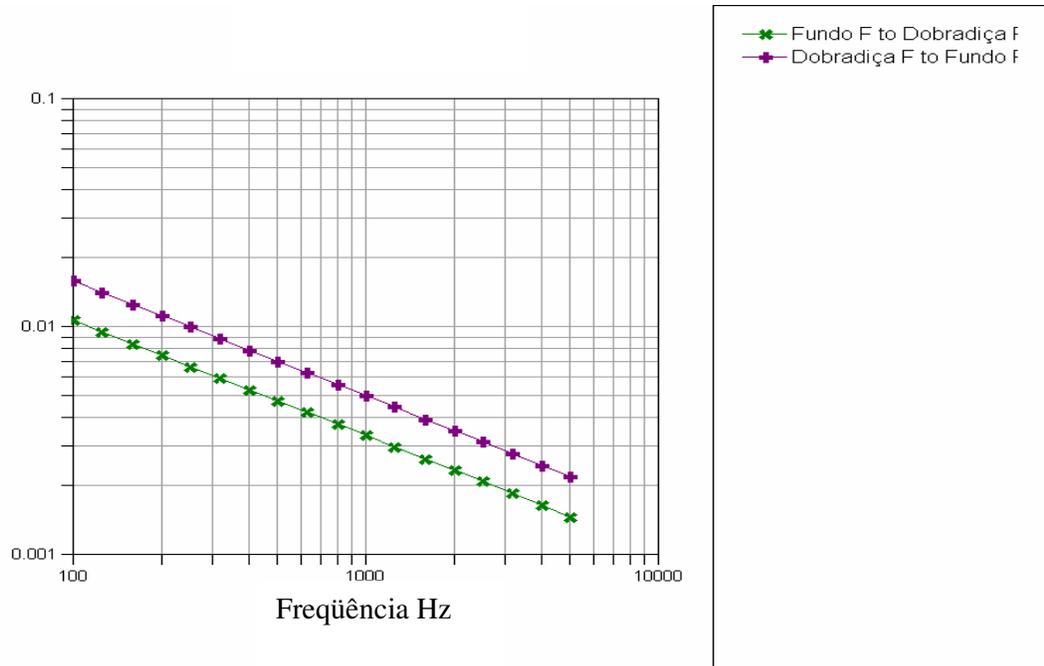


Figura 5.71 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (3-5)

8- Subsistema 4 com subsistema 5

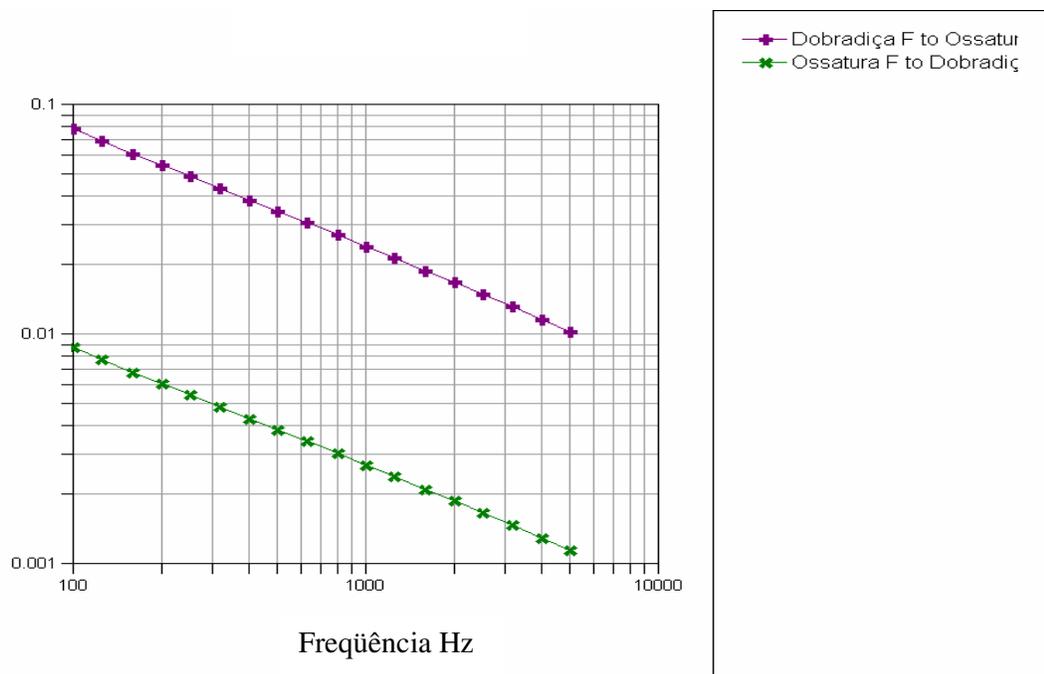


Figura 5.72 – Fator de acoplamento da placa sem amortecedor (4-5)

5.3.2.6 – Alteração da representação da porta

Diante de toda as verificações feitas para a porta do modelo palio, houve a necessidade de alterar a representação da porta inserindo furos, rasgos e formas geométricas de modo a retratar a forma original da porta. Para tal incumbência ficou definido que era necessário procurar o responsável pelo setor de acústica da engenharia da FIAT para que se pudesse ter um direcionamento de como proceder para se executar tal procedimento.

Foram várias tentativas na busca de como representar os furos e outras formas geométricas em cada subsistema. Perante as dúvidas que apareciam sempre se consultava a “ajuda” do *software*, mas não se conseguia nenhuma representação efetiva em relação ao que se propunha.

Depois de todas as tentativas, na FIAT Automóveis, para descobrir como poderia ser resolvido o problema, houve um contato via telefone com a Universidade Federal de Santa Catarina para que se indicasse um caminho para solucionar a questão. Nesta conversa foi sugerido que se calculasse as áreas de cada furo, rasgos e outras formas geométricas inseridas na porta para que se pudesse subtrair da área do subsistema (ossatura) pela área calculada.

Para melhor exemplificar o que seria feito os subsistemas 1 e 4 seriam alterados de sua forma original no *software*, conforme tabela 4.4 do capítulo 4, para terem sua área diminuída em função das variadas formas geométricas contidas na porta. Para tal, no subsistema 1 (painel externo) seria mensurado somente o furo onde é colocado o segredo de abertura das portas. Já no subsistema 4 (ossatura), foram desconsiderados os baixos e altos relevos contidos nesta peça, por se tratar de difícil representação via software. Para a ossatura foram mensuradas várias formas geométricas ali contidas para que se pudesse saber qual é a relação de área que não é coberta pela placa plana. Desta forma calculados os novos valores em m² para o subsistema 1 e subsistema 4, sendo considerados os furos ,rasgos e outras forma geométricas.

* subsistema 1 : $0,680 - 0,001 = 0,679 \text{ m}^2$;

* subsistema 4 : $0,550 - 0,128 = 0,422 \text{ m}^2$.

Tabela 5.18 – Novos valores de área dos subsistemas da porta

Subsistemas	Espessura [mm]	Área [m²]
1-Painel externo	0,8	0,679
2-Fechadura	0,8	0,052
3-Fundo	0,8	0,091
4-Ossatura interna	0,8	0,422
5-Dobradiças	0,8	0,061

Depois de ter calculado as áreas passou-se então para a configuração do software, para o modelo computacional bastaria acessar o subsistema em que irá se alterar a área, bastando para isso acessar o subsistema e abrir uma janela onde se configura o tipo de tratamento acústico, o tipo de aço, o tamanho, peso do subsistema e bem como fornece também e o que era de interesse para o experimento como a área e perímetro. Pensava-se antes de se fazer as tentativas que se conseguiria acessar com facilidade e alterar o valor da área contido no *setup* do *software*. Mas isso não aconteceu, pois o AutoSea2[®] não permitia condição de acesso para mudar a área e fazer a simulação já com os novos valores de área levando-se em conta os furos e rasgos contidos na porta.

Desta forma sem ter condição de acesso recorreu-se a ajuda do software para tentar achar um outro caminho para fazer a simulação e comprovar se os mesmos influenciariam na troca de energia entre os subsistemas. No menu do software se pesquisou alternativas de solucionar o problema, mas não foi encontrado nada que pudesse direcionar para a solução do problema.

Novamente foi feito o contato via telefone com a Universidade Federal de Santa Catarina com o propósito de estar utilizando a experiência com o *software* para que pudesse indicar outro acesso ao valor da área e em seguida, realizar a simulação computacional. Mas novamente, não se obteve uma resposta positiva para o acesso a área, portanto, deparou-se com a impossibilidade de se realizar o experimento para se saber a sensibilidade do modelo com a inserção de furos, rasgos e outras formas geométricas para se saber se destes influenciariam na troca de energia entre os subsistemas da porta.

Depois da obtenção dos gráficos com a adição e sem a adição dos amortecedores (insonorizantes) na porta do modelo Palio e do estudo para se alterar a representação da porta através do *software* AutoSea2[®] tanto para o método experimental quanto para o método numérico, foi feita a comparação através de gráficos para que se possa avaliar com mais detalhes as curvas das energias cinéticas dos subsistemas.

5.4 – Resultados Obtidos

Diante da necessidade se validar o modelo e fazer uma comparação das energias cinéticas da cada subsistema em cada faixa de frequências, foram confeccionado os gráficos dos subsistemas em separado, fazendo assim uma comparação dos resultados obtidos nos experimentos do método experimental e do método numérico.

Antes desta comparação, serão apresentados, a seguir, alguns gráficos gerados pelo software AutoSea2® para a análise do comportamento do modelo computacional da porta do modelo Palio.

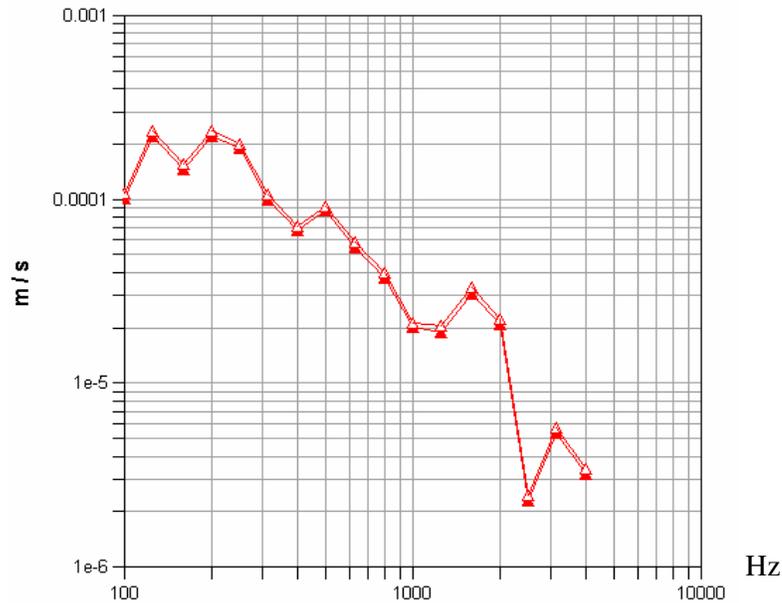


Figura 5.73 – Comparação entre as velocidades por banda de frequências 1/3 oitava com amortecimento (Linha Cheia : com amortecimento e Linha Aberta: sem amortecimento)

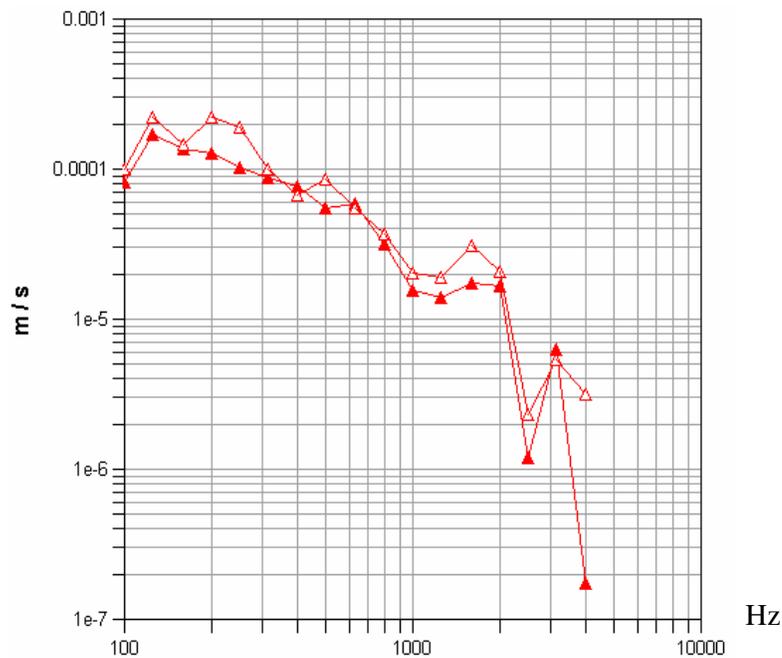


Figura 5.74 – Comparação entre as Potências de entradas por banda de frequências 1/3 oitava sem amortecimento (Linha Cheia : com amortecimento e Linha Aberta: sem amortecimento)

Depois da apresentação dos gráficos anteriores, foi detectado uma diferença grande no fator de escala entre os gráficos do método experimental e o método numérico. Durante a fase do experimento numérico teve-se o cuidado de se verificar o modelo e os dados de entrada como, os fatores de perda com e sem amortecimento, as potências de entradas para com amortecedor e sem amortecedor e bem como os fatores relativos ao material.

Junto com o Prof. orientador foi constatado que havia um erro na construção do modelo em questão, devido a um fator relativo ao número de nós em cada faixa de frequência do modelo (baixa frequência).

Com base nesta hipótese foi visto que o modelo numérico construído não supria as condições em que a presente dissertação se propunha, desta forma não se chegou a uma comparação propriamente dita, somente uma análise dos gráficos em separado. Desta forma será apresentado os valores e um gráfico comparativo com exemplo.

Tabela 5.19– Valores da simulação para o método numérico

Frequência Central	Com Amortecedor									
	Subsistema 1		Subsistema 2		Subsistema 3		Subsistema 4		Subsistema 5	
	Experimental	Númerico	Experimental	Númerico	Experimental	Númerico	Experimental	Númerico	Experimental	Númerico
100	2,923E-06	4,361E-08	3,654E-08	2,850E-09	4,334E-08	4,932E-09	3,349E-06	2,654E-08	3,157E-08	3,310E-09
125	8,858E-06	2,087E-07	1,039E-08	1,342E-08	6,332E-08	2,322E-08	2,699E-06	1,233E-07	1,163E-08	1,588E-08
160	7,834E-06	9,085E-08	2,447E-08	5,727E-09	3,710E-08	9,903E-09	2,992E-06	5,179E-08	1,620E-08	6,642E-09
200	7,197E-06	2,083E-07	2,112E-08	1,288E-08	5,918E-08	2,226E-08	4,065E-06	1,146E-08	6,438E-09	1,492E-08
250	6,471E-06	1,550E-07	3,755E-08	9,391E-09	1,452E-07	1,622E-08	1,231E-06	8,206E-08	4,109E-08	1,087E-08
315	4,028E-06	4,297E-08	1,077E-07	2,542E-09	4,891E-07	4,389E-09	2,889E-06	2,176E-08	1,932E-08	2,938E-09
400	3,654E-06	1,956E-08	1,523E-07	1,127E-09	1,370E-06	1,945E-09	1,587E-06	9,417E-09	3,671E-08	1,301E-09
500	1,891E-06	3,191E-08	4,523E-07	1,792E-09	2,802E-07	3,090E-09	7,741E-07	1,459E-08	6,956E-08	2,064E-09
630	1,592E-06	1,286E-08	2,553E-07	7,012E-10	1,811E-07	1,208E-09	4,108E-07	5,542E-09	2,634E-07	8,055E-10
800	1,316E-06	5,951E-09	4,505E-07	3,143E-10	2,206E-07	5,413E-10	3,314E-07	2,399E-09	3,912E-08	3,599E-10
1000	1,251E-06	1,729E-09	1,949E-07	8,845E-11	2,036E-07	1,523E-10	2,034E-07	6,503E-10	7,266E-08	1,009E-10
1250	1,496E-06	1,525E-09	5,510E-07	7,539E-11	4,080E-07	1,298E-10	2,221E-07	5,313E-10	1,708E-07	8,567E-11
1600	1,524E-06	4,005E-09	3,039E-07	1,901E-10	2,318E-07	3,273E-10	3,818E-07	1,269E-09	6,927E-08	2,148E-10
2000	1,168E-06	1,840E-09	2,268E-07	8,410E-11	1,292E-07	1,448E-10	3,195E-07	5,310E-10	3,896E-08	9,446E-11
2500	8,884E-07	2,274E-11	2,182E-07	9,985E-13	1,013E-07	1,722E-12	7,933E-08	5,921E-12	6,043E-08	1,115E-12
3150	2,903E-07	1,208E-10	5,798E-08	5,070E-12	5,925E-08	8,764E-12	6,344E-08	2,796E-11	6,281E-08	5,632E-12
4000	2,426E-07	4,356E-11	1,081E-07	1,733E-12	6,519E-08	3,010E-12	3,582E-08	8,808E-12	1,232E-07	1,923E-12
5000	4,184E-09	-6,716E-13	9,241E-10	-2,523E-14	8,108E-10	-4,404E-14	3,469E-10	-1,181E-13	4,783E-10	-2,812E-14

Também serão apresentados os valores da simulação sem o amortecedor.

Tabela 5.20 – Valores da simulação para o método numérico

Frequência Central	Sem Amortecedor									
	Subsistema 1		Subsistema 2		Subsistema 3		Subsistema 4		Subsistema 5	
	Experimental	Númérico	Experimental	Númérico	Experimental	Númérico	Experimental	Númérico	Experimental	Númérico
100	1,568E-06	5,030E-08	1,268E-08	3,286E-09	1,982E-08	5,688E-09	2,365E-06	3,061E-08	1,554E-08	3,817E-09
125	5,646E-06	2,425E-07	2,879E-09	1,559E-08	2,880E-08	2,697E-08	1,820E-06	1,433E-07	4,648E-09	1,809E-08
160	4,600E-06	1,034E-07	5,376E-09	6,519E-09	1,450E-08	1,127E-08	2,669E-06	5,895E-08	1,293E-08	7,560E-09
200	6,929E-06	2,391E-07	5,317E-09	1,479E-08	2,269E-08	2,555E-08	3,359E-06	1,316E-07	3,833E-09	1,713E-08
250	4,006E-06	1,735E-07	1,017E-08	1,051E-08	6,614E-08	1,815E-08	1,129E-06	9,181E-08	2,266E-08	1,216E-08
315	3,826E-06	4,825E-08	2,845E-08	2,855E-09	2,836E-07	4,928E-09	2,830E-06	2,443E-08	1,501E-08	3,300E-09
400	3,009E-06	2,198E-08	5,241E-08	1,267E-09	6,297E-07	2,186E-09	1,897E-06	1,058E-08	2,230E-08	1,462E-09
500	1,860E-06	3,571E-08	1,438E-07	2,005E-09	1,381E-07	3,458E-09	6,335E-07	1,633E-08	4,635E-08	2,310E-09
630	8,645E-07	1,458E-08	6,318E-08	7,954E-10	5,155E-08	1,371E-09	1,886E-07	6,287E-09	6,017E-08	9,137E-10
800	9,741E-07	6,862E-09	1,522E-07	3,623E-10	8,883E-08	6,241E-10	3,345E-07	2,765E-09	1,972E-08	4,150E-10
1000	9,009E-07	1,955E-09	5,917E-08	9,997E-11	6,776E-08	1,721E-10	2,403E-07	7,350E-10	4,615E-08	1,141E-10
1250	1,152E-06	1,788E-09	1,584E-07	8,843E-11	1,072E-07	1,522E-10	2,828E-07	6,232E-10	9,061E-08	1,005E-10
1600	9,915E-07	4,681E-09	7,185E-08	2,222E-10	1,203E-07	3,826E-10	2,671E-07	1,484E-09	3,058E-08	2,511E-10
2000	6,627E-07	2,130E-09	1,047E-07	9,737E-11	9,375E-08	1,677E-10	3,846E-07	6,149E-10	5,037E-08	1,094E-10
2500	3,452E-07	2,602E-11	5,731E-08	1,143E-12	5,475E-08	1,970E-12	7,290E-08	6,776E-12	2,710E-08	1,278E-12
3150	1,537E-07	1,373E-10	2,243E-08	5,761E-12	3,531E-08	9,958E-12	4,363E-08	3,177E-11	1,467E-08	6,400E-12
4000	1,403E-07	4,928E-11	2,244E-08	1,961E-12	1,481E-08	3,405E-12	2,962E-08	9,964E-12	2,185E-08	2,176E-12
5000	3,252E-09	-7,661E-13	4,997E-10	-2,878E-14	2,479E-10	-5,024E-14	5,056E-10	-1,347E-13	1,938E-10	-3,207E-14

Desta forma foram confeccionados os gráficos comparativos de cada subsistema, comparando-se as energias do método experimental com as energias do método numérico obtidos através da simulação computacional.

A seguir, serão apresentados os gráficos comparativos dos subsistemas, em escala logarítmica, relativos à adição de amortecedor.

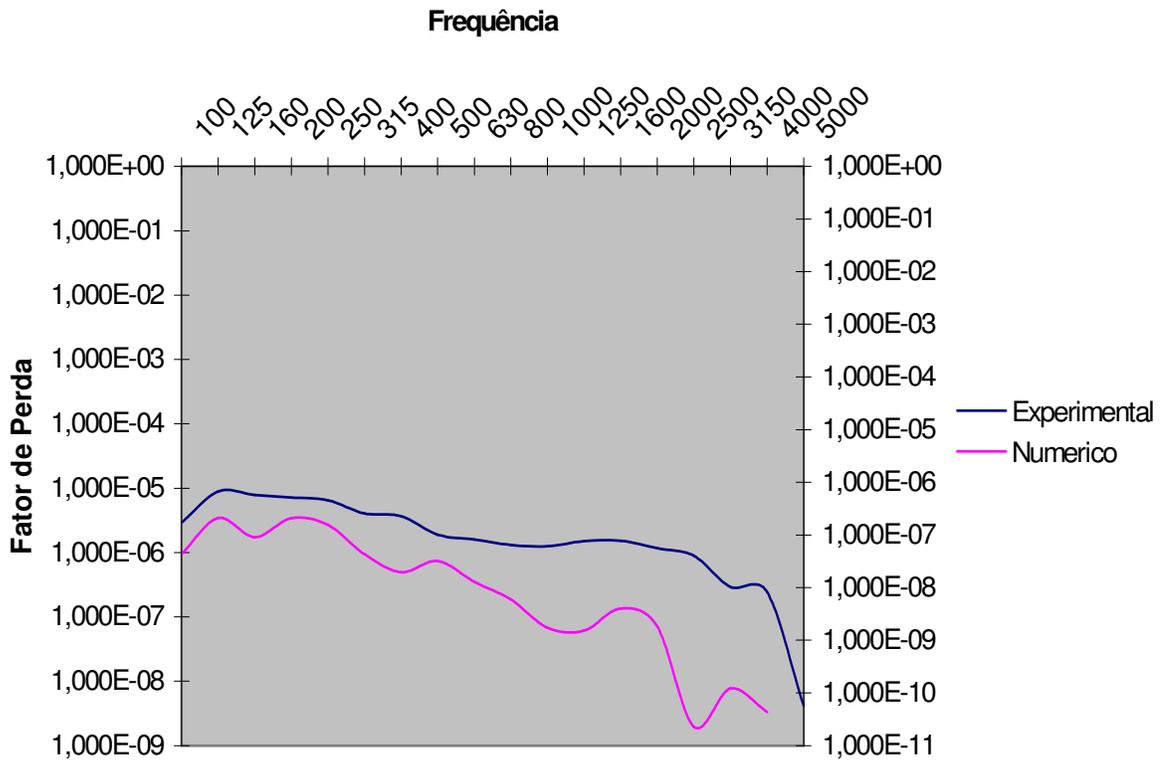


Figura 5.75 – Comparação de Energias do Subistema 1 com Amortecedor

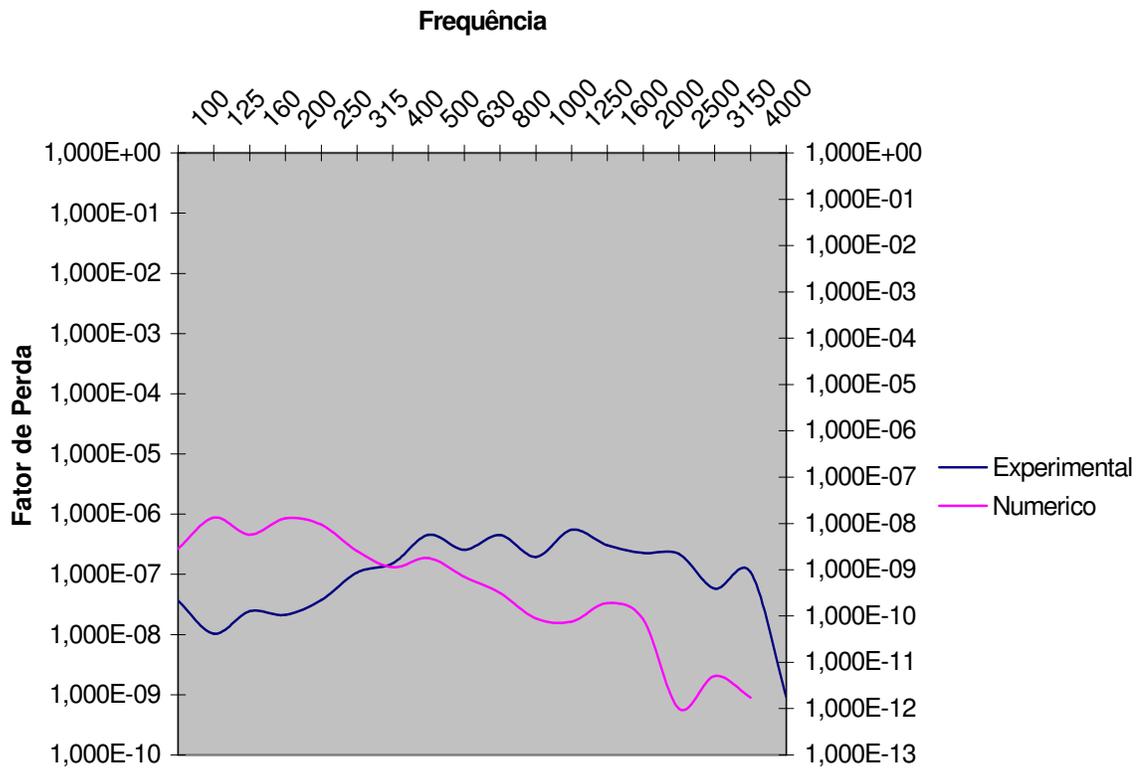


Figura 5.76 – Comparação de Energias do Subistema 2 com Amortecedor

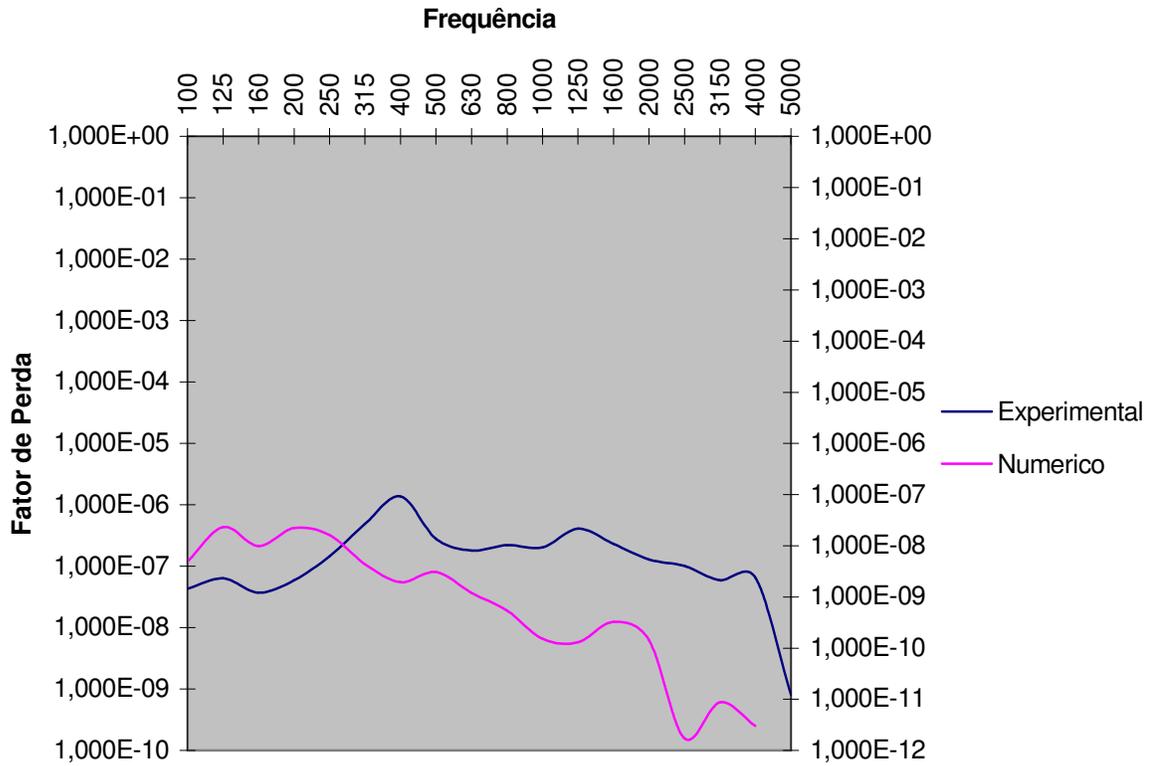


Figura 5.77 – Comparação de Energias do Subsistema 3 com Amortecedor

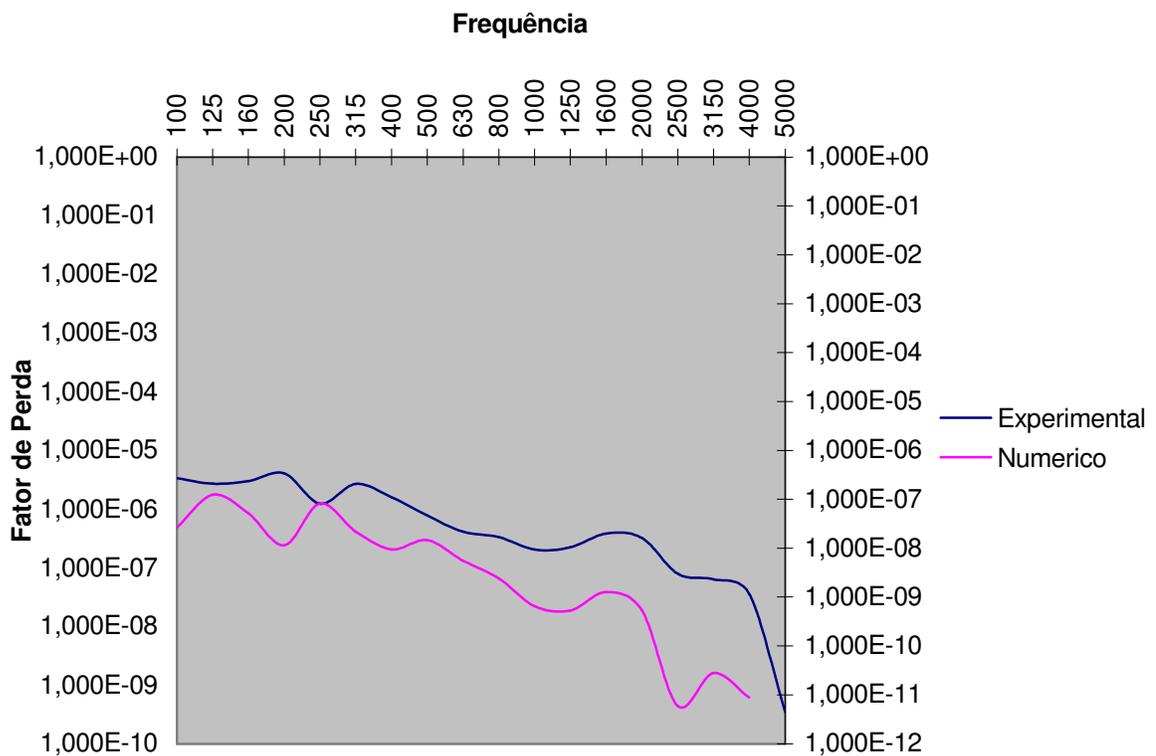


Figura 5.78 – Comparação de Energias do Subsistema 4 com Amortecedor

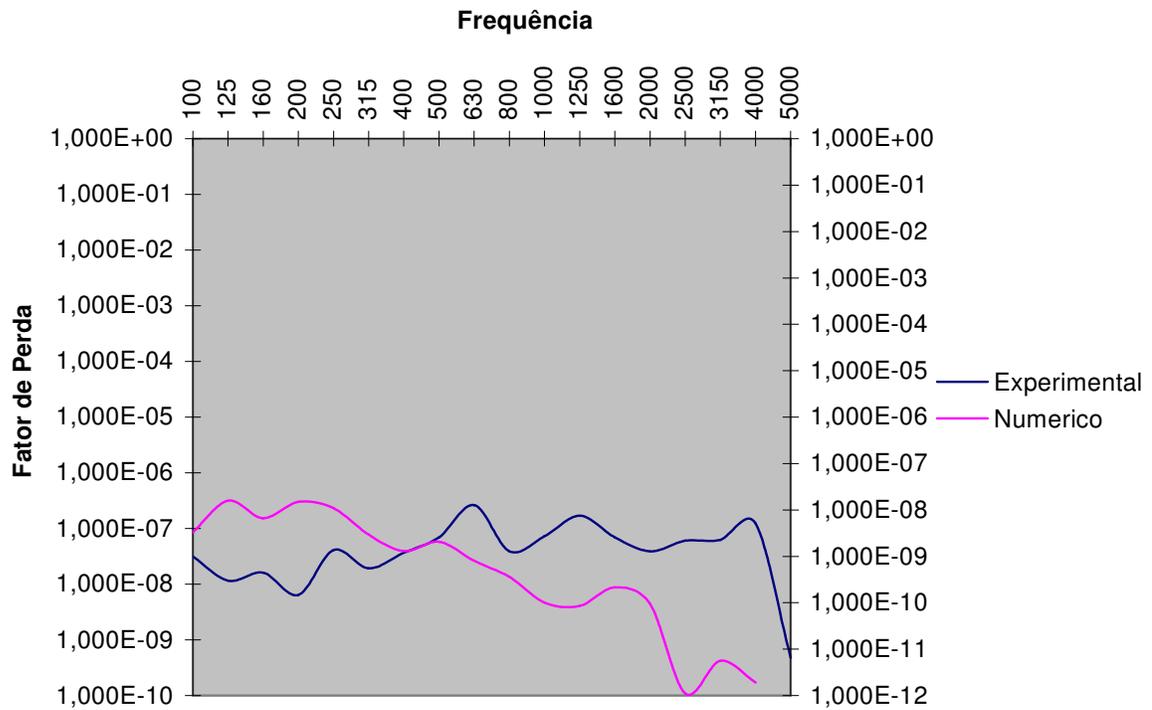


Figura 5.79 – Comparação de Energias do Subsistema 5 com Amortecedor

Serão apresentados os a seguir, os gráficos comparativos das energias dos subsistemas sem amortecedor.

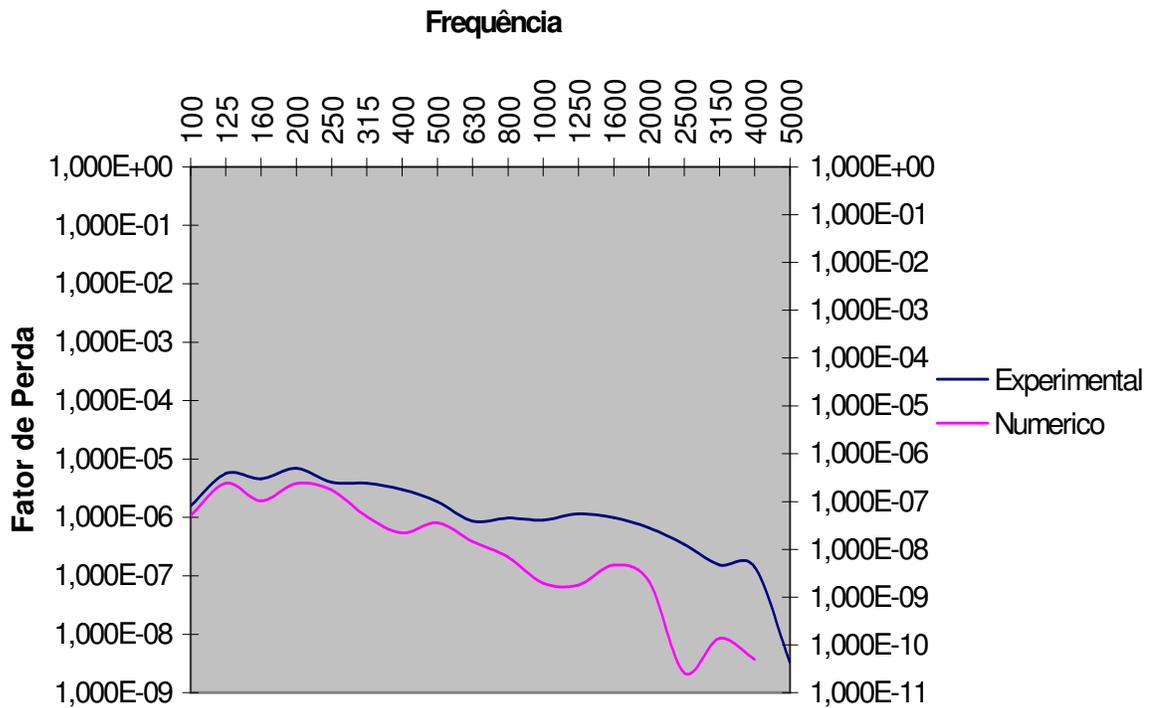


Figura 5.80 – Comparação de Energias do Subsistema 1 sem Amortecedor

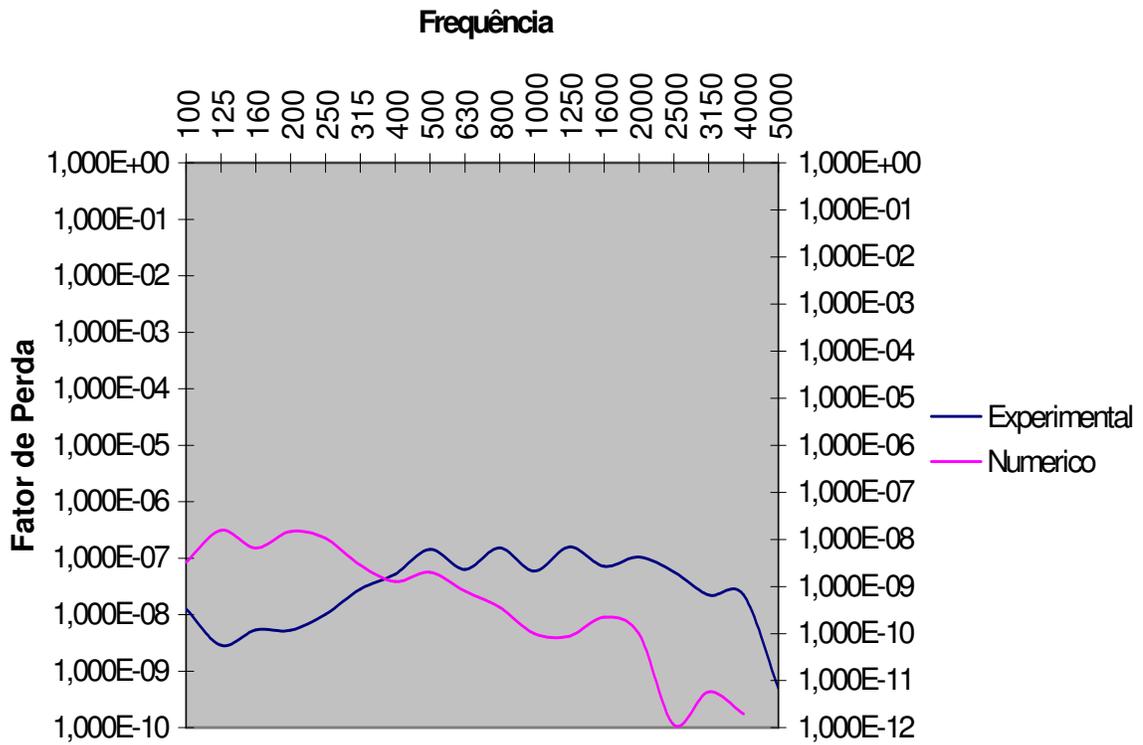


Figura 5.81 – Comparação de Energias do Subsistema 2 sem Amortecedor

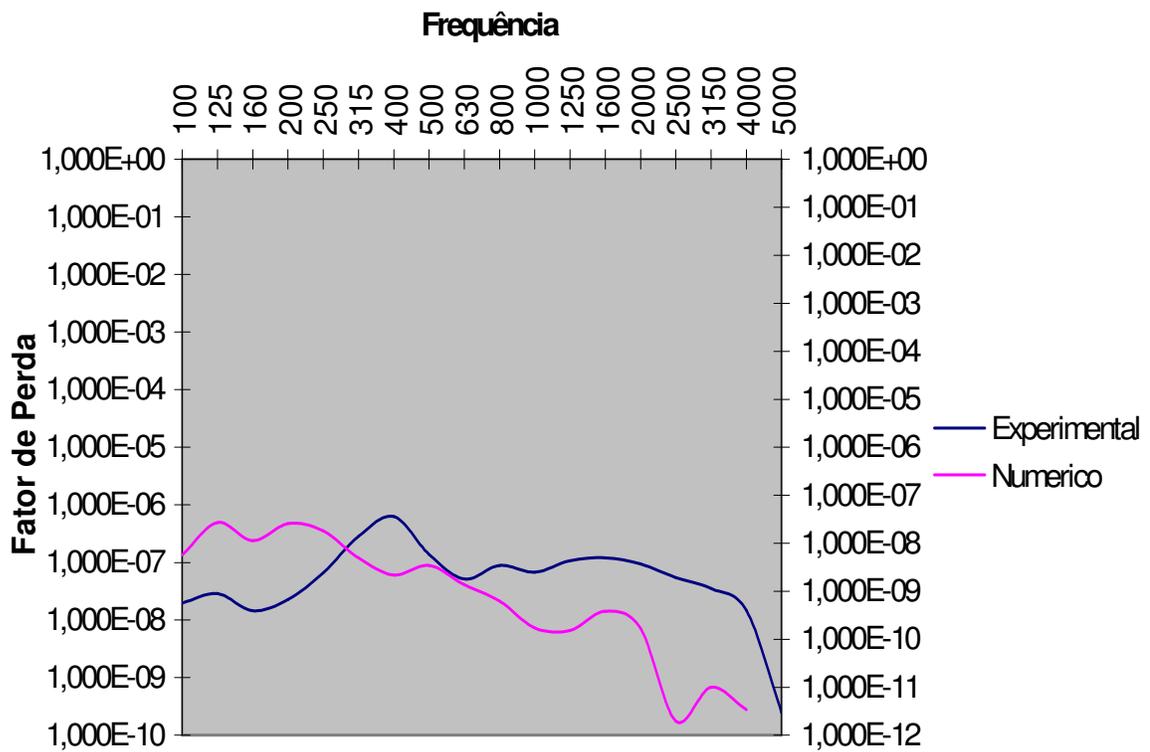


Figura 5.82 – Comparação de Energias do Subsistema 3 sem Amortecedor

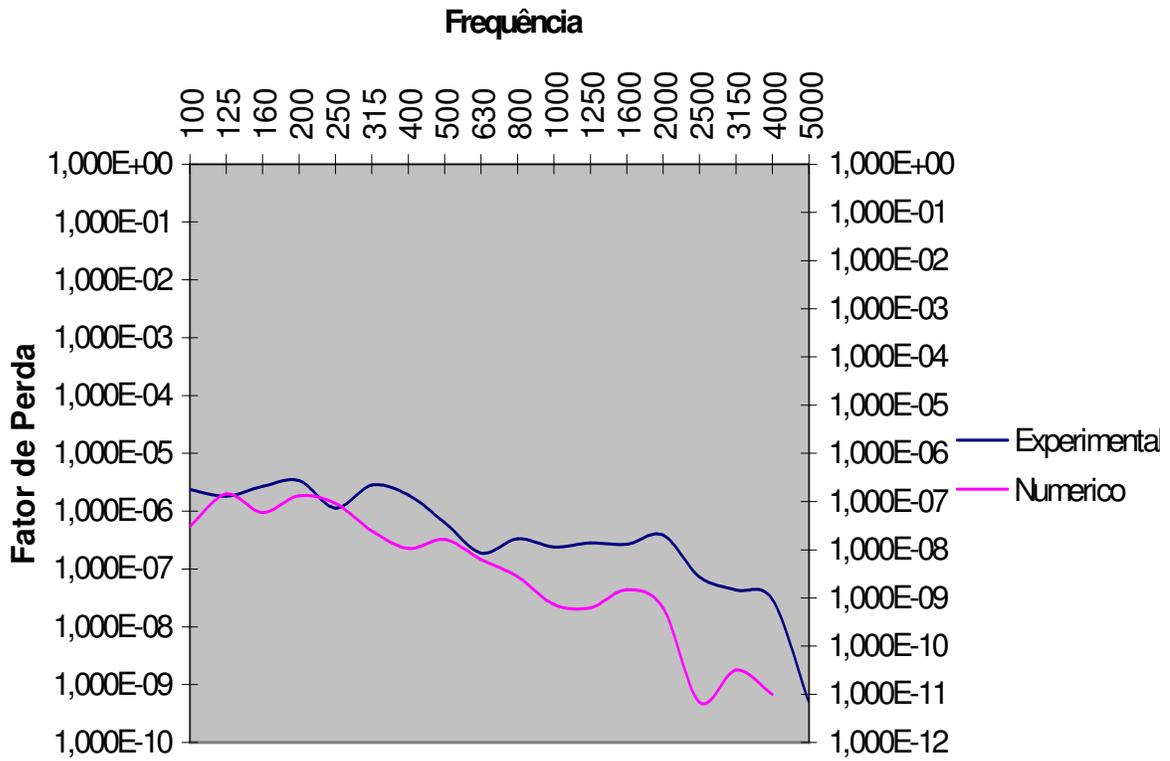


Figura 5.83 – Comparação de Energias do Subistema 4 sem Amortecedor

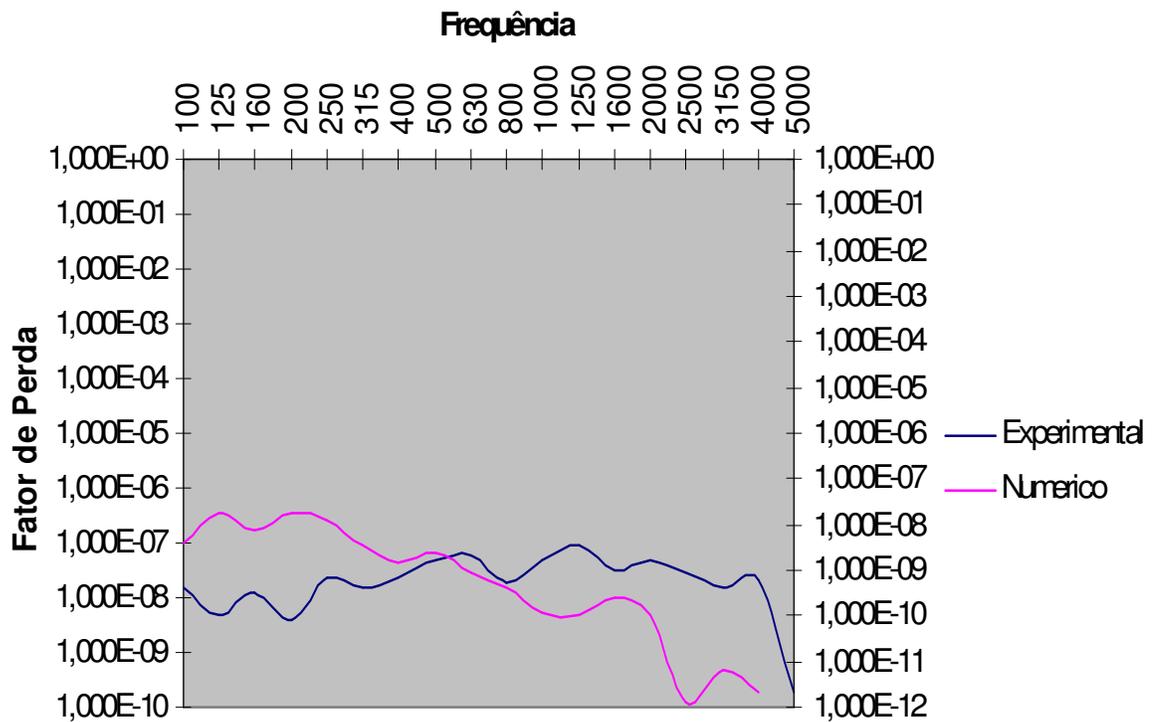


Figura 5.84 – Comparação de Energias do Subistema 5 sem Amortecedor

Diante destes gráficos apresentados anteriormente, pode-se notar uma repetibilidade para as curvas do método numérico em função de seus valores serem muito parecidos mudando-se apenas o fator de escala para com e sem amortecedor. Perante destas afirmativas pode-se concluir que há algo de errado no método numérico, pois com a adição de amortecedor no subsistema 1 o sistema teve um comportamento muito diferenciado em relação ao comportamento do mesmo subsistema para o método experimental, pois esperava-se um comportamento similar para ambos e os demais subsistemas o comportamento da curva permaneceu inalterado para os demais subsistemas. O mesmo ocorreu para a simulação sem o amortecedor tendo a repetição da mesma curva em todos os subsistemas.

Outra situação foi em relação ao comportamento bem distinto das curvas do método experimental, pois a mesma se difere em todos os subsistemas mudando o comportamento da curva para com e sem amortecedor.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 - Conclusão

A presente dissertação teve como objetivo principal estudar as energias cinéticas de cada subsistema da porta do modelo Palio, obtidas em experimentos práticos e as obtidas em simulação computacional utilizando a Análise Estatística de Energia (SEA), objetivando comprovar a eficácia dos amortecedores utilizados pela FIAT Automóveis.

Este estudo compreendeu em mensurar as energias cinéticas de cada subsistema com amortecedor e sem amortecedor. Para tanto, foi utilizado um modelo com geometrias mais simplificadas, na construção do modelo no software, no qual se desconsiderou todos os elementos que são montados na porta. Tal escolha se deu porque levou-se em consideração que a placa externa não sofre contato direto com tais elementos e que o quadro da porta é relativamente rígido, ou seja, a simulação seria extremamente simplificada cabendo ao software fazer os cálculos dos fatores de acoplamento.

No decorrer desta dissertação foram apresentadas as principais características dos amortecedores, da metodologia de Análise Estatística de Energia (SEA), da descrição da execução do método de decaimento e da execução do método de potência de entrada, finalizando com a construção do modelo. Sendo que por último, são apresentados os resultados do método experimental e do método numérico para ambos os casos com e sem adição de amortecedor.

Ocorre que, através da análise dos gráficos para o modelo numérico ficou comprovado que havia algo mais a ser estudado em relação ao modelo, porque diante dos resultados que foram alcançados através da comparação entre o método experimental e o método numérico, para todos os subsistemas, foi detectado que a ordem de grandeza não estava em conformidade em relação ao método experimental e as curvas para o método numérico havia uma repetibilidade em todos os subsistemas não importando a adição ou não do amortecedor. Os subsistemas que os resultados mais se aproximaram foram o subsistema 1 e 4 (painel externo e ossatura), tanto para a adição ou não de amortecedor, principalmente em baixas frequências até 630 Hz e em alta frequência há uma distorção dos valores. Outra característica

relevante para que os resultados se aproximem para o subsistema está relacionado a sua área, pois foi levado em consideração toda a curvatura do subsistema e suas dimensões. Para os demais subsistemas da porta, conforme descrito ao longo da dissertação, foram construídos de uma forma mais simplificada, em consenso, desconsiderando os baixos e altos relevos, os rasgos, as furações e os demais componentes montados na porta automotiva. É importante salientar que foram mantidas as dimensões de todos os subsistemas de acordo com o modelo original da porta.

Com base nos gráficos apresentados para os subsistemas 2, 3 e 5 estarem divergindo muito, procurou-se entender um pouco mais do comportamento destes subsistemas realizando outras simulações para se estabelecer a correlação entre os mesmos e o porque da repetibilidade da curva. De tal forma foram realizadas simulações para todos os subsistemas em relação a densidade modal, o fator de superposição modal “*Modal Overlap Factor*” (MOF), número de modos por faixa de frequência e a verificação do fator de acoplamento entre os subsistemas da porta.

A densidade modal apresentou um comportamento satisfatório nos subsistemas 1 e 4 tendo boa troca de energia nestes subsistemas de maior área e nos demais subsistemas ficou comprometida esta troca de energia por apresentar baixa densidade modal devido a menor área destes subsistemas.

A superposição modal é outro instrumento de comprovação de que o modelo está em condições de realizar uma boa troca de energia entre os subsistemas. De tal forma foram gerados os gráficos e constatado que os subsistemas 2, 3 e 5 não apresentaram condições favoráveis se obter uma boa troca de energia, pois estes subsistemas possuem áreas muito pequenas e rígidos com valores abaixo de 0,33 contrariando a teoria de SEA.

Para o número de modos por faixa de frequência apenas o subsistema 1 (painel externo) apresentam o requisito básico para a aplicação teoria de SEA, apresentando o n° de modos suficiente por faixa de frequência (6). Os demais subsistemas serão encontrados números de modos bem abaixo daquele exigidos para se aplicar a teoria de SEA. Entretanto, o subsistema 4 se aproxima do número exigido para a aplicação da teoria de SEA, apresentando (5) modos por faixa de frequência. Portanto, o número de modos também contribuíram para a obtenção de valores divergentes entre o método experimental e numérico.

O fator de acoplamento entre os subsistemas da porta apresentou nos gráficos de simulação valores que indicam um forte acoplamento em boa parte os subsistema da porta, contribuindo para a discordância dos resultados experimentais com os resultados numéricos.

Diante destas conclusões apresentadas os subsistemas de menores áreas contribuíram negativamente para que os resultados se divergissem em relação aos resultados do método experimental, pois a maioria dos subsistemas como, fechadura, fundo e dobradiça possuem um baixo número de modos interferindo no resultado final. Talvez no início, durante a fase de modelagem da porta no software AutoSea2[®], tivesse separado o modelo em dois únicos subsistemas, um para placa do painel externo e outro englobando a fechadura, fundo, ossatura e dobradiça poderia se ter obtido um resultado melhor ao apresentado ao longo da dissertação.

Desta forma para futuras utilizações do software AutoSea2[®] há o cuidado se estudar com maiores detalhes a estrutura e escolher melhor a quantidade de subsistema para as simulações via software AutoSea2[®] de forma que os resultados se direcionem para o objetivo.

É importante salientar que a produção científica a respeito do assunto é praticamente inexistente, restando apenas o paper da 3M “*Automotive door acoustic optimization using absorption in the wet side cavity*”.

Ocorre que o *paper* em questão, não possibilitaria qualquer tipo de comparação solicitada pela banca examinadora porque mostrava como fazer o tratamento acústico com materiais absorventes **no exterior da cavidade** da porta **reduzindo o nível de pressão sonora** no interior do veículo através da modelagem acústica da porta utilizando a Análise Estatística de Energia com o objetivo de construir novas propostas de otimização e designers. O processo utilizado se dava através da aplicação, em uma câmara, de um campo sonoro difuso, incidindo diretamente sobre a porta **simulando o ruído externo automotivo** o que resultava em uma distribuição da intensidade sonora transmitida ao longo de toda a superfície do painel testado.

Por outro lado a dissertação apresentada buscou **reduzir o nível das vibrações de uma porta** de veículo automotivo onde foram analisados inicialmente os fatores de amortecimento de uma porta automotiva, ambas com e sem aplicação de material de amortecimento auto-adesivo aplicados **na parte interna**. Tais dados são utilizados na simulação numérica de uma porta automotiva, através de SEA, para ambas as situações, sem e com amortecimento adicional. Os resultados numéricos foram confrontados com aqueles obtidos experimentalmente, quando igualmente a porta era excitada externamente por excitador (“shaker”), usando como sinal o ruído aleatório em faixa de frequências, nas mesmas condições. As conclusões referiam-se principalmente à adequação do modelo utilizando em SEA para representar o sistema físico real.

O trabalho citado acima não descreve o modelo de SEA, em quantos subsistemas a porta foi representada, bem como não apresenta outras informações importantes necessárias para o modelo de SEA. Cita apenas que foi modelada por SEA.

Desta forma, apesar de ambos os experimentos utilizarem o AutoSea2[®] com software de simulação computacional, o objetivo, que era a comparação entre os resultados obtidos nesta dissertação e no trabalho citado acima não foi possível, justamente pela falta de informações que permitissem tal comparação. Deve-se ressaltar que o único trabalho encontrado na literatura sobre este assunto foi o da 3M citado acima.

Com os resultados desta análise, obtidos nesta dissertação, pode-se reafirmar a conclusão de que os resultados numéricos e experimentais apresentam divergência devido ao fato de alguns subsistemas apresentarem baixa densidade modal e forte acoplamento entre si, o que sabidamente proporciona grandes incertezas nas estimativas das respostas, e conseqüentemente, divergências entre os resultados obtidos experimentalmente.

6.2 – Sugestão para trabalhos futuros

-Desenvolver novos experimentos comparando o método experimental com o método numérico considerando todos os componentes da porta que influenciam na análise de resultados.

-Após a aplicação dos amortecedores no veículo como um todo buscar desenvolver um fator X comum que represente a condição ideal do nível de ruído no interior do veículo via software AutoSea2[®].

-Desenvolver um modelo numérico mais próximo da realidade no software AutoSea2[®], implementando elementos finitos na construção de outros subsistemas para se saber se o resultados seria melhor do que somente a utilização do software AutoSea2[®].

-Aplicar uma potência de entrada na estrutura de um veículo em relação à posição em que se situa o motorista e fazer as medições da contribuição desta potência para a acústica do veículo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMABILI, M.; PIERANDREI R. *Analysis of vibrating circular plates having non-uniform constraints using the modal properties of free-edge plates: application to bolted plates*. *Jornal of sound and Vibration*. Italy. Dipartimento di Matematica “V Volterra”, Università di Ancona, I-60131 Ancona, Italy. v.206(1), 23-28, 3 January 1996, and in final 8:April 1997 .
- 2 *AutoSEA Theory and Quality Assurance Manual* – Section I. Vibro-Acoustic Sciences, 1999.
- 3 BERANEK, Leo L; VÉR, István L. *Noise and Vibration Control Engineering : Principles and Applications*. New York, USA . Copyright by John Wiley & Sons, 1992.
- 4 BREMMER, P. G. : Vibro-Acoustic Sciences Inc. *Sound transmission loss modeling of real structures using statistical energy analysis*. Proc. Internoise, Yokohama, Japan, 1994.
- 5 COELHO, J. L. Bento. *Políticas Europeias sobre ruído ambiente e o Espaço Ibérico*. Lisboa- Portugal, CAPS - Instituto Superior Técnico – 1096 Lisboa Codex – Portugal. Revista Semestral da Sociedade Brasileira de Acústica - SOBRAC, nº22, pp. 18 – 22, Dezembro, 1998.
- 6 COLLOP, A C; CEBON B. *Parametric Study of factors Affecting Flexible Pavement Performance*. Assosciety, Department of Engineering, Univerity of Cambridge, 1994.
- 7 D. G. JONES. *Handbook of viscoelastic vibration damping*. Copyright by John Wiley & Sons, 2001.

- 8 E. J. YODER; M. W. WITCZAK. *Principles of pavement design*. Copyright by John Wiley & Sons, Second Edition, New York, USA, 1975.
- 9 FERRO, José Roberto. *O Futuro da Engenharia Automotiva Brasileira*. Revista Tecnologia Automotiva, nº13, pp. 4 –5, Janeiro , 1999.
- 10 FIAT AUTO. *Normazione Insonorizzante Fusibile in Fogli*. Capitolato nº 9.55648, pp. 1-15, Itália, Aprile ,1997.
- 11 FRANÇA, Júnia Lessa. *Manual para normalização de Publicações Técnicas Científicas*. 5 ° Edição. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2001.
- 12 GERGES, Samir N. Y. *Ruído Fundamento e Controle*. 2ª Edição. Florianópolis-SC, Editora Consultoria e Treinamento, 2002.
- 13 GERGES, Samir N. Y. *Estado da Arte para Solução dos problemas vibroacústicos por métodos numéricos*. Revista de Acústica e Vibrações, Florianópolis-SC, nº26, pp. 18-33, Dezembro de 2000.
- 14 GERGES, Samir N. Y. *Efeitos do Ruído e de Vibrações no Homem*. Revista de Acústica e Vibrações, Florianópolis-SC, nº27, pp. 18-32, Julho de 2001.
- 15 GERGES, Samir N. Y. ; MELO, Naor Moraes. *Modelagem do Ruído Veicular Interno*. Anais - SOBRAC – Sociedade Brasileira de Acústica e Vibração, IV Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, Agosto 1997.
- 16 KUNG, S. W; SINGH, R.. *Complex eigensolutions of rectangular plates with damping patches*. Journal of Sound and Vibration, Ohio-Colombus, nº216, pp. 1-28, 1998.
- 17 LYON, R.H.; JONG de, R.G. *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*. 2ª edition, Butterworth – Heinemann, 1995.

- 18 LENZI, Arcanjo. *Análise Estatística Energética. Notas de Aula*. Curso de Pós-Graduação. Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.
- 19 MALEN, Donald E; SCOTT, Richard A. *Improving Automobile Door-Closing Sound For Customer Preference*. Janeiro, 1993.
- 20 ONSAY, Taner; AKANDA, Anab; GOETCHIUS, Gregory M. *Perforated Damping Treatment. A Novel Approach to Reduction of Weight*. Society of Automotive Engineers. Vibro- Acoustic Sciences, Inc.
- 21 ONSAY, Taner; NELISSE, H. *Modeling strategies in SEA: Study of a car door*. The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Dearborn, MI, USA, August, 2002.
- 22 ONSAY, Taner. *Statistical Energy Analysis(SEA) : Fundamentals and Automotive Applications*. Vibro Acoustic Sciences, USA, 2000.
- 23 TRICHÊS Glicério, departamento de Eng. Civil da Universidade Federal de Santa Catarina em publicação de uma apostila.