



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – VIBRAÇÕES E ACÚSTICA

JOSÉ DE AVIZ TOUTONGE

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CÂMARAS REVERBERANTES EM
ESCALA REDUZIDA PARA O ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE
PERDA DE TRANSMISSÃO DE DIVISÓRIAS CONFECCIONADAS A
PARTIR DE MATERIAIS REGIONAIS**

Belém – Pará – Brasil

Setembro 2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) –

Biblioteca Central/ UFPA, Belém-PA

Toutonge, José de Aviz.

Projeto e construção de câmaras reverberantes em escala reduzida para o estudo das características de perda de transmissão de divisórias confeccionadas a partir de materiais regionais / José de Aviz Toutonge; orientador Prof. Dr. Newton Sure Soeiro. – 2006

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Mestrado em Engenharia Mecânica, Belém, 2006.

1. Som - Equipamentos e acessórios – projetos e construção. 2. Engenharia Acústica. 3. Controle de ruído. 4. Controle de Vibrações. 5. Modelagem Numérica. I. Título

CDD - 22 ed. 620.23

JOSÉ DE AVIZ TOUTONGE

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CÂMARAS REVERBERANTES EM
ESCALA REDUZIDA PARA O ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE
PERDA DE TRANSMISSÃO DE DIVISÓRIAS CONFECCIONADAS A
PARTIR DE MATERIAIS REGIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Vibrações e Acústica, da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: **Prof. Dr. Newton Sure Soeiro.**

Belém – Pará – Brasil

Setembro 2006

JOSÉ DE AVIZ TOUTONGE

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CÂMARAS REVERBERANTES EM
ESCALA REDUZIDA PARA O ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE
PERDA DE TRANSMISSÃO DE DIVISÓRIAS CONFECCIONADAS A
PARTIR DE MATERIAIS REGIONAIS**

Dissertação submetida para a obtenção do Título
de Mestre em Engenharia Mecânica no Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Pará.

Belém-Pará, 05 de Setembro de 2006.

BANCA EXAMINADORA:

Orientador Prof. Dr. Newton Sure Soeiro

Universidade Federal do Pará

Orientador Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo

Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Said Mounsif

Universidade Federal do Pará

Prof. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha

Universidade Federal do Pará

Aprenda a receber as adversidades da vida como desafios à sua própria necessidade de viver e vencer.

Saiba que não tem tanto valor aquilo que vem de graça, quanto o que é conquistado com muito esforço e grande sacrifício, porque, quem vive a ganhar não tem oportunidade de contemplar um caminho que ele mesmo não percorreu. Aquele, porém, que se esforçou por conseguir, lembrará em cada pedaço do caminho um tempo de luta e um sabor de conquista.

(J. S. Nobre).

Agradecimentos

Ao meu grande e eterno Deus (*Jeová*) que foi, e sempre será, fundamental em minha vida.

Aos meus familiares, em especial ao meu pai *Eduardo Toutonge* e minha mãe *Francisca de Aviz*, que sempre me apoiaram durante toda minha trajetória estudantil e profissional.

Aos meus amigos da turma de mestrado de 2003 que, de alguma forma, puderam ajudar-me na conclusão deste objetivo: Reginaldo, Alexandre, Marlenne, Rubenildo, Sérgio, Paulo, Sinimbú e Benevenuto.

Ao meu orientador Newton Sure Soeiro pela oportunidade, pelo voto de confiança, pela paciência e pelo crescimento pessoal e profissional proporcionado.

Aos professores do GVA: Gustavo Melo e Alexandre Mesquita, em especial ao professor Gustavo Melo por todo ensinamento proporcionado.

Aos meus amigos Rui Guedes e Reginaldo Guedes pela ajuda imprescindível na construção das câmaras; ao amigo Alexandre Pinheiro pela ajuda concedida e consideração.

Aos demais integrantes e amigos do GVA pela ajuda e pelos momentos compartilhados: Alan, Keliene, Márcio, Erlison, Diana, Roberta, Hélder, Juliana, Fábio Setúbal, entre outros.

À Universidade Federal do Pará (UFPA) por toda colaboração para a realização desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro que foi muito importante para a realização deste projeto de pesquisa.

À POEMATEC pelo apoio material através das mantas de fibra de coco cedidas para os ensaios experimentais.

Por fim, a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvi
NOMENCLATURAS	xvii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2- HIPÓTESES E OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.2.1- Objetivo Geral	3
1.2.1- Objetivos Específicos	3
1.3- JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	4
1.4- PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	5
1.5- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1- TRANSMISSÃO SONORA	9
2.2- MODELOS EM ESCALA REDUZIDA	14
2.3- ANÁLISE ESTATÍSTICA ENERGÉTICA (SEA)	15
2.4- ESTUDOS DE APOIO À DISSERTAÇÃO	16
2.5- ASSOCIAÇÕES E NORMAS	18
CAPÍTULO III – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1- A TRANSMISSÃO E O ISOLAMENTO SONORO	19
3.1.1- Transmissão Através de Três Meios com Incidência Normal	21
3.1.2- Transmissão Através de Três Meios com Incidência Aleatória	25

3.1.3- Transmissão Através de Cinco Meios	26
3.1.4- As Frequências de Ressonância, Coincidência e Crítica	28
3.2- ISOLAMENTO ACÚSTICO SEGUNDO A NORMA ISO 140	31
3.2.1- Síntese das Informações Constantes na ISO 140 – Parte 3	32
3.3- ANÁLISE ESTATÍSTICA ENERGÉTICA (SEA)	33
3.3.1- Parâmetros do Método SEA	34
3.4- CONSIDERAÇÕES GERAIS	39

CAPÍTULO IV – CONSTRUÇÃO DA CÂMARA EM ESCALA REDUZIDA	41
4.1- CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DAS MINI-CÂMARAS GEMINADAS	41
4.1.1- Materiais Utilizados	42
4.1.2- Procedimentos de Construção das Câmaras	43
4.2- CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DAS DIVISÓRIAS A SEREM ENSAIADAS	48
4.3- CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS USADOS NA CONFECÇÃO DAS MINI-CÂMARAS E DAS DIVISÓRIAS ENSAIADAS	51
4.3.1- Materiais Usados nas Câmaras	51
4.3.2- Materiais Constituintes das Divisórias	56
4.4- CONSIDERAÇÕES GERAIS	59

CAPÍTULO V – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DAS DIVISÓRIAS	61
5.1- CÂMARAS REVERBERANTES REDUZIDAS (UFPA / GVA)	61
5.2- SISTEMA DE DIVISÓRIAS – AMOSTRAS DE TESTE	62
5.2.1- Divisória de Fibra de Coco	63
5.2.2- Divisória de Fibra de Açáí	64
5.3- SÍNTESE DA NORMA ISO 140 (1990)	64
5.3.1- Câmaras Reverberantes	65
5.3.2- Amostra de Teste	65
5.3.3- Geração do Campo Sonoro na Câmara de Emissão	66
5.3.4- Medição do Nível de Pressão Sonora Médio	66
5.3.5- Medição da Perda de Transmissão Sonora	69

5.3.6- Medição do Tempo de Reverberação e Avaliação da Área de Absorção Sonora Equivalente	69
5.3.7- Correções para o Ruído de Fundo	71
5.3.8- Expressões dos Resultados	72
5.4- DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NAS CÂMARAS	72
5.5- QUALIFICAÇÃO DAS CÂMARAS REVERBERANTES	72
5.5.1- Área de Absorção Sonora Equivalente	73
5.5.2- Difusividade do Campo Sonoro	77
5.5.3- Análise dos Resultados Obtidos do Processo de Qualificação	79
5.6- DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA	79
5.6.1- Descrição do Conjunto de Procedimentos de Medição	80
5.6.2- Equipamentos Utilizados	81
5.6.3- Processo de Montagem Experimental	81
5.6.4- Resultados Obtidos da Perda de Transmissão das Divisórias	81
5.7- CONSIDERAÇÕES GERAIS	91

CAPÍTULO VI – CÁLCULOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA ATRAVÉS DA SEA

6.1- DETERMINAÇÃO DA PT ATRAVÉS DE CÁLCULOS ANALÍTICOS UTILIZANDO A SEA	92
6.1.1- Formulação Matemática para Determinação da PT segundo a SEA	93
6.1.2- Resultados Obtidos Analiticamente da Perda de Transmissão das Divisórias	96
6.2- ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS ANALÍTICOS	104
6.3- CONSIDERAÇÕES GERAIS	108

CAPÍTULO VII- CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

7.1- CONCLUSÕES FINAIS	109
------------------------------	-----

7.2- RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
ANEXOS	118
A.1- ROTINA ELABORADA NO MATLAB	118
A.2- CÂMARAS REVERBERANTES DA UFSM	120
A.3- FOTOS ADICIONAIS	121

RESUMO

TOUTONGE, José de Aviz, *Projeto e construção de câmaras reverberantes em escala reduzida para o estudo das características de perda de transmissão de divisórias confeccionadas a partir de materiais regionais*, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, 2006.

Projetar e construir câmaras reverberantes, em modelo reduzido, para a determinação da perda de transmissão de materiais usados para o controle de ruído nas áreas industriais e da construção civil foi o foco principal deste trabalho. Por outro lado, buscou-se estabelecer uma metodologia de análise e interpretação dos parâmetros acústicos a partir da teoria dos modelos em escala reduzida, de tal modo que se possa inferir a perda de transmissão dos materiais estudados. A necessidade desta construção ocorre devido aos estudos dos desempenhos acústicos dos materiais serem realizados em câmaras reverberantes (em escala real), disponíveis apenas em algumas regiões do Brasil, dificultando e encarecendo os testes de desempenho dos materiais para pesquisadores de outras regiões. Assim, de modo a se ter um custo baixo, foi realizada a construção das câmaras reverberantes, em escala reduzida de 1:6, sendo o objetivo principal o estudo da perda de transmissão de divisórias desenvolvidas com material regional, estabelecendo comparação entre os seus desempenhos, e ao mesmo tempo permitir a sua utilização em aulas práticas de acústica. Apesar das câmaras terem sido construídas em escala reduzida, o fator de escala (1:6) não foi considerado e as medições foram realizadas nas frequências reais das bandas de oitava delimitadas entre 125 Hz e 8 kHz. As divisórias foram ensaiadas para a determinação dos parâmetros acústicos, tendo por base as normas ISO 140 e 354. Finalmente, a partir dos resultados encontrados, foi possível comprovar a eficiência dos materiais utilizados para a obtenção de divisórias que podem ser usadas para o isolamento de ruído em ambientes construídos e/ou enclausuramentos industriais. Além dos ensaios experimentais, foram realizados cálculos analíticos segundo as equações da Análise Estatística Energética (SEA) para efeito de comprovação e validação dos resultados.

Palavras-chave: câmara reverberante, modelo reduzido, perda de transmissão, campo difuso.

ABSTRACT

TOUTONGE, José de Aviz, *Project and construction of reverberant chambers in reduced scale to the study of the characteristics of party walls transmission loss developed with regional materials*, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, 2006.

To project and build reverberant chambers, in scaled model, for the determination of materials transmission loss used for noise control purposes was the objective of this research. Besides, the research seeks to establish a methodology of analysis and interpretation of the acoustic parameters starting from the theory of scaled models, in such way that one can infer the transmission loss of the studied materials. The necessity of this construction occurs due to the non availability of real scale reverberant chambers (only available in some regions of Brazil), making it difficult and raising the costs of material performance tests in other Brazilian regions. Therefore, reverberant chambers were constructed in a reduced scale of 1:6, in order to allow the transmission loss study of party walls, developed with regional materials, confronting their performances and, simultaneously, their use in academic activities. Despite the fact of the chambers have been constructed in reduced scale, the scale factor (1:6) was not considered, meaning that measurements had been carried through in the real octave bands between 125 Hz and 8 kHz. Party walls had been assayed for the determination of the acoustic parameters, based on ISO 140 and 354. Finally, from experimental results, it was possible to prove the efficiency of materials used in the construction of partitions, which could be used for noise isolation purposes in buildings and industrial enclosures. Apart from the experimental assays, analytical calculations had been fulfilled according to the formulation of Analysis Energy Statistics (SEA) in order to provide evidence and validation of the results.

Keywords: reverberant chamber, scaled model, transmission loss, diffuse field.

LISTA DE FIGURAS

3.1- Configuração física do modelo de transmissão da onda plana, com incidência normal, através de três meios (Adaptação de Gerges, 2000)	21
3.2- Configuração física do modelo de transmissão da onda plana através de cinco meios (Adaptação de Gerges, 2000)	27
3.3- Gráfico referente à relação entre o ângulo de incidência coincidente e a razão de frequência (Adaptação de Fahy, 1985)	30
4.1- Esquema gráfico das mini-câmaras reverberantes	44
4.2- Imagem do corte C' realizado na folha de compensado de 20 mm para a confecção da câmara	45
4.3- Imagem da câmara emissora em fase de montagem	46
4.4- Imagem da câmara emissora com a instalação das tiras de madeira que servem para a fixação das divisórias	46
4.5- Imagem da câmara, em fase de montagem, com a instalação das duas folhas do vidro de 5 mm montadas com um espaço de ar entre elas de 10 mm	47
4.6- Imagem da câmara receptora, em fase de montagem, com a instalação da fita de borracha isolante ao redor de todo o seu perímetro de contato com a divisória	47
4.7- Imagem da câmara emissora, em fase de montagem, com os isoladores de vibrações sonoras instalados	48
4.8 – Detalhamento da Divisória	49
4.9- Imagem de uma das colméias, caixilho onde a divisória fica instalada, em fase de construção	50
4.10- Imagem de uma das colméias com a instalação de uma das chapas de compensado de 4 mm	50
4.11- Imagem de uma das colméias com a instalação de uma das mantas de fibra de coco, especificamente uma manta de 10 cm de espessura	51
4.12- Imagem de visualização das fibras das camadas do compensado	52
4.13- Gráfico referente à relação do coeficiente de transmissão (STC) com o espaço entre as placas para o vidro	54
4.14- Imagem das folhas de vidro de 5 mm	55

4.15- Imagem dos isoladores de vibração sonora da Linha Micro II utilizados	56
4.16- Imagem de uma das mantas de fibra de coco ensaiadas	57
4.17- Imagem da fibra de açaí utilizada nos ensaios	58
4.18- Imagem da chapa de compensado de 4 mm	59
5.1- Representação esquemática da determinação da perda de transmissão	62
5.2- Representação esquemática dos pontos de medição nas câmaras reverberantes	68
5.3- Curva de decaimento da pressão sonora para a banda de 4kHz na determinação do tempo de reverberação	75
5.4- Perda de Transmissão gráfica das divisórias de fibra de coco de 50 mm	83
5.5- Perda de Transmissão gráfica das divisórias de fibra de coco de 100 mm	83
5.6- Perda de Transmissão gráfica de todas as divisórias de fibra de coco	84
5.7- Desvio Padrão das divisórias de fibra de coco	85
5.8- Perda de Transmissão gráfica para as divisórias de fibra de açaí	86
5.9- Desvio Padrão das divisórias de fibra de açaí	87
5.10- Perda de Transmissão gráfica para a divisória de compensado sem amostra	88
5.11- Comparação da Perda de Transmissão de todas as divisórias ensaiadas	89
5.12- Desvio Padrão de todas as divisórias ensaiadas	90
5.13- Comparação da Perda de Transmissão das divisórias DFC VI, DFA I e DCSA	90
6.1- Modelo de SEA composto por três subsistemas (Adaptada de <i>AUTOSEA USER'S GUIDE</i> , 2002)	92
6.2- Perda de Transmissão Analítica das divisórias de fibra de coco de 50 mm	97
6.3- Perda de Transmissão Analítica das divisórias de fibra de coco de 100 mm ..	97
6.4- Perda de Transmissão Analítica de todas as divisórias de fibra de coco	98
6.5- Desvio Padrão Analítico das divisórias de fibra de coco	99
6.6- Perda de Transmissão Analítica para as divisórias de fibra de açaí	100
6.7- Desvio Padrão das divisórias de fibra de açaí	101
6.8- Perda de Transmissão Analítica para a divisória de compensado sem amostra	102
6.9- Comparação da Perda de Transmissão Analítica de todas as divisórias	103
6.10- Desvio Padrão Analítico de todas as divisórias	103
6.11- Comparação da PT Analítica das divisórias DFC VI, DFA I e DCSA	104

6.12- Comparação dos resultados da divisória DFC VI	105
6.13- Desvio Padrão da divisória DFC VI	106
6.14- Comparação dos resultados da divisória DFA I	107
6.15- Desvio Padrão da divisória DFA I	107

LISTA DE TABELAS

3.1- Valores da constante de diversos materiais para se encontrar a frequência crítica	31
4.1- Dimensões das câmaras reverberantes em escala reduzida	43
4.2- Relação entre as dimensões das câmaras reverberantes em escala reduzida ..	44
4.3- Isolamento sonoro fornecido pelo vidro	54
4.4- Dados característicos do isolador de vibrações utilizado	56
5.1- Dimensões da geometria das câmaras reverberantes e da abertura de teste	62
5.2- Coordenadas dos pontos de medição e localização dos microfones	68
5.3- Máxima área de absorção sonora equivalente para câmara com volume de 200 m ³ sugerida pela norma ISO 354, em bandas oitava	73
5.4- Máxima área de absorção sonora equivalente para câmara reduzida com volume de 0,295 m ³ , em bandas de oitava	74
5.5- Resultados do TR da câmara receptora da UFPA-GVA, em bandas de oitava	76
5.6- Análise da área de absorção sonora equivalente para a câmara receptora, em bandas de oitava	76
5.7- Desvio padrão dos NPS medidos na câmara emissora, em bandas de oitava ..	78
5.8- Desvio padrão dos NPS medidos na câmara receptora, em banda de oitava ...	78
5.9- Resultados Experimentais da PT das divisórias de fibra de coco	82
5.10- Resultados Experimentais da PT das divisórias de fibra de açai	85
5.11- Resultado Experimental da PT da divisória de compensado sem amostra	87
5.12- Resultados Experimentais da PT de todas as divisórias ensaiadas	88
6.1- Resultados Analíticos da PT das divisórias de fibra de coco	96
6.2- Resultados Analíticos da PT das divisórias de fibra de açai	99
6.3- Resultado Analítico da PT da divisória de compensado sem amostra	101
6.4- Resultados Analíticos da PT de todas as divisórias	102
6.5- Comparação dos resultados experimental e analítico da divisória DFC VI	105
6.6- Comparação dos resultados da divisória DFA I	106

NOMENCLATURAS

Letras Latinas

A	área de absorção sonora equivalente
A_M	constante do material
A_i, B_i	amplitudes de pressões acústicas
B	rigidez à flexão da placa
c	velocidade de propagação do som no fluído
c_g	velocidade de propagação de grupo
c_l	velocidade de propagação da onda longitudinal no sólido
d	densidade
D	diferença de nível de pressão sonora
E	módulo de Young
E	energia de um sistema
f	freqüência sonora de ressonância mecânica
f_c	freqüência sonora crítica
f_{co}	freqüência sonora de coincidência
K	constante de rigidez
k	número de ondas
l, h	espessura da parede
L	comprimento
L_x	dimensão da câmara na direção x
L_y	dimensão da câmara na direção y
L_z	dimensão da câmara na direção z
m	massa
M	densidade de área
N	número de modos
P	pressão sonora em RMS
P_i	pressão sonora incidente
P_r	pressão sonora refletida
P_t	pressão sonora transmitida

R	índice de redução sonora
S, A_p	área do material
T_{60}	tempo de reverberação
U	velocidade das partículas
v	velocidade de um movimento harmônico
V	volume
z	impedância característica

Letras Gregas

$\bar{\alpha}$	coeficiente médio de absorção sonora
$\alpha_{\text{médio}}$	coeficiente médio de transmissão sonora
α_t	coeficiente de transmissão sonora
δ_{BC}	fator de incerteza
ϕ	ângulo de integração
η_i	coeficiente de perda por amortecimento
η_{ij}	coeficiente de perda por acoplamento
$\eta(\omega)$	densidade modal
λ	comprimento de onda sonora
π	número pi
θ_i	ângulo de incidência
θ	ângulo de fase
ρ	densidade do meio
σ_{rad}	eficiência de radiação
ν	coeficiente de Poisson
ω	frequência sonora angular
ζ	amortecimento crítico
Π	fluxo de energia incidente no sistema

Abreviaturas

Eq. equação

Fig. figura

Siglas

ANBT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BBC	“ <i>British Broadcasting Corporation</i> ”
DCSA	Divisória de Compensado Sem Amostra
DFA	Divisória de Fibra de Açai
DFC	Divisória de Fibra de Coco
GVA	Grupo de Vibrações e Acústica
IEC	“ <i>International Engineering Consortium</i> ”
ISO	“ <i>International Organization for Standardization</i> ”
LVA	Laboratório de Vibrações e Acústica
NPS	Nível de Pressão Sonora
NPS _{combinado}	Nível de Pressão Sonora Combinado
NPS _{corrigido}	Nível de Pressão Sonora Corrigido
NPS _{rf}	Nível de Pressão Sonora do Ruído de Fundo
\overline{NPS}	Nível de Pressão Sonora Médio
PT	Perda de Transmissão
PT _{camp}	Perda de Transmissão de Campo
PT _{al}	Perda de Transmissão Aleatória
RMS	“ <i>Root Mean Square</i> ”
RF	Ruído de Fundo
SEA	“ <i>Statistical Energy Analysis</i> ”
TL	“ <i>Transmission Loss</i> ”
TR	Tempo de Reverberação

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o passar dos anos e com o aumento da densidade populacional, o ruído vem crescendo de tal forma que atingiu o reconhecimento como um dos maiores problemas da poluição ambiental, fazendo com que a poluição sonora seja uma das formas de poluição que mais tem preocupado engenheiros, urbanistas e arquitetos.

O ruído é um contaminante que deteriora o equilíbrio natural e ecológico, fazendo com que as pessoas expostas ao mesmo tornem-se estressadas. As conseqüências negativas provocadas pelo ruído ao ser humano, sejam elas patológicas ou psico-emocionais, já foram comprovadas cientificamente e revisadas em literaturas científicas dos últimos 20 anos.

Ficou confirmado que o corpo humano reage contra os efeitos negativos da poluição sonora. Um nível de pressão sonora entre 55 e 65 dBA já mantém o corpo em estado de alerta; o indivíduo sente dificuldades em relaxar e de se concentrar. O excesso de ruído provoca outros malefícios à saúde humana, a exemplo dos problemas na audição, que serão sentidos com o passar dos anos.

Em vigília, o ruído de até 50 dBA provoca um leve estresse excitante causando dependência e levando a um desconforto durável. A cerca de 65 dBA começa o estresse degradativo do organismo com desequilíbrio bioquímico, aumentando o risco de enfarte, derrame, infecções, osteoporose, etc. A partir de 80 dBA o organismo já libera morfina biológica no corpo, provocando prazer e completando o quadro de dependência. A 100 dBA já pode ocorrer, dependendo da susceptibilidade, a perda imediata da audição. Por outro lado, o sono a partir dos 35 dBA vai ficando superficial, já a 75 dBA atinge perda de 70% do estágio do chamado sono profundo.

Tais fatos têm despertado interesse de engenheiros, arquitetos e dos demais profissionais responsáveis por construções de ambientes quanto ao conforto acústico de

seus projetos. Sabe-se que um bom projeto acústico prevê o isolamento e a absorção acústica utilizados com critérios bem definidos, objetivando a melhor eficácia no resultado final. E quando se fala em isolamento contra ruído, deseja-se que o ruído interno de um determinado ambiente não perturbe as pessoas próximas. Sabe-se, também, que quanto maior a densidade do obstáculo sonoro, maior o isolamento. Assim, obstáculos com grande espessura apresentam as maiores atenuações e, portanto, o isolamento sonoro é diretamente proporcional à densidade superficial de massa: é a chamada “Lei das Massas”.

Entretanto, para Arquitetos e Engenheiros um dos maiores desafios em uma construção é justamente o projeto acústico deste ambiente. Isto ocorre devido ao estudo acústico de uma edificação não ser habitual em razão da complexidade e demora dos métodos mais utilizados.

Devido à dificuldade de se estabelecer o isolamento sonoro dos materiais, é comum ocorrer enganos quanto à escolha do material a ser utilizado. E com a finalidade de se evitar esses prejuízos, faz-se necessário um estudo sobre o desempenho da perda de transmissão sonora dos materiais, normalmente, utilizados na construção de projetos arquitetônicos, de engenharia ou de novos materiais que possam vir a ser usados.

Nesta Dissertação, amostras de materiais foram testadas na forma de divisórias posicionadas entre as duas mini-câmaras reverberantes, de modo a se verificar a metodologia experimental, assim como os cálculos analíticos, usados para a determinação da característica de transmissão dos materiais testados.

1.2 HIPÓTESES E OBJETIVOS DO TRABALHO

Devido aos grandes problemas que envolvem a relação entre o homem e seus ambientes construídos, centrado na questão do ruído, busca-se minimizar esses problemas através de métodos que facilitem o estudo prévio do desempenho acústico dos materiais utilizados em edificações. Assim, motivado pelo pensamento da ergonomia, estudo que objetiva construir ambientes e produzir instrumentos de trabalho

adequados ao homem, pode-se estabelecer as hipóteses de pesquisa que delinearão o trabalho desenvolvido.

Além dos ensaios experimentais, foi implementado um método analítico através do *software* MATLAB (consiste em um pacote de *softwares* interativos de alta performance para a computação numérica científica e de engenharia), utilizando equações da Análise Estatística Energética (SEA), para prever os níveis de ruído dos interiores das câmaras, o que possibilita aperfeiçoar o estudo do isolamento sonoro. Com isto, considera-se possível:

- Especificar um método de medição da isolamento sonora, através de um modelo reduzido de elementos de construção, tais como paredes e divisórias;
- Adequar a aplicação das equações da metodologia SEA para a determinação do isolamento acústico dos materiais testados.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta Dissertação é a construção de duas mini-câmaras reverberantes geminadas que permita realizar estudos da perda de transmissão de divisórias desenvolvidas com material regional, estabelecendo comparação entre os seus desempenhos e, ao mesmo tempo, permitir a sua utilização em aulas práticas de acústica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar, construir e qualificar as mini-câmaras reverberantes com o objetivo de determinar a perda de transmissão sonora de materiais usados para isolamento acústico;
- Estabelecer procedimentos de medição visando determinar a perda de transmissão sonora dos materiais testados;

- Ensaiar materiais comerciais (regionais e/ou nacionais) na câmara reduzida para a determinação de suas perdas de transmissão sonora;
- Desenvolver uma rotina de cálculo analítico através do *software* MATLAB, usando as equações do Método da Análise Estatística Energética e comparar as previsões do método com os resultados experimentais obtidos durante os ensaios experimentais.

1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Os estudos dos desempenhos acústicos dos materiais são feitos em câmaras reverberantes, as quais estão somente disponíveis nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, dificultando e encarecendo os testes de desempenho dos materiais para pesquisadores de outras regiões. A necessidade de se ter uma câmara na região Norte é grande, pois nesta região não existe nenhum laboratório em condições de realizar ensaios onde seja necessária a utilização de câmaras reverberantes como, por exemplo, no caso em que se deseja determinar a medição da perda de transmissão sonora.

A construção de uma câmara real exige um grande investimento financeiro, tornando o projeto financeiramente inviável para algumas universidades. Desta forma, a construção de câmaras em modelo reduzido vem suprir essa necessidade com um investimento quase insignificante se comparado ao que seria necessário para a construção de uma câmara em tamanho real. A construção das mini-câmaras, além de reduzir os custos dos ensaios a serem realizados (solucionando os problemas causados pela distância), permite colaborar na identificação e qualificação de materiais capazes de garantir condições de conforto acústico para o homem em todos os ambientes de seu cotidiano.

Além de reduzir o custo financeiro, a configuração da maquete tem a vantagem de poder ser modificada com facilidade caso ocorra algum problema com a estrutura da mesma. Outra vantagem é o fato da realização de testes dos materiais existentes de forma mais didática, pois uma câmara reduzida geralmente não é feita dos mesmos materiais de uma câmara real, exige uma amostra reduzida do material a ser testado e pode ser locomovida com facilidade para estudos em qualquer lugar como laboratórios e

a própria sala de aula. Adicionalmente, segundo trabalhos já realizados com modelos reduzidos, apesar de ser quase impossível construir um modelo menor com os mesmos materiais usados nos modelos reais, tem-se que o comportamento sonoro para os modelos reduzidos pode alcançar valores bem próximos aos valores obtidos para os modelos reais, justificando a importância da utilidade e validação destes modelos.

O estudo e caracterização da performance acústica dos materiais testados servem de suporte para o detalhamento dos diversos materiais e sistemas construtivos utilizados em edificações, ampliando a possibilidade de acesso ao conforto acústico para os responsáveis pelas edificações e beneficiando a população em geral.

Desta forma, este trabalho se insere para atender as seguintes demandas: a qualificação acústica de materiais regionais e dos materiais de edificações utilizados no Brasil, suprimindo a necessidade dos alunos em se familiarizarem com os métodos de ensaio em laboratório, em nível de graduação e pós-graduação.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo iniciou-se com ênfase para a Revisão Bibliográfica, com o intuito de buscar conhecimentos afins e rever a interpretação prática dos conceitos tradicionalmente utilizados: o Isolamento Acústico, a abordagem SEA (Análise Estatística de Energia), o estudo acústico dos materiais testados em formas de divisórias e as legislações e normas existentes referentes ao tema do projeto.

A seguir, foram trabalhados os conceitos básicos necessários para dar suporte ao desenvolvimento da dissertação, focalizando basicamente a determinação da Perda de Transmissão Sonora e o Método da Análise Estatística Energética (SEA).

Cálculos analíticos foram realizados, utilizando equações da Análise Estatística Energética. A fase experimental, realizada após o processo de qualificação das câmaras reverberantes, complementou a aquisição de dados, onde foram utilizadas instalações e equipamentos do Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal do Pará (LVA/UFPA).

Após cumprirem-se as etapas dos cálculos analíticos e dos ensaios experimentais, realizou-se uma análise comparativa dos resultados, caracterizando-se acusticamente o processo construtivo em estudo, ou seja, as divisórias constituídas dos devidos materiais testados durante os ensaios.

Desta forma, pode-se comprovar a usabilidade da câmara construída e a adequação da metodologia usada, no que diz respeito à determinação da Perda de Transmissão sonora, dos materiais testados.

Finalmente, as atividades desenvolvidas para a concretização desta Dissertação podem ser delimitadas por cinco etapas: determinação dos parâmetros necessários; qualificação das câmaras reverberantes; realização de ensaios experimentais; execução de cálculos analíticos; compilação e análise de todos os resultados.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está constituído de sete capítulos, assim distribuídos:

- Capítulo 1 - Introdução

Este capítulo apresenta o tema, as atividades desenvolvidas e a estrutura de redação do documento. Identifica os objetivos do trabalho, suas justificativas e contribuições.

- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Este capítulo descreve, sucintamente, o levantamento das informações literárias que deram apoio ao desenvolvimento deste projeto. Buscou-se fazer um breve resumo dos principais artigos, projetos e normas, dentre outros documentos, para que se pudesse obter um melhor entendimento deste estudo.

- Capítulo 3 - Fundamentação Teórica

Apresenta um histórico sobre a transmissão sonora, define a transmissão e o isolamento do som. Identifica a transmissão sonora dos materiais ensaiados e faz uma consideração sobre Isolamento acústico segundo a norma ISO 140. Além disso, mostra uma síntese do método SEA e de seus parâmetros.

- Capítulo 4 - Construção da Câmara em Escala Reduzida

Fornecer informações sobre todo o processo de construção das mini-câmaras reverberantes e das divisórias, bem como informações sobre os materiais que foram utilizados para a confecção das mesmas.

- Capítulo 5 – Avaliação Experimental da Perda de Transmissão das Divisórias

Descreve a determinação experimental da Perda de Transmissão Sonora das divisórias testadas, os princípios de medição e o processo de qualificação das câmaras.

- Capítulo 6 – Cálculos Analíticos para a Determinação da Perda de Transmissão Sonora Através da SEA

Apresenta os cálculos analíticos relativos à Perda de Transmissão (PT), utilizando as equações da Análise Estatística Energética (SEA), finalizando com as comparações das respostas analíticas e experimentais.

- Capítulo 7 – Considerações Finais e Conclusões

Mostra as conclusões da Dissertação, através de uma relação com os objetivos propostos. Estabelece sugestões e orientações para pesquisas futuras a serem desenvolvidas em temas ou com metodologias similares à presente Dissertação.

As bibliografias citadas no texto e os anexos encerram o presente documento.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo descreve, sucintamente, o levantamento de informações bibliográficas dentre projetos, artigos, dissertações, teses e normas, que deram apoio ao desenvolvimento do trabalho.

A pesquisa bibliográfica executada foi direcionada na busca de trabalhos relacionados à Perda de Transmissão em Câmaras Reverberantes e aos Modelos em Escala Reduzida. Durante a pesquisa foram encontrados diversos artigos que incorporam os itens a seguir, onde podem ser verificados os objetivos, procedimentos e conclusões das principais referências bibliográficas utilizadas.

2.1 TRANSMISSÃO SONORA

Na Tese realizada por Paixão (2002), intitulada “*Caracterização do Isolamento Acústico de uma Parede de Alvenaria, utilizando Análise Estatística Energética (SEA)*”, foram estudadas questões conceituais referentes ao isolamento acústico, onde foi constatada a inexistência de dados confiáveis sobre materiais e técnicas construtivas, havendo a determinação dos parâmetros físicos-mecânicos e acústicos para a parede de alvenaria. Através da abordagem da SEA, empregada pela simulação numérica das câmaras reverberantes e da parede utilizada experimentalmente, foi possível caracterizar a frequência crítica. Contudo, as ressonâncias não puderam ser especificadas devido à espessura da parede, pois o trabalho foi realizado com a Teoria das Placas Finas. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com as simulações e comprovados através dos cálculos analíticos. Além da análise dos resultados, foi possível sugerir um novo gráfico relacionando a frequência e o nível de pressão sonora para o estudo do isolamento acústico de uma parede simples.

Gomes (2005) faz, em sua Dissertação, uma caracterização dos fenômenos vibro-acústicos presentes em uma estrutura similar à fuselagem de uma aeronave. Para tal fim, modelos analítico-numéricos foram desenvolvidos utilizando a metodologia de SEA. A

avaliação da contribuição dos caminhos de propagação ressonante e não-ressonante (“Lei da Massa”) na transmissão sonora foi realizada. No procedimento de análise, diversos modelos foram construídos visando comparar as formulações encontradas na literatura e os valores oriundos dos testes experimentais realizados. Duas classes de painéis foram investigadas: painel simples e painel reforçado por vigas. Os ensaios experimentais foram realizados com o auxílio de duas câmaras reverberantes adjacentes, as quais possibilitaram avaliar a transmissibilidade sonora do painel. As análises dos resultados encontrados apresentaram uma avaliação refinada da contribuição de cada caminho de propagação na transmissão energética, bem como uma análise detalhada dos fenômenos vibro-acústicos existentes. Por fim, as principais contribuições do trabalho foram: as análises realizadas sob as diversas abordagens de modelagem de SEA e a constatação da capacidade de predição dos fenômenos vibro-acústicos por meio da metodologia de SEA em painéis metálicos nas regiões de médias e altas frequências.

Papadopoulos (2002) realizou um projeto que faz o estudo de um procedimento numérico para estimar a perda de transmissão sonora de estruturas de salas de transmissão sonora através de um laboratório virtual (LV). Este laboratório faz uma representação numérica de um laboratório real constituído de duas salas reverberantes. A geometria de transmissão das salas foi projetada seguindo princípios, a fim de alcançar condições de campo difuso e distribuição modal preliminar suficientemente homogêneas na região de baixas frequências. Um procedimento de otimização baseado em elementos finitos, introduzido pelo autor em um trabalho precedente foi estendido para formar salas arbitrariamente. A análise de resposta acústica do estado estacionário também foi executada a fim de quantificar a qualidade acústica do campo da transmissão das salas virtuais na escala de frequência das medidas. Além disso, um método para calcular a absorção total (A) da sala receptora foi introduzido pela simulação do procedimento de medição do tempo de reverberação usando a análise transiente da resposta acústica.

Em 2000, Kang et al., fizeram uma investigação experimental na distribuição direcional da energia incidente para a predição da perda de transmissão sonora de uma parede. Os resultados experimentais sugerem que a fórmula do coeficiente de transmissão deve ser revisada introduzindo uma função de distribuição angular apropriada como uma função mais complexa para descrever a distribuição direcional da

densidade de energia, que substitui o método convencional da incidência do campo. A fórmula revisada foi aplicada à predição da perda de transmissão para um painel de folha dupla com uma cavidade de ar, em que sua eficácia é fortemente comprovada por uma boa concordância entre os valores medidos e previstos. Mostrou-se que a distribuição direcional da energia incidente medida apóia os resultados teóricos precedentes obtidos pela simulação numérica. Conseqüentemente, as suposições convencionais tais como a distribuição direcional uniforme, que negligenciam a variação angular da energia sonora incidente, não representam a condição de teste real na medição da perda de transmissão sonora das divisórias em uma câmara reverberante.

Khilman e Nilsson (1972) fizeram, em seu trabalho, uma investigação dos efeitos de projetos típicos de laboratórios de transmissão. Neste, a influência de molduras de teste, aberturas de teste com fendas profundas e as condições de montagem foram examinadas, separadamente, para alguns tipos de paredes comuns. O índice de redução sonora foi medido para duas paredes com baixa densidade superficial de massa, cada uma montada de duas diferentes maneiras. O propósito desta investigação foi examinar possíveis diferenças para o índice de redução sonora medido, devido às condições de montagem. Tais resultados permitem identificar como as condições de montagem da câmara podem influenciar nos resultados dos testes.

Laranja e Tamagma (2001) em seu trabalho “*Transmissão sonora através de paredes simples*” tiveram como objetivo apresentar o resultado de comparações entre vários métodos analíticos para o cálculo da redução da transmissão sonora entre paredes simples e divisórias comumente utilizadas, de forma a contribuir no projeto de enclausuramento ou na organização do controle de ruído em ambientes.

Os valores preditos para a isolação acústica de painéis de parede simples e dupla, usando os modelos analíticos desenvolvidos, previamente, pelos autores Tadeu, Antonio, e Mateus (2004) foram comparados com os laudos experimentais. O método analítico foi integralmente usado, levando em conta o acoplamento entre o ar e os painéis sólidos, e não houve nenhuma limitação em sua espessura, como as aproximações de Kirchhoff ou de Mindlin requerem. Os experimentos laboratoriais envolvem colocação de amostras de teste entre câmaras padrão. Os resultados foram apresentados para os painéis feitos de vidro, concreto e aço. Dos resultados pode-se

concluir que as soluções analíticas previstas estão em bom acordo com os resultados experimentais, exceto quando a área dos painéis é muito pequena e as frequências são muito baixas. Em frequências baixas, os resultados experimentais parecem ser afetados, significativamente, pelos efeitos de ressonância associados com a criação de ondas estacionárias dentro das câmaras acústicas e pelos modos de vibrações introduzidos no sistema dinâmico pela limitação no movimento do painel ao longo de seu limite.

Os resultados experimentais da isolamento sonora de vidros simples, duplos e triplos são relatados no trabalho de Tadeu e Mateus (2001). As experiências laboratoriais foram executadas colocando as amostras de teste entre duas salas relativamente pequenas, onde o número dos painéis de vidro, sua espessura, a espessura da abertura de ar entre os painéis e o tipo de suporte preparado foram as variáveis consideradas. Neste trabalho, as curvas experimentais da isolamento obtidas são comparadas com aquelas previstas pelos modelos analíticos simplificados. Esta análise mostrou que os modelos previstos, particularmente quando aplicados às janelas de vidros múltiplos, exibem diferenças marcantes quando comparados com os dados experimentais. Os resultados experimentais demonstraram que os modelos teóricos descritos neste trabalho não fazem previsões que estejam próximas dos resultados experimentais para as condições de vidro simples e duplo. A menor diferença entre a isolamento predita e alcançada experimentalmente ocorre, geralmente, para os painéis de vidro simples. Os resultados experimentais relatados neste artigo serviram de apoio teórico e de um prévio apoio experimental sobre a isolamento sonora das aberturas vitrificadas que serão usadas nas câmaras.

Quirt (1983) através de dados experimentais da perda de transmissão sonora para janelas de vidro duplo e triplo fez, em seu artigo, comparações com as previsões de diversos modelos teóricos. Equações simples que fornecem um ajuste empírico satisfatório aos dados foram propostas. A perda de transmissão de vidro duplo foi comparada com a perda do vidro triplo e os resultados foram muito similares quando os afastamentos combinados dos painéis da janela tripla coincidem com o afastamento do vidro duplo. O vidro triplo, entretanto, exibiu uma perda de transmissão mais elevada consistentemente em frequências abaixo da ressonante do sistema massa-ar-massa e na vizinhança do vale de coincidência.

O artigo de Craik (2001) faz um estudo dos desenvolvimentos recentes em modelos de cálculo para a transmissão sonora em construções que têm se concentrado na trajetória direta e nas trajetórias pelos flancos que cruzam somente uma junção estrutural. Entretanto, em construções reais há muitas outras trajetórias que envolvem a transmissão através de mais de uma junção estrutural e embora estas trajetórias, individualmente, sejam relativamente sem importância, sua contribuição total pode ser significativa. Um número de estudos de caso numérico foi empreendido e mostra-se que para muitos casos estas trajetórias mais longas são, simultaneamente, mais importantes do que as trajetórias pelos flancos de primeira ordem, que, por sua vez, são, freqüentemente, mais importantes do que a trajetória direta.

Gerges (2002) traz em seu livro “*Ruído, Fundamentos e Controle*” informações teóricas e práticas muito interessantes, principalmente no que diz respeito aos capítulos 3, 5 e 11 que tratam, respectivamente, da Instrumentação para Medição e Análise de Ruído e Vibrações, do Isolamento de Ruído, e da Análise Estatística de Energia (SEA). O mesmo acompanha uma vasta lista de referências bibliográficas que ajudam no aprofundamento do estudo em questão.

Os artigos citados, neste item, relatam questões conceituais, assim como procedimentos experimentais e cálculos analíticos referentes à Perda de Transmissão de diversas estruturas, tais como fuselagem de aeronaves, parede de alvenaria, vidros e a própria estrutura de câmaras reverberantes, que auxiliaram, de forma imprescindível, no projeto de construção das câmaras, das divisórias e nos ensaios experimentais da presente Dissertação.

2.2 MODELOS EM ESCALA REDUZIDA

Barron e Coleman (2000) estudaram a absorção sonora de assentos de teatros e auditórios em uma escala reduzida de 1:25 testados em uma câmara reduzida na escala de 1:8. Esta câmara consistiu de um tanque de aço com uma tampa de acrílico transparente. Este trabalho mostra, de forma clara, a importância dos trabalhos com modelos reduzidos, pois apenas um pequeno número de assentos poderia ser testado em uma câmara padrão (em média 24 no máximo) fugindo da realidade de um teatro grande

(com aproximadamente 300 assentos). Daí a necessidade de se utilizar a escala dos assentos diferente da escala da câmara, de modo que o volume da câmara fosse 30 vezes maior do que uma câmara padrão o que implica em conduzir medições com um número maior de assentos. Para se chegar aos resultados foram utilizados dois métodos: o primeiro proposto para medidas em câmara reverberante envolvendo a extrapolação quando os resultados dos coeficientes de absorção são aplicados aos auditórios reais; o segundo foi o método alternativo da barreira para medidas da câmara reverberante. Comparações também foram feitas entre esses métodos, além da investigação da absorção de um número pequeno de fileiras.

Em seu trabalho sobre a validação e utilidades de uma câmara reverberante em escala reduzida, Nascimento (2004) usa a abordagem do método empírico para analisar o comportamento acústico de um modelo reduzido. O trabalho consistiu na construção e validação de uma câmara reverberante em modelo reduzido, equivalente à escala de 1:8 de um volume de 200 m³, de acordo com padrões e normas internacionais. Esta câmara, construída de madeira e acrílico, pode ser usada para desenvolvimento de pesquisas sobre acústica, assim como para testar materiais absorventes.

Nunes (2001) construiu uma bancada de acrílico em escala reduzida (escala de 1:6), similar a um compartimento de passageiros para assim desenvolver metodologias para o estudo numérico e experimental do campo sonoro de cavidades veiculares. A análise modal acústica numérica foi efetuada através do método de elementos finitos e os resultados foram validados com uma análise modal acústica experimental, sendo que no aspecto numérico são apresentados o modelo teórico, as condições de contorno e a implementação da fonte acústica. O modelo foi validado fazendo comparações das frequências naturais, formas modais e respostas de pressão sonora com os resultados experimentais, chegando a uma concordância satisfatória. Em uma outra etapa do trabalho foi possível avaliar a alteração do campo sonoro da cavidade com a inclusão de barreiras (bancos rígidos) e absorção (bancos com feltro).

O projeto *Acoustic Scaling (General Outline)* realizado pela BBC (1970), prevê as propriedades acústicas de estúdios e salões de concerto através de modelos acústicos em escala reduzida, além de suprir a necessidade de medir as propriedades de absorção

sonora dos materiais a serem usados nos modelos reduzidos de estúdios e salas de concertos.

Em seu livro “Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos”, Carneiro (1996) aborda de maneira profunda e inovadora os fundamentos da história da análise dimensional; trata, também, de forma dedicada sobre as condições de semelhança que devem ser obedecidas nos ensaios de laboratórios com modelos reduzidos.

Os artigos citados, neste item, proporcionaram um grande apoio teórico quanto aos fatores que poderiam influenciar as propriedades acústicas quando se trabalha com modelos em escala reduzida, apesar da grande maioria dos artigos não tratar do estudo de uma câmara reverberante.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA ENERGÉTICA (SEA)

Craik (2001) fez um estudo da transmissão sonora não-ressonante através de paredes duplas utilizando a SEA. Neste, encontrou-se que o método padrão de computar o fator de perda não-ressonante do acoplamento de uma sala à cavidade menospreza o acoplamento. Um modelo revisado para computar este fator de perda do acoplamento foi apresentado e forneceu uma concordância muito melhor com os dados medidos. Isto permite que melhores predições sejam feitas da transmissão sonora através das paredes duplas leves. A conclusão é que a teoria revisada para acoplamento entre uma cavidade e uma sala fornece uma concordância melhor com os dados medidos do que a teoria original.

Em 1999, Craik e Smith, usaram a SEA para modelar a transmissão sonora através das divisórias de folhas duplas leves. Verificaram que, em baixas frequências, a parede pode ser modelada como um único subsistema quando em frequências mais elevadas deve ser modelada como um número de subsistemas interconectados. Os diferentes modelos da SEA são requeridos dependendo da escala de frequência e do método de construção. Todos os resultados mostram que a estrutura da SEA adapta-se bem ao estudo de paredes duplas. A habilidade de separar trajetos estruturais e de cavidade é

particularmente importante para identificar as situações onde a absorção pode ser benéfica e para destacar onde o tipo de reparo pode ser importante.

Os artigos citados, neste item, proporcionaram um grande apoio quanto aos conceitos teóricos da SEA. Estes conceitos, com destaque para as equações matemáticas da SEA, foram utilizados para a aquisição dos resultados analíticos.

2.4 ESTUDOS DE APOIO À DISSERTAÇÃO

Os campos sonoros na caixa do microfone e na sala foram calculados por uma solução analítica da equação de onda tridimensional no trabalho realizado por Xiaoxiang et al. (2003). Mostrou-se na teoria que a resposta de amplitude em salas pequenas é afetada pelos seguintes parâmetros: posição do excitador no painel frontal da caixa, posição da caixa na sala, posição do material de absorção na caixa e posição material de absorção nas paredes interiores da sala.

O estudo realizado por Haan e Kwon (2001) propõe um novo critério para medir a difusividade das superfícies nas salas através da modelagem computacional e das medições de campo. O novo critério envolve a diferença de fase dos valores dos parâmetros acústicos da sala entre dois microfones, tal que o primeiro microfone (M1) é direcionado para a parte dianteira da sala, enquanto o outro microfone (M2) para a parede traseira da sala. Para fazer esta possível disposição do microfone, um dispositivo especialmente projetado, o painel de suporte do microfone, foi empregado para medir certos valores “ x ”. As simulações computacionais, como a inspeção piloto, foram empreendidas para analisar a mudança dos valores “ x ” de acordo com a difusividade da superfície usando duas imagens tridimensionais do salão (3D). Na etapa seguinte, as experiências de campo foram realizadas para medir o nível sonoro (SPL), o tempo de decaimento precoce (EDT) e o índice de clareza (C80) nos dois salões existentes que têm diferentes condições de difusividade de superfície. Os resultados mostram que a diferença dos três parâmetros acústicos (SPL, EDT e C80) capturada em dois microfones, decresce de acordo com o aumento da difusividade da superfície interior. Especialmente, encontrou-se que no salão de difusividade elevada, SPL, C80, EDT decrescem na escala das altas frequências (acima de 500 Hz), mas os mesmos valores de

“ x ” aumentam na escala de frequências baixas (abaixo de 250 Hz). Isto significa que o som de alta frequência pode facilmente refletir e sofrer difusão no salão de difusividade elevada, enquanto que o som de baixa frequência difrata através da superfície. Demonstrou-se que a diferença (valores de x) dos parâmetros acústicos é baixa nos salões com elevada difusividade de superfície. Assim, os valores de x puderam ser usados como um critério para avaliar a difusividade da superfície das salas.

Schroeder (2002) descreve um novo método de medir o tempo de reverberação. O método usa estouros (ou tiros filtrados de pistola) para excitar um enclausuramento. Uma integral simples produz, em uma única medição, a média de um conjunto das curvas de decaimento que seriam obtidas com ruído de filtro passa-banda como um sinal da excitação. As curvas de decaimento uniformes resultantes do novo método melhoram a exatidão das medições do tempo de reverberação e facilitam a detecção do decaimento não-exponencial.

Estes artigos trazem informações importantes sobre métodos de medição dos parâmetros acústicos, que contribuíram para a realização dos procedimentos experimentais.

2.5 ASSOCIAÇÕES E NORMAS

Devido não existir uma norma específica para o estudo de câmaras reverberantes em escala reduzida, fez-se necessário a consulta de várias normas técnicas que pudessem ajudar na aquisição dos parâmetros acústicos necessários para determinação da perda de transmissão sonora dos materiais.

Entre as normas utilizadas, a ISO 140 (1997) especifica um método de medição em laboratório da isolamento sonora transportada por via aérea de elementos de edificação. Segundo a norma ISO 3741(1999), relativa à determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes, a relação de quaisquer duas dimensões não deve igualar ou aproximar um inteiro. O equipamento de medida do tempo de reverberação deve cumprir as exigências definidas na ISO 354 (1999). A exatidão do equipamento de medição do nível sonoro deve cumprir as exigências de exatidão das classes 0 ou 1,

definidas na IEC (Comissão Internacional de Eletrônica) 651 e IEC 804. Já a IEC 255 define as exigências a serem cumpridas pelos filtros da faixa de terço de oitava. E se os valores absolutos de níveis de pressão sonora tiverem sido obtidos, o sistema de medição completo incluindo o microfone deve ser ajustado antes de cada medição usando um calibrador sonoro com as exigências de exatidão da classe 1 definida na IEC 942.

A norma brasileira MB – 3258/1990 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas) também foi utilizada como referência, a qual prescreve o método de medição de campo da isolamento sonora de divisórias leves, internamente moduladas.

Observou-se na revisão bibliográfica que há diversos estudos referentes à Transmissão Sonora, enquanto que os trabalhos em Modelos Reduzidos só começaram a ser utilizados a partir do ano de 1940.

CAPÍTULO III – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários e que deram suporte ao desenvolvimento da Dissertação, focalizando-se, basicamente, na Determinação da Perda de Transmissão Sonora e nas Equações da Análise Estatística Energética (SEA). Encontra-se, também, neste capítulo, uma síntese das informações constantes na parte 3 da norma ISO – 140.

3.1 A TRANSMISSÃO E O ISOLAMENTO SONORO

A transmissão é a propriedade sonora que permite que o som passe de um lado para o outro de uma superfície, continuando sua propagação. Fisicamente, o fenômeno tem as seguintes características: a onda sonora ao atingir uma superfície faz com que ela vibre, transformando-a em fonte sonora. Assim a superfície vibrante passa a gerar som em sua outra face.

Quanto mais rígida e densa (peso por área) for a superfície que se interpõe à trajetória de propagação do som, maior será o isolamento sonoro obtido, assim como paredes de grande espessura apresentam as maiores atenuações. Entretanto, ao se dobrar a espessura de um obstáculo, a atenuação não dobra.

Ao se realizar o tratamento acústico de um ambiente, todos os pontos geradores de ruído, no interior de um ambiente, devem ser isolados. Em um projeto de tratamento acústico deve-se ter atenção, também, ao isolamento estrutural e que diz respeito às vibrações que percorrem a estrutura.

É importante que a preocupação com a acústica de um ambiente deva existir desde o início de um projeto, possibilitando uma análise mais ampla de forma coerente e econômica. As tentativas de se corrigir a acústica de ambientes já construídos, normalmente, recaem em soluções pouco eficazes e muito onerosas.

Gerges (2000) diz que é possível definir as características dos materiais ou dispositivos a serem utilizados num isolamento específico, a partir do conhecimento de grandezas, como a Perda de Transmissão (PT) e a Diferença de Nível (D). O autor distingue esses dois índices, definindo PT como a relação logarítmica entre as energias transmitida e incidente, enquanto dá, ao resultado da subtração entre os Níveis de Pressão Sonora a denominação de Diferença de Nível de Pressão Sonora.

Quando os valores obtidos da PT são altos, então tem-se a existência de uma baixa transmissão de energia acústica, resultando em um alto isolamento. Alta transmissão resulta em valores baixos de PT, indicando um baixo isolamento. Matematicamente, a Perda de Transmissão, representada pela Eq. (3.1), é determinada a partir da relação $\alpha_t = (\text{energia transmitida}) / (\text{energia incidente})$, onde α_t é o Coeficiente de Transmissão Sonora.

$$PT = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} \quad (3.1)$$

A Diferença de Nível de Pressão Sonora, ao contrário da Perda de Transmissão, não está baseada, somente, em características inerentes aos materiais, porque sofre a interferência dos locais onde são medidos os níveis de pressão, ou seja, ela depende de fatores relativos ao ambiente, como o volume e a absorção sonora. Sua representação matemática é mostrada na Eq. (3.2), em que NPS_1 e NPS_2 são, respectivamente, os Níveis de Pressão Sonora.

$$D = NPS_1 - NPS_2 \quad (3.2)$$

Neste item, sobre a Perda da Transmissão Sonora de Paredes Simples (Divisórias), são analisados modelos matemáticos de transmissão do som através de três meios (ar – parede – ar) e através de cinco meios devido ao esquema de construção de algumas divisórias utilizadas (ar – parede – camada interna – parede – ar), além de um estudo sobre as frequências sonoras.

3.1.1 Transmissão através de Três Meios com Incidência Normal

Gerges (2000) enfatiza que o modelo mais genérico de representação da perda de transmissão de uma parede simples, colocada na separação de dois ambientes, é o estudo de uma onda plana longitudinal, com propagação unidirecional e incidência normal, através de três meios. Este estudo pode ser melhor entendido a seguir.

Na Fig. 3.1, que representa este modelo, a onda plana no meio I é transmitida a um segundo meio II e, posteriormente, a um meio III. Supõe-se que a onda incidente se propaga na direção positiva de x , que o limite entre os meios I e II está localizado em $x = 0$ e que o limite entre os meios II e III está localizado em $x = l$.

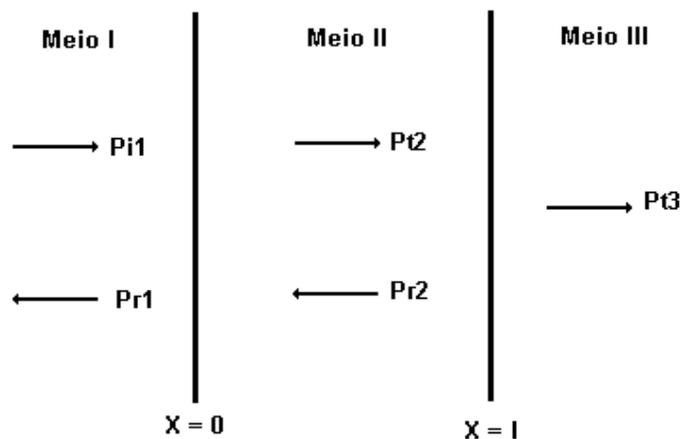


Figura 3.1: Transmissão através de três meios.

Fonte: Adaptada de Gerges (2000).

A onda incidente no meio I é representada por:

$$\underline{P}_{i1} = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} \tag{3.3}$$

No estado estacionário as ondas transmitidas e refletidas são:

$$\underline{P}_{r1} = \underline{B}_1 e^{i(\omega t + k_1 x)} \tag{3.4}$$

$$\underline{P}_{t2} = \underline{A}_1 e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad (3.5)$$

$$\underline{P}_{r2} = \underline{B}_2 e^{i(\omega t + k_2 x)} \quad (3.6)$$

$$\underline{P}_{t3} = \underline{A}_3 e^{i[\omega t - k_3(x-l)]} \quad (3.7)$$

onde A_1 (constante real), e A_2 , A_3 , B_1 e B_2 (constantes que podem ser complexas) representam as amplitudes de pressão das ondas.

Usando as condições de contorno (Continuidade das Pressões e das Velocidades de Partícula) em $x = 0$ tem-se:

$$\underline{P}_{i1} + \underline{P}_{r1} = \underline{P}_{t2} + \underline{P}_{r2} \quad (3.8)$$

ou

$$\underline{A}_1 + \underline{B}_1 = \underline{A}_2 + \underline{B}_2 \quad (3.9)$$

e

$$\underline{U}_{i1} + \underline{U}_{r1} = \underline{U}_{t2} + \underline{U}_{r2} \quad (3.10)$$

ou

$$(\underline{A}_1 - \underline{B}_1) \frac{1}{\rho_1 c_1} = (\underline{A}_2 - \underline{B}_2) \frac{1}{\rho_2 c_2} \quad (3.11)$$

Similarmente, em $x = l$, as condições de contorno levam a:

$$\underline{P}_{t2} + \underline{P}_{r2} = \underline{P}_{t3} \quad (3.12)$$

ou

$$\underline{A}_2 e^{-ik_2 l} + \underline{B}_2 e^{ik_2 l} = \underline{A}_3 \quad (3.13)$$

e

$$\underline{U}_{t2} + \underline{U}_{r2} = \underline{U}_{t3} \quad (3.14)$$

ou

$$\frac{1}{\rho_2 c_2} (\underline{A}_2 e^{-ik_2 l} - \underline{B}_2 e^{ik_2 l}) = \frac{\underline{A}_3}{\rho_3 c_3} \quad (3.15)$$

Através deste conjunto de equações pode-se determinar o Coeficiente de Transmissão Sonora α_t , do meio I através de II e III, como:

$$\alpha_t = \frac{I_{t3}}{I_{i1}} = \frac{|\underline{P}_{t3}|^2 / 2\rho_3 c_3}{|\underline{P}_{i1}|^2 / 2\rho_1 c_1} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_3 c_3} \left| \frac{\underline{A}_3}{\underline{A}_1} \right|^2 \quad (3.16)$$

ou

$$\alpha_t = \frac{4\rho_3 c_3 \rho_1 c_1}{(\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1)^2 \cos^2 k_2 l + (\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3 \rho_1 c_1 / \rho_2 c_2)^2 \sin^2 k_2 l} \quad (3.17)$$

Existe uma série de formas particulares que podem ser derivadas da forma geral, porém, o caso mais prático, é quando a densidade do meio II e sua velocidade de propagação do som são bem maiores do que as dos meios I e III (os quais são considerados como o mesmo meio neste caso particular). Portanto,

$$\rho_1 c_1 = \rho_3 c_3 \ll \rho_2 c_2 \quad (3.18)$$

Além disso, as espessuras das paredes, na maioria dos casos, são menores do que o comprimento da onda sonora incidente, ou seja:

$$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \operatorname{sen} k_2 l \gg 2 \cos k_2 l \quad (3.19)$$

ou

$$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} k_2 l \gg 2 \quad (3.20)$$

Introduzindo as aproximações práticas acima citadas, obtém-se:

$$\alpha_t = \left(\frac{\rho_1 c_1}{\pi} \right)^2 \frac{1}{M^2 f^2} \quad (3.21)$$

em que $M = \rho_2 l$ é a densidade de área do meio II.

Em termos da Perda de Transmissão PT definida pela Eq. 1 tem-se, então:

$$PT = 20 \log \frac{\pi}{\rho_1 c_1} + 20 \log Mf \quad (3.22)$$

e usando $\rho_1 c_1 = 415 \text{ rayls}$ para o ar (condições normais), resulta em:

$$PT = -42,4 + 20 \log Mf \quad (3.23)$$

A Eq. (3.23) mostra que a transmissão do som através de três meios depende apenas da densidade de área do material do meio II e da frequência da onda incidente, considerando que os meios I e III são ar. Esta é chamada Lei das Massas.

Nestas circunstâncias a PT tende a apresentar um aumento de 6 dB para cada duplicação de M ou da frequência da onda incidente. Uma conclusão importante é que

para isolar o ruído, é necessário usar materiais de alta densidade superficial. Adicionalmente, conclui-se que as altas frequências são mais fáceis de serem isoladas do que as baixas frequências. Este modelo, apesar de ser muito simples, fornece conclusões interessantes. As hipóteses e simplificações que foram usadas em tal modelo são: ondas planas longitudinais com propagação unidirecional, incidência normal à superfície, parede rígida, sem vibração; não há dissipação de energia nos meios I, II e III e algumas aproximações que só são válidas para baixas frequências e/ou paredes densas.

No estudo a seguir, a segunda hipótese pode ser eliminada considerando um modelo de incidência aleatória e integrando o coeficiente de transmissão ao longo de todos os ângulos de incidência.

3.1.2 Transmissão Através de Três Meios com Incidência Aleatória

Este estudo, considerando a incidência aleatória, faz uma representação mais próxima do que acontece em câmaras reverberantes, pois na prática o campo sonoro em uma sala, incidente numa das paredes, é aproximadamente aleatório. Isto é, todos os ângulos de incidência são igualmente prováveis (campo difuso). Então, um coeficiente de transmissão médio pode ser estimado considerando todos os ângulos de incidência de 0° até 90°, integrando $\alpha(\phi)$ com um elemento infinitesimal de área $dA = r^2 \cos \phi \sin \phi d\phi d\psi$, isto é:

$$\alpha_{m\acute{e}dia} = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} r^2 \alpha(\phi) \cos \phi \sin \phi d\psi d\phi}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} r^2 \cos \phi \sin \phi d\psi d\phi} \quad (3.24)$$

onde $\alpha(\phi)$ é dada pela Eq. (3.25) na forma da *PT*.

$$PT = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega M \cos \phi}{2\rho c} \right)^2 \right] \quad (3.25)$$

Aplicando-se a Eq. (3.25) na Eq. (3.24), tem-se:

$$PT_{al} = 10 \log \left(\frac{1}{\alpha_{média}} \right) \quad (3.26)$$

$$PT_{al} \cong PT - 10 \log(0,23PT) \quad (3.27)$$

em que PT representa a perda de transmissão à incidência normal e $PT\alpha_i$ é a perda de transmissão à incidência aleatória (0° até 90°).

A Eq. (3.25) pode ser usada desde que $\frac{\omega M}{\rho c} \gg 1$. A $PT\alpha_i$ aumenta aproximadamente 5 dB/oitava e é menor do que a PT . Na prática, é mais correto se usar a perda de transmissão de campo, o que corresponde a incidências com ângulos de até 78° , sendo dada por:

$$PT_{camp} = PT - 5 \quad (3.28)$$

Medições em laboratório e em campo mostram que a PT_{camp} é um valor mais preciso do que a PT_{al} . Portanto, a perda de transmissão é dada pela Equação da Lei de Massa:

$$PT_{camp} = 20 \log Mf - 47,4 \quad (3.29)$$

3.1.3 Transmissão Através de Cinco Meios

Dentre as amostras (paredes divisórias) testadas, foram utilizados sistemas com paredes duplas e devido a isto, foi necessário fazer um estudo bibliográfico sobre a perda de transmissão sonora através de cinco meios. Os detalhes referentes à constituição destas amostras são discutidos nos capítulos posteriores.

No sistema com paredes duplas, é considerado um modelo constituído de cinco meios acústicos adjacentes, conforme a Fig. 3.2.

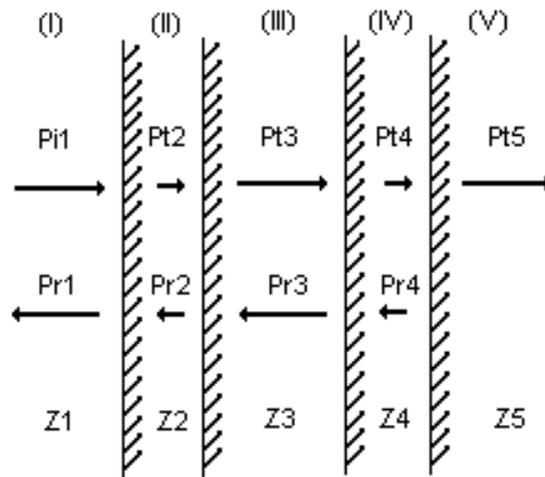


Figura 3.2: Configuração física do modelo matemático para parede dupla.

Fonte: Adaptada de Gerges (2000).

Ao considerarem-se os meios II e IV formados por materiais com impedância característica maior do que as dos meios I, III e V, tem-se a perda de transmissão entre os meios II e IV, dada pela Eq. (3.30) a seguir:

$$PT = PT_2 + PT_4 + 20 \log \left| \text{sen} \frac{2\pi f l_3}{c} \right| + 6,0 \quad (3.30)$$

Simplificações significativas podem ser feitas, neste tipo de estudo, sem haver perdas na exatidão dos resultados finais.

3.1.4 As Frequências de Ressonância, Coincidência e Crítica

Para um melhor entendimento dos efeitos das frequências sonoras sobre a Perda de Transmissão, foi realizado um estudo sobre as frequências e suas particularidades.

a) Freqüência de Ressonância Mecânica

Se uma determinada massa m (em kg) é deslocada e liberada, ela oscilará em uma freqüência denominada freqüência natural ou de ressonância do elemento. Esta freqüência depende da massa e rigidez do sistema, e pode ser dada pela Eq. (3.31).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \tag{3.31}$$

em que K é a constante de rigidez (N/m) e m é a massa em kg.

Quando a freqüência de excitação for igual ou próxima a ela, a resposta de amplitude de vibração do elemento é, aproximadamente, a amplitude máxima.

b) Freqüência de Coincidência

O fenômeno da coincidência é descrito pela condição de igualdade entre a projeção do comprimento da onda sonora incidente projetada na estrutura e o comprimento da onda de flexão livre da estrutura. Segundo Paixão (2003), a freqüência de coincidência para uma placa isotrópica (f_{co}) pode ser calculada por:

$$f_{co} = \frac{c}{2\pi \text{sen}^2 \theta} \sqrt{\frac{\rho_2 l}{B}} \tag{3.32}$$

em que c é a velocidade do som no fluido, θ é o ângulo de incidência, $\rho_2 l = M$ é a massa por unidade de área da parede e B é a rigidez à flexão da placa, dada pela expressão:

$$B = \frac{El^3}{12(1-\nu^2)} \tag{3.33}$$

Na Eq. (3.33) l é a espessura da parede, E é o módulo de Young do material do painel e ν é o coeficiente de Poisson do material do painel.

Na condição de coincidência ocorre o acoplamento perfeito entre o campo acústico e as ondas de flexão da estrutura, proporcionando uma boa transmissibilidade sonora. Por outro lado, como a propagação ocorre na frequência de coincidência, o isolamento acústico é baixo e o fenômeno da transmissão sonora é controlado pelo amortecimento.

c) Frequência Crítica

A frequência crítica é definida como a menor frequência limitante para o fenômeno da coincidência, ou seja, considera o máximo valor de $\sin\theta$ na Eq. (3.32), sua expressão é dada por:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_2 l}{B}} \quad (3.34)$$

Para placas planas, uniformes e homogêneas a frequência crítica é dada pela Eq. (3.35).

$$f_c = \frac{c^2}{1,8lc_l} \quad (3.35)$$

com c_l representando a velocidade de propagação de onda longitudinal no sólido.

Esta equação é válida somente para casos onde o λ da onda de flexão é maior do que aproximadamente 6 (seis) vezes a espessura do painel ($\lambda > 6l$).

Em outras palavras, seja uma onda incidindo num ângulo θ qualquer, em uma dada frequência, se o ângulo for tal que a projeção da velocidade da onda incidente na estrutura seja igual à velocidade da onda de flexão livre do painel, a transmissão será coincidente. Logo, o efeito da coincidência pode ocorrer para qualquer frequência associada a um determinado ângulo de incidência “particular”, denominado de ângulo de coincidência. Esta análise pode ser visualizada na Fig. 3.3, onde o valor da frequência crítica é idêntico ao da frequência de coincidência numa incidência de 90°.

Pode-se dizer, ainda, que é a frequência a partir da qual a lei de Massa deixa de ser válida devido ao início da zona controlada pelo efeito de coincidência.

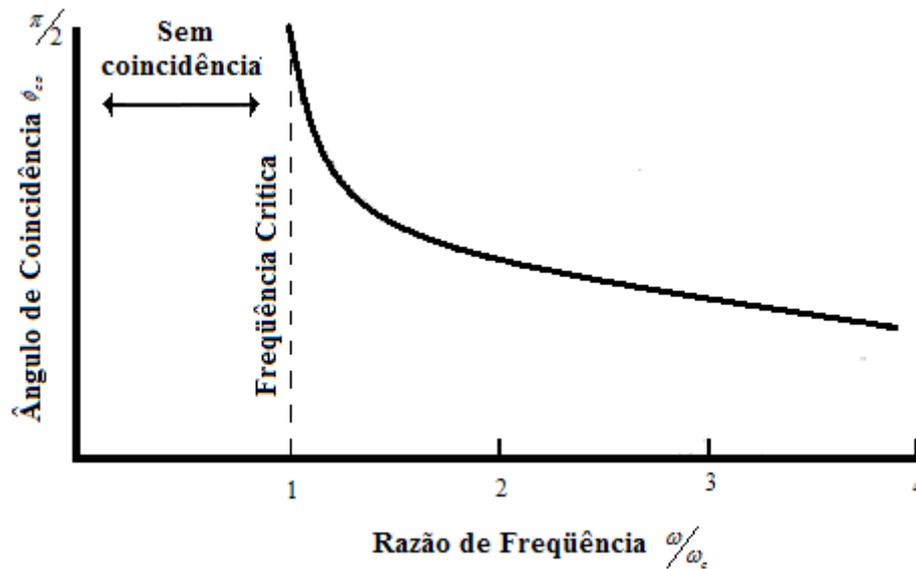


Figura 3.3: Relação entre o ângulo de incidência coincidente e a razão de frequência.

Fonte: Adaptada de FAHY (1985, p. 153).

Da análise da Fig. 3.3, conclui-se que a frequência crítica é um caso particular da frequência de coincidência, onde o ângulo de incidência assume o valor de um ângulo reto. Assim, analisando os possíveis ângulos de incidência, tem-se as seguintes situações: Para o ângulo de incidência de 0° , a relação entre a frequência incidente e a frequência crítica tende ao infinito. Assim, de acordo com a Fig. 3.3, ocorrem dificuldades para existência do efeito de coincidência. Logo a transmissão sonora é baixa e altos valores de perda de transmissão são encontrados.

Para ângulos nas proximidades de 90° , a razão entre a frequência incidente e a frequência crítica se aproxima da unidade. Para ângulos de incidência iguais ao ângulo de coincidência em uma determinada frequência, o painel apresentará uma boa transmissibilidade sonora e a perda de transmissão será mínima.

Por fim, pode-se dizer que uma barreira utilizada para isolar dois ambientes, não importando o tipo de material que a compõe, apresenta o que se chama "frequência crítica" (f_c), onde o coeficiente de perda de transmissão cai substancialmente (ou seja, o

material isola menos). Essa frequência depende de sua dureza e espessura, e pode ser calculada, também, pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{A_M}{t} \tag{3.36}$$

em que A_M é uma constante que depende do material e t é a espessura do material em mm. Na Tabela 3.1, encontram-se os valores para a constante do material (A_M).

Tabela 3.1: Valores da constante de diversos materiais.

Material	Densidade em kg/m² por (mm)	A_M (Hz/mm)
Alumínio	2,7	12900
Concreto denso poroso	2,3	18700
Bloco de concreto oco (150 mm)	1,1	20900
Madeira maciça	0,55	8900
Vidro	2,5	15200
Chumbo	11,0	55900
Aço	7,7	12700
Gesso	0,82	39000
Compensado	0,6	21700

3.2 ISOLAMENTO ACÚSTICO SEGUNDO A NORMA ISO 140

A ISO 140, – Medição de isolamento sonoro em edificações e elementos construtivos – Medição em laboratório de isolamento sonoro aéreo de elementos de edificação, é um conjunto de doze normas técnicas sobre isolamento acústico das edificações e seus componentes. A seguir, apresenta-se uma síntese da norma ISO 140-3 devido ao seu conteúdo teórico e sua utilização no presente trabalho.

3.2.1 Síntese das Informações Constantes na ISO 140 – Parte 3

A parte 3 da norma ISO 140 (ISO 140-3/95) é representada por nove itens e sete anexos. As recomendações de cada item estão especificadas de acordo com os títulos citados a seguir.

Item 1 – Espaço: Descreve a especificidade desta parte da norma, assim como seus objetivos e sua utilização. Relata ainda que para elementos pequenos de edificação deve-se utilizar a norma ISO 140 – Parte 10, além de salientar que esta medição, em laboratório, não deve ser aplicada diretamente em medições de campo sem a consideração de correções.

Item 2 – Referências Normativas: Apresenta as outras normas utilizadas como referências.

Item 3 – Definições: este item tem a finalidade de estabelecer as definições, as quais podem ser encontradas no capítulo referente à parte experimental.

Item 4 – Equipamentos: Discorre sobre os equipamentos, as exigências de exatidão que eles devem cumprir definidas na IEC 255, IEC 651, IEC 804 e IEC 942. Relata, também, sobre as exigências definidas na ISO 354, referente ao equipamento de medição do tempo de reverberação e das exigências para a fonte sonora contidas no anexo C da mesma.

Item 5 – Arranjo de Teste: Refere-se às condições dos testes em laboratórios, das características e instalações das partições (divisórias) e dos elementos (portas, janelas, placas de vidro e elementos de fachada) em teste.

Item 6 – Procedimento e Avaliação do Teste: Descreve os procedimentos de teste e avaliação, destacando a geração do campo sonoro na sala de emissão, a medição do nível de pressão sonora médio, a faixa de frequências de medição, a determinação do tempo de reverberação e da área de absorção média e, finalmente, a correção para o ruído de fundo.

Item 7 – Precisão: Referente à precisão requerida para o procedimento de medição, de acordo com o método mostrado na ISO 140 – Parte 2.

Item 8 – Expressão dos Resultados: Indica como devem ser expressos os resultados da isolamento sonora da amostra de teste.

Item 9 – Relatório de Teste: Mostra os itens que devem ser indicados na apresentação dos dados.

Por fim, encontram-se os anexos A, B, C, D, E, F e G que tratam, respectivamente, da: montagem na abertura de teste; medição do Índice de Redução Sonora (R) para a parede que vai receber o elemento a ser medido; qualificação e posicionamento da fonte sonora; medição de transmissão por flanco; medição do fator de perda total; medições em banda de baixas frequências; e forma de expressar os resultados.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA ENERGÉTICA (SEA)

Segundo Gerges (2000) a SEA teve sua teoria fundamental estabelecida na década de sessenta, devido às necessidades advindas da predição da resposta vibro-acústica de grandes estruturas marítimas e aeroespaciais. Ressalta, ainda, que a compilação dos estudos que propiciam as bases para a SEA é apresentada no livro “Theory and Application of Statistical Energy Analysis” de Lyon e DeJong (1995), considerada, atualmente, a principal referência teórica sobre o tema.

A Análise Estatística de Energia (*Statistical Energy Analysis*) é uma metodologia de modelagem que utiliza o princípio da conservação de energia, representando o comportamento médio de um grande conjunto de sistemas físicos, juntamente com a variância associada, ao considerar as frequências (autovalores) e formas (autovetores) dos modos naturais do sistema como variáveis aleatórias. Por isso, todas as definições e formulações são obtidas considerando-se os valores médios no espaço. A análise utilizada por esta abordagem não se preocupa com o conhecimento exato de um sistema

específico, mas com uma população de estruturas nominalmente idênticas que, na prática, têm pequenas diferenças.

A estrutura (sistema) é dividida em subsistemas, com a finalidade de representar a energia modal local média para apenas uma parte de um sistema complexo global. Estes subsistemas podem ser acústicos ou estruturais e cada subsistema representa um mecanismo de armazenamento de energia.

A importância da SEA está na sua utilização para a solução de problemas que apresentem várias fontes e trajetórias de ruído, como as transmissões estruturais e aéreas, apoiada no fato de poder ser empregada para diferentes espectros de médias e altas frequências.

3.3.1 Parâmetros do Método SEA

Além dos parâmetros utilizados pela acústica clássica, a SEA apresenta novos parâmetros definidos a seguir.

a) Energia

A energia de um subsistema descreve a resposta dinâmica e é definida em termos da média quadrática espacial da velocidade ou pressão média quadrática, integrada na banda de frequência. A energia para subsistemas estruturais e acústicos é definida respectivamente da seguinte forma:

$$E = m \langle v^2 \rangle \quad (3.37)$$

ou

$$E = \frac{V}{\rho c^2} \langle p^2 \rangle \quad (3.38)$$

em que m é a massa, v é a velocidade rms, V é o volume e p é a pressão sonora rms. Se a energia é determinada experimentalmente, uma amostragem espacial da resposta média quadrática é obtida, geralmente, através de alguns poucos pontos (>3) selecionados no elemento estrutural ou na cavidade acústica.

b) Balanço Energético em SEA

O Balanço Energético baseia-se no fato de que toda a energia que entra em um subsistema deve ser igual à que sai, seja por dissipação e/ou transmissão. Em condições de estado estacionário, a forma geral das equações de SEA fornece o balanço energético para um subsistema:

$$\sum \Pi_{i,in} = \sum \Pi_{i,out}, \quad \Pi_{i,out} = \Pi_i + \Pi_{ij} \tag{3.39}$$

A potência que entra no subsistema é dissipada ou transmitida a outros subsistemas. No problema de dois subsistemas, o balanço energético para cada subsistema pode ser estabelecido como:

$$\Pi_{1,in} = \omega \eta_1 E_1 + \omega \eta_{12} N_1 \left(\frac{E_1}{N_1} - \frac{E_2}{N_2} \right) \tag{3.40}$$

e

$$\Pi_{2,in} = \omega \eta_2 E_2 + \omega \eta_{21} N_2 \left(\frac{E_2}{N_2} - \frac{E_1}{N_1} \right) \tag{3.41}$$

com $\Pi_{1,in}$ e $\Pi_{2,in}$ designando o fluxo de energia incidente nos sistemas 1 e 2; E_1 e E_2 as energias totais dos sistemas 1 e 2; N_1 e N_2 os números de modos; η_1 e η_2 os coeficientes de perda por amortecimento; e η_{12} o coeficiente de perda por acoplamento entre os sistemas 1 e 2.

Neste caso especial, se a potência de entrada for aplicada apenas ao primeiro subsistema ($P_{2,in} = 0$) então, ter-se-á uma razão de energia da forma:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\eta_{21}}{\eta_{21} + \eta_2} \quad (3.42)$$

A qual estabelece que os fatores de perda por acoplamento e amortecimento precisam ser comparados entre si, a fim de se determinar suas influências sobre a razão de energias.

c) Fator de Perda por Amortecimento

A potência de entrada de um subsistema é dissipada através de uma ou mais formas de amortecimento, tais como absorção acústica, amortecimento estrutural, fricção de juntas, etc. A potência dissipada por um subsistema é definida como:

$$\Pi_1 = \omega \eta_1 E_1 \quad (3.43)$$

em que η_1 é o fator de perda por amortecimento e ωE_1 representa a potência média armazenada no subsistema. O fator de perda por amortecimento pode ser medido através da técnica da banda de meia potência, do tempo de reverberação T_{60} ou pelo método de potência injetada. Este parâmetro está relacionado a outras medições de dissipação, tais como razão de amortecimento crítico, ζ , tempo de reverberação T_{60} e coeficiente de absorção média, $\bar{\alpha}$, através das seguintes relações:

$$\eta = 2\zeta \quad (3.44)$$

$$\eta = \frac{2,2}{fT_{60}} \quad (3.45)$$

$$\eta = \frac{Ac_0}{4\omega V} \bar{\alpha} \quad (3.46)$$

Embora o fator de perda por amortecimento seja geralmente medido, existem alguns casos onde métodos analíticos são utilizados para prever os seus efeitos.

d) 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 maior energia, com o subsistema receptor atuando como um sumidouro de energia.

$$\Pi_{1 \rightarrow 2} = \omega \eta_{12} E_1, \quad \Pi_{2 \rightarrow 1} = \omega \eta_{21} E_2 \tag{3.47}$$

Em condições de estado estacionário, o fluxo líquido de potência de um subsistema para outro é definido através da seguinte equação:

$$\Pi_{12} = \Pi_{1 \rightarrow 2} - \Pi_{2 \rightarrow 1} \tag{3.48}$$

$$= \omega \eta_{12} \left(E_1 - \frac{N_1}{N_2} E_2 \right) = \omega \eta_{12} N_1 \left(\frac{E_1}{N_1} - \frac{E_2}{N_2} \right) \tag{3.49}$$

$$= \omega \eta_{12} N_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \beta_{12} (\phi_1 - \phi_2) \tag{3.50}$$

em que $\beta_{ij} = \omega \eta_{ij} \eta_i$ é o fator de acoplamento. A relação anterior foi obtida através da condição de reciprocidade bastante utilizada em SEA, a qual é definida como:

$$\eta_{12} N_1 = \eta_{21} N_2 \tag{3.51}$$

Esta equação estabelece que o principal desafio em SEA está em identificar os números de modos e também um dos fatores de perda por acoplamento.

No caso de um painel acoplado a uma cavidade acústica, o fator de perda por acoplamento é dado por:

$$\eta_{12} = \frac{\rho_0 c_0}{\omega \rho_s} \cdot \sigma_{rad}, \quad (3.52)$$

com σ_{rad} representando a eficiência de radiação.

e) Densidade Modal

Existem formas gerais simplificadas para a representação da densidade modal em subsistemas 1-D, 2-D e 3-D. A definição de densidade modal é dada por:

$$\eta(\omega) = \frac{dN}{d\omega} = \frac{dN}{dk} \cdot \frac{dk}{d\omega} = \frac{1}{c_g} \cdot \frac{dN}{dk}, \quad \frac{1}{c_g} = \frac{dk}{d\omega} \quad (3.53)$$

Para sistemas 1-D, um modo arbitrário do sistema define funções de comprimento de onda, número de onda e número de modos da seguinte forma:

$$\lambda_N = \frac{2L}{N \pm \delta_{BC}}, \quad k_N = (N \pm \delta_{BC}) \frac{\pi}{L}, \quad N(k) = \frac{kL}{\pi} \pm \delta_{BC} \quad (3.54)$$

onde L é o comprimento e $|\delta_{BC}| \leq 1$ é o fator de incerteza devido às condições de contorno. A forma geral da densidade modal para sistemas 1-D é:

$$n(\omega) = \frac{L}{\pi c_g} \quad (3.55)$$

em que c_g é a velocidade de grupo (velocidade do som no ar).

Para sistemas 2-D, a forma geral da densidade modal é dada por:

$$n(\omega) \cong \frac{A\omega}{2\pi c_\phi c_g} \quad (3.56)$$

Para um painel isotrópico, em um sistema 2-D, a densidade modal é dada por:

$$n(\omega) = \frac{A_p \omega}{4\pi c_B^2 c_g} = \frac{A_p}{4\pi} \sqrt{\frac{\rho h}{B}}, \quad C_B = \left[\frac{B\omega^2}{\rho h} \right]^{1/4}, \quad B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.57)$$

em que A_p é a área do painel, h é a espessura do mesmo, ρ é a densidade da massa, E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson. Ressalta-se que a densidade modal do painel é constante na frequência, diretamente proporcional à área e inversamente proporcional à espessura.

Para sistemas 3-D, a forma geral da densidade modal é dada por:

$$n(\omega) \cong \frac{V\omega^2}{2\pi^2 c_\phi^2 c_g} + \Pi_1 \frac{A\omega}{c_g} + \Pi_2 P \quad (3.58)$$

em que V , A e P são o volume, a área e o perímetro, respectivamente, e Π_i são os coeficientes dependentes das condições de contorno de volume. Devido ao fato de o termo de volume ser proporcional ao quadrado da frequência, então a densidade modal aumenta rapidamente com esta última.

O conjunto das equações da Análise Estatística Energética citado, anteriormente, somado a algumas simplificações leva à introdução de uma equação para a determinação analítica da PT através da SEA, equação esta que pode ser encontrada no sexto capítulo, referente aos cálculos analíticos.

3.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O isolamento sonoro de dispositivos projetados para este fim, como as divisórias que serão estudadas, depende de fatores inerentes ao material que a constitui e de seu próprio processo de construção. Por outro lado, suas características acústicas podem ser estabelecidas, como foi visto, através da Perda de Transmissão (PT).

É importante fazer um estudo rigoroso dos fatores que têm influência no isolamento sonoro de uma parede. Dentre os fatores que afetam o nível sonoro percebido, destacam-se: nível sonoro no local de emissão; distribuição espectral do ruído; índice de redução sonora (R) e superfície da parede divisória; absorção total da sala receptora; e, por fim, a natureza das paredes adjacentes devido às transmissões que ocorrem pelos flancos.

Devido à SEA trabalhar com médias estatísticas, fornece como resposta um valor médio para um conjunto de sistemas similares, não apenas uma solução exata para um problema particular. Assim, para um trabalho como este, com diversas amostras de materiais visualmente idênticas, mas cada uma com sua particularidade, seja pela influência da sua fabricação, pelo seu manuseio ou por fatores ambientais que possam influenciar nas suas características acústicas, este tipo de abordagem ajuda a corrigir estas pequenas diferenças por considerar uma média entre todos os materiais testados e não apenas uma amostra especificamente.

CAPÍTULO IV - CONSTRUÇÃO DA CÂMARA EM ESCALA REDUZIDA

O presente capítulo descreve o processo de concepção e construção das câmaras reduzidas pertencentes à área de Vibrações e Acústica do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA); faz um detalhamento da construção da divisória estudada e finaliza com um estudo dos materiais constituintes das câmaras e das divisórias.

4.1 – CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DAS MINI-CÂMARAS GERMINADAS

Através dos estudos já realizados com modelos reduzidos é possível verificar que a escolha do material que constituirá a sua superfície é o maior problema encontrado nos trabalhos em que se utilizam maquetes. Estes devem obedecer às condições de similaridade, ou seja, seus coeficientes de absorção sonora devem ser os mesmos da câmara original (o que de fato não ocorre, devido à dificuldade de se construir maquetes com os mesmos materiais do protótipo), mas em frequências n vezes superiores às frequências reais, sendo $1:n$ o fator de escala do modelo.

Makrinenko (1994) relata que o campo sonoro deve ser simulado com n vezes a frequência da sala original, uma vez que a pretensão é simular as mesmas condições em que o som se propaga no sistema real. Entretanto, sendo o objetivo principal deste trabalho o estudo da perda de transmissão das divisórias desenvolvidas com material regional, estabelecendo comparação entre os seus desempenhos, e o desenvolvimento de aulas práticas a partir de uma instalação concebida para um custo baixo, o fator de escala para as frequências sonoras não será considerado nas análises, ou seja, as medições serão realizadas nas frequências reais das bandas de oitava delimitadas entre 125 e 8 kHz.

A construção das mini-câmaras reverberantes foi realizada de acordo com os padrões e normas internacionais, especificamente, segundo a norma ISO 140 (*Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Buildings Elements, 1999*) e segundo a norma ISO 354 (*Acoustics – Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms, 1999*).

4.1.1– Materiais Utilizados

Dentre os materiais utilizados para construir as mini-câmaras, tem-se:

- Folhas de Compensado de 20 mm (2 folhas);
- Folha de Compensado de 4 mm (1 folha);
- Folhas de Vidro de 5 mm (4 folhas);
- Cola Branca para Madeira e Cola para Borracha;
- Silicone;
- Pregos Finos;
- Parafusos (Tipo Francês de 1/4”);
- Barra Rosqueada (1/4”);
- Borracha;
- Isoladores de Vibração (Linha Micro II);
- Tiras de Madeira (Cedro).

4.1.2– Procedimentos de Construção das Câmaras

Durante o processo de construção das mini-câmaras foram realizadas várias etapas, que podem ser analisadas a seguir.

a) Dimensionamento e Corte do Compensado:

As dimensões das câmaras reduzidas foram baseadas nas câmaras da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), cujas dimensões podem ser encontrados em anexo, equivalentes à escala de 1:6 das dimensões das câmaras em escala real. Contudo, algumas alterações tiveram que ser realizadas para que as dimensões em escala reduzida atendessem às exigências das normas. A Tabela 4.1 fornece os valores das dimensões de cada câmara reduzida.

Tabela 4.1 – Dimensões das Câmaras Reverberantes Reduzidas.

Dimensões da Câmara Reverberante Reduzida	
Altura (m)	0,55
Comprimento (m)	0,80
Largura (m)	0,67
Área Total (m ²)	2,69
Volume (m ³)	0,295

Segundo a norma ISO 354, é recomendado que o comprimento da maior linha reta que se pode obter no interior de uma câmara seja menor do que $1,9.V^{1/3}$ (em que V é o volume da câmara). Já a norma ISO 3741 (*Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure-Precision Method for Reverberation Rooms, 1999*), relata que as relações entre as dimensões (L_y/L_x e L_z/L_x) não devem igualar ou aproximar a um inteiro. Na Tabela 4.2 podem ser vistas estas relações.

Tabela 4.2 – Relação entre as Dimensões das Câmaras

Relação entre as Dimensões	
L_y/L_x	0,84
L_z/L_x	0,69

É, também, recomendável que deva existir uma diferença de pelo menos 10% (dez por cento) entre os volumes das duas câmaras. Contudo, para as câmaras em escala reduzida, pelo fato do volume envolvido ser pequeno, esta diferença não é significativa e as mini-câmaras foram concebidas para apresentarem o mesmo volume, embora exista uma pequena diferença entre os volumes internos das mesmas após a instalação da fonte sonora (caixa acústica de compensado instalada de forma fixa na câmara emissora). A Fig. 4.1 traz um esquema das mini-câmaras reverberantes.

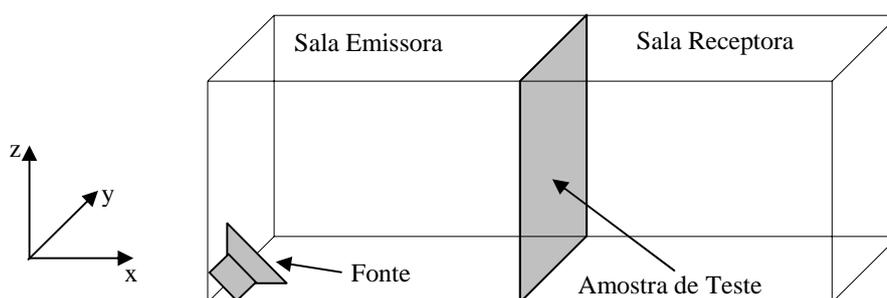


Figura 4.1 – Esquema das Mini-Câmaras Reverberantes

O processo de construção das duas câmaras foi iniciado após a definição de suas dimensões, tendo como primeira etapa os cortes das folhas de compensado de 20 mm de espessura para a obtenção das paredes, tetos e pisos, como apresentado a seguir:

- **Corte A:** quatro peças retangulares de 0,8 m x 0,67 m, que compõem os tetos e os pisos das duas mini-câmaras;
- **Corte B:** quatro peças retangulares de 0,8 m x 0,55 m, que compõem parte das paredes das duas mini-câmaras;

- **Corte C:** duas peças retangulares de 0,67 m x 0,55 m, que compõem as paredes de acesso de cada uma das mini-câmaras;
- **Corte C':** abertura quadrada de 0,30 m x 0,30 m feita nas peças designadas como Corte C, conforme mostrado na Fig. 4.2, para instalação de janelas de visualização a serem confeccionadas com folhas de vidro espaçadas por uma camada de ar.



Figura 4.2 – Corte C', realizado na folha de compensado.

A montagem das mini-câmaras se deu, então, unindo as peças fabricadas e descritas anteriormente através de cola de madeira e silicone para vedação, de modo a se evitar vazamento acústico nas junções. Em seguida, foram colocados pregos finos nas junções permitindo maior fixação das peças e estabilidade de toda a estrutura. A Fig. 4.3 mostra uma das câmaras ainda em fase de montagem.



Figura 4.3 – Câmara Emissora em fase de montagem.

No perímetro da superfície de acoplamento entre as câmaras foram instaladas tiras de madeira de 40 mm x 30 mm, que serviram de fixação das divisórias como visto na Fig. 4.4. Outras tiras de madeira, também, foram parafusadas na parte inferior para a instalação de isoladores de vibração. Optou-se por instalar estas tiras (constituídas de cedro) por serem mais resistentes que o compensado e para preservar a integridade das mini-câmaras.



Figura 4.4 – Câmara com a instalação das tiras de madeira.

Em cada janela de visualização da câmara, mostrada na Fig. 4.5, foram instaladas duas folhas de vidro de 0,30 m x 0,30 m, com espessura de 5 mm cada, montadas com um espaço de ar entre elas de 10 mm, objetivando manter o isolamento acústico dentro do mesmo nível das paredes das mini-câmaras. Para uma melhor vedação do acoplamento (câmara – divisória - câmara) foi utilizada uma fita de borracha isolante ao redor de todo o perímetro de acoplamento entre as câmaras e a divisória, conforme mostrado na Fig. 4.6.



Figura 4.5 – Câmara com vidro instalado.



Figura 4.6 – Câmara com a borracha instalada.

Para evitar a transmissão de vibrações do piso para as câmaras, o que pode levar a irradiação sonora das paredes das mini-câmaras, contaminando os resultados das medições, foi instalado um total de oito isoladores comerciais, selecionados de acordo com as recomendações do fabricante dos isoladores. A Fig. 4.7 mostra os isoladores montados.



Figura 4.7 – Câmara com os isoladores de vibração instalados.

Para um melhor entendimento do processo de construção da mini-câmaras, encontram-se em anexo algumas imagens destas.

4.2 – CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DAS DIVISÓRIAS A SEREM ENSAIADAS

As divisórias foram construídas de modo que ficassem separadas das câmaras em uma espécie de “colméia” (caixilho de cedro onde a divisória será instalada), para que amostras de diversas espessuras pudessem ser usadas sem prejudicar a estrutura das câmaras. Para este estudo foram construídas duas colméias de espessuras diferentes. O dimensionamento das colméias foi feito de modo que as mesmas se encaixassem nas superfícies de acoplamento das duas mini-câmaras, ou seja, com uma largura de 0,67 m e altura de 0,55 m, conforme o detalhamento na Fig. 4.8. Duas colméias foram confeccionadas, sendo uma na espessura de 0,06 m e outra com 0,11m.

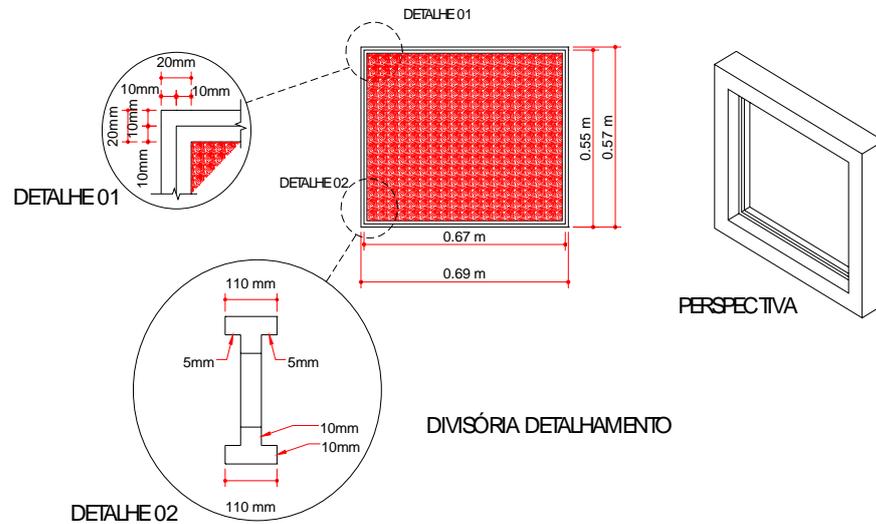


Figura 4.8 – Detalhamento da divisória.

Após o corte da madeira, para a obtenção das partes constituintes das colméias, foi feita a montagem das mesmas, ver Fig. 4.9, através da junção com cola branca, silicone e pregos finos. Ao longo de todo o perímetro da colméia foi feito um rebaixo de 5 mm para a instalação do compensado fino, de forma que estes materiais possam ser retirados sem danificar a colméia, caso haja necessidade de se realizar ensaios com outros materiais.

As folhas de compensado fino ($e = 4 \text{ mm}$), com as dimensões de $0,69 \text{ m} \times 0,57 \text{ m}$, foram instaladas nas extremidades das colméias, conforme a Fig. 4.10, com o intuito de sustentar o material de estudo (amostra de ensaio), que será inserida no espaço de ar entre estas folhas. As amostras escolhidas para estudo, foram confeccionadas em forma de uma manta de $0,67 \text{ m} \times 0,55 \text{ m}$ modificando-se apenas a espessura e a densidade para as divisórias testadas. A Fig. 4.11 retrata a instalação de uma das amostras confeccionadas com fibra de coco.



Figura 4.9 – Colméia em fase de montagem.



Figura 4.10 – Instalação do Compensado de 4 mm.



Figura 4.11 – Instalação da fibra de coco.

Desta forma, pode-se ter uma breve idealização de como é constituída a parede divisória usada nos ensaios experimentais.

4.3 – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS USADOS NA CONFECÇÃO DAS MINI-CÂMARAS E DAS DIVISÓRIAS ENSAIADAS

As características dos materiais que constituem as mini-câmaras reverberantes e que constituem as divisórias estudadas são descritas nos itens a seguir.

4.3.1– Materiais Usados nas Câmaras

a) O Compensado

O compensado é um painel de madeira classificado como um composto laminado, formado através da colagem de lâminas de madeira, geralmente em número ímpar de camadas, sobrepostas com a direção das fibras das camadas sucessivas formando ângulos retos entre si (Tsoumis, 1991). Cada camada é colada de forma que a direção da grã (fibras das camadas) esteja em ângulos retos em relação à camada adjacente, o que se denomina laminação cruzada.

O direcionamento ortogonal de uma lâmina em relação à outra adjacente restringe a movimentação tangencial das camadas e resulta em valores de retratibilidade similares, nas duas direções do plano da chapa, conferindo ao compensado uma estabilidade dimensional excelente. Além disso, o direcionamento cruzado das fibras, também, proporciona a uniformidade das propriedades mecânicas nas duas direções do plano da chapa.



Figura 4.12 – Fibras das camadas de compensado.

Outras características importantes dos compensados são a sua capacidade de suportar cargas de impacto que se impõe a certas estruturas e a resistência a rachaduras (Walker, 1993). De acordo com Tsoumis (1991), é praticamente impossível rachar o compensado, sendo isso também importante no que diz respeito ao uso de pregos e outros conectores.

Em virtude de possuir diversas características favoráveis, o compensado encontra utilizações das mais variadas, como na construção civil para aplicações estruturais ou não (pisos, forros, paredes, esquadrias, portas, telhados, andaimes, formas de concreto, etc.), na fabricação de móveis (partes estruturais e decorativas), instrumentos musicais, embalagens industriais, caixas e outros.

Neste trabalho, o compensado de 20 mm foi escolhido e utilizado para construir as estruturas (paredes, tetos e pisos) das mini-câmaras reverberantes. O compensado tem em média uma densidade superficial (por mm de espessura) em torno de $0,6 \text{ kg/m}^2$: uma placa de 20 mm apresenta então cerca de 12 kg/m^2 .

b) O Vidro

Além de suas propriedades naturais como o clareamento e a iluminação de um ambiente ou o fornecimento de uma vista mais completa, o vidro pode suprir outras exigências como: a resistência térmica e ao fogo, a segurança, o controle solar, a proteção e a isolamento ao ruído. Aqui, o vidro foi utilizado com o intuito de uma melhor visualização dos procedimentos de ensaio da perda de transmissão sonora nas câmaras, sendo, também, de importância relevante para este trabalho a sua isolamento ao ruído.

Dependendo do tipo de vidro, uma única chapa e unidades idênticas separadas por um espaço de ar atingem uma isolamento sonora entre aproximadamente 25 dBA e 50 dBA. A Tabela 4.3 fornece valores do isolamento sonoro de alguns tipos de vidro com uma única chapa.

O vidro tem em média uma densidade superficial (por mm de espessura) em torno de $2,5 \text{ kg/m}^2$. Uma placa de 10 mm, por exemplo, apresenta cerca de 25 kg/m^2 . Sabe-se que existe uma queda acentuada em torno de uma frequência específica, determinada pela espessura do vidro: é o chamado efeito de coincidência.

Também é importante a distância entre cada placa, ou seja, quanto mais afastadas uma da outra, melhor para o isolamento sonoro. Cada vez que se dobra a distância, ganha-se 3 dB no isolamento.

O gráfico a seguir mostra o aumento no isolamento com o espaço entre placas, para três espessuras diferentes (3, 4 e 6 mm).

Tabela 4.3 – Isolamento sonoro fornecido pelo vidro.

MATERIAL	DENSIDADE (kg/m ²)	ISOLAMENTO (dB)					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Vidro (3 mm)	10	26	27	31	31	33	29
Vidro (6 mm)	15	---	32	30	33	34	---
Vidro (10 mm)	25	23	21	26,5	27,5	23	---

Fonte: López (1999).

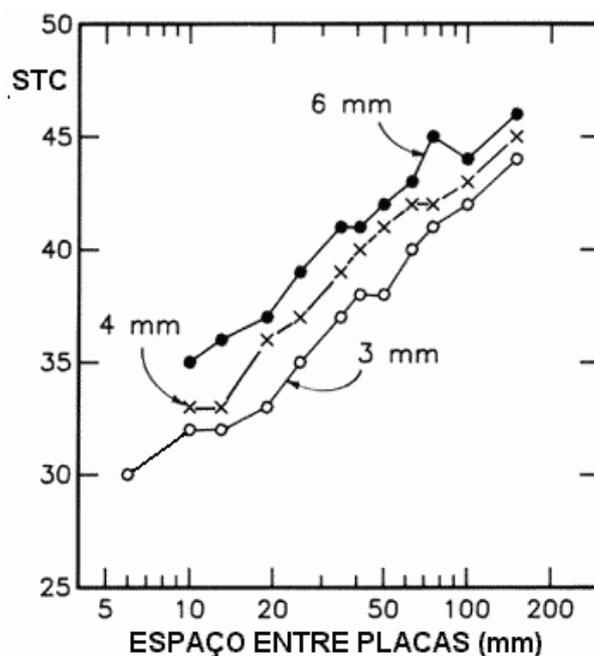


Figura 4.13 – Relação da classe de transmissão sonora (STC) com o espaço entre placas.

Para que a instalação das janelas de vidro nas câmaras não possa influenciar nos resultados dos testes, é importante que a perda de transmissão destas janelas seja maior que a perda de transmissão das paredes de compensado que constituem as câmaras.

Segundo Gerges (2000), para duas paredes idênticas de mesma espessura, sem espaço de ar entre elas (em contato), tem-se uma perda de transmissão de 6 dB acima da PT de

apenas uma delas (dobra-se a espessura, aumentando-se com isso a PT de um fator de $20\log 2$, ou seja, 6 dB). Tal autor ainda afirma que quando as duas paredes estão bem afastadas e isoladas uma da outra, a PT é igual ou maior do que a soma aritmética das PT das duas paredes. Por este motivo, optou-se por utilizar duas folhas de vidro de 5 mm, conforme Fig. 4.14, com um espaço de ar de 10 mm entre elas, esperando-se que os resultados dos ensaios experimentais sofram menos influências de outros fatores que não sejam os inerentes da própria PT da divisória.



Figura 4.14 – Folhas de vidro de 5 mm.

c) Os Isoladores de Vibração

Problemas com ruídos e vibrações podem ocorrer do local de apoio das câmaras até a sua estrutura. Gerges (2000) relata que isoladores de vibrações devidamente projetados podem eliminar estes problemas. Mesmo um baixo grau de isolamento de vibrações produz uma significativa redução de ruído.

Por este motivo foram instalados 4 (quatro) isoladores de vibrações em cada câmara, conforme a Fig. 4.15. O amortecimento do isolador utilizado, em condições normais de uso na ausência de produtos químicos, pode atingir valores de 50 a 85 %. A seguir, tem-se uma verificação dos dados característicos fornecido pelo fabricante referente ao isolador utilizado, conforme a Tabela 4.4.



Figura 4.15 – Isoladores de vibração sonora.

Tabela 4.4 – Dados característicos do isolador.

Referência	Carga Estática	Carga Dinâmica	Diâmetro	Altura da Borracha	Altura da Borracha + Parafuso	Dureza da Borracha	Deflexão	Parafusos
Micro II	70 kg	280 kg	55 mm	40 mm	95 mm	55 Shore A	1,3 mm / 70 kg	5/16", 3/8"

O fabricante fornece, ainda, algumas vantagens do uso deste isolador, como: dispensa de chumbagem do equipamento no piso; fixação em qualquer lugar instantaneamente; nivelamento; isolamento; antiderrapante; diminuição do ruído; e absorção da vibração.

4.3.2– Materiais Constituintes das Divisórias

Para um melhor entendimento dos materiais que constituem as divisórias, foi realizado um breve estudo de todos os materiais que as constituem como: a fibra de coco, a fibra de açai, e o compensado de 4 (quatro) mm.

a) A Fibra de Coco

A fibra de coco, resíduo do coco que como outros materiais que antes não eram totalmente aproveitados, hoje, é matéria prima de setores industriais. Este material está servindo para a confecção de estofamentos de banco de automóveis, mantas de colchões, tapetes, vasos dentre outros, chegando até a ser usado na prevenção de erosões.

Este material já foi utilizado como material de estudo do Curso de Engenharia Mecânica (Área de Vibrações e acústica) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Em seu trabalho, Mafra (2004), utilizou a fibra de coco para a confecção de painéis acústicos, de modo a se aproveitar as características dos dois mecanismos de absorção sonora possíveis, ou seja, dos materiais porosos e fibrosos.

No entanto, para o trabalho aqui reportado, utilizaram-se mantas desta fibra com a finalidade de se construir, juntamente com compensado fino, divisórias e se determinar a sua Perda de Transmissão. As mantas, como visto na Fig. 4.16, foram confeccionadas nas dimensões de 0,67 m de largura por 0,55 m de altura e com duas espessuras (50 mm e 100 mm). Durante os ensaios foram usadas amostras com 3 (três) tipos de densidades, melhor especificadas no próximo capítulo.



Figura 4.16 – Manta de Fibra de Coco.

b) A Fibra de Açai

A fibra de açai é um resíduo do açai, fruto proveniente do açazeiro que pertence à família das palmáceas e do gênero *Euterpe*, euterpe oleorácea.

O Açai é um material que pode ser encontrado com grande facilidade na região amazônica, sendo bastante usado como adubo orgânico, além de oferecer uma alternativa industrial para a geração de energia.

Este material, também, já foi utilizado como material de estudo do Curso de Engenharia Mecânica (Área de Materiais e Processos) da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foi realizada uma avaliação destas fibras para a fabricação de compósitos.

No entanto, para o trabalho aqui reportado, utilizou-se esta fibra em forma de mantas a serem usadas em conjunto com o compensado fino para a determinação de sua Perda de Transmissão. As mantas, como visto na Fig. 4.17, foram confeccionadas nas dimensões de 0,67 m de largura por 0,55 m de altura e com duas espessuras (50 mm e 100 mm). Durante os ensaios foram usadas amostras com 2 (dois) tipos de densidades, melhor especificadas no próximo capítulo.



Figura 4.17 – Manta de Fibra de açai.

d) O Compensado de 4 mm

Na confecção das divisórias foram utilizadas chapas de compensado de 4 mm. Estas chapas, nas dimensões de 0,69 m de largura por 0,57 m de altura, formam paredes duplas separadas por um espaço de ar que foi preenchido, ora pela fibra de coco ora pela fibra de açai.



Figura 4.18 – Chapa de Compensado de 4 mm.

Nas pesquisas bibliográficas realizadas não foram encontrados os valores do isolamento sonoro do compensado de 4 mm.

4.4 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como foi citado, sabe-se que as câmaras reverberantes são constituídas do compensado de 20 mm de espessura e possuem uma janela de vidro de duplo de 5 mm, a partir disso foi feito um estudo bibliográfico referente à PT desses materiais que as constituem para que a instalação das janelas de vidro nas câmaras não pudessem influenciar nos resultados dos testes. Este mesmo estudo deveria ser realizado para as divisórias, de forma que a PT das amostras ensaiadas fosse menor do que a PT dos materiais constituintes das câmaras, para que com isto os resultados ficassem mais próximos à realidade, ou seja, os resultados estariam levando mais em consideração a perda referente à transmissão pela divisória do que a perda referente à transmissão pela estrutura da câmara.

Contudo, este estudo referente à PT das divisórias não foi realizado por se tratar de divisórias constituídas de materiais regionais que foram bem pouco estudados e que não possuem dados referentes às suas perdas de transmissão.

CAPÍTULO V - AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DAS DIVISÓRIAS

O presente capítulo descreve o processo de todas as atividades experimentais desenvolvidas, especificamente dos ensaios experimentais necessários para a determinação da PT. Além disso, são descritas informações referentes às câmaras, às divisórias e à norma ISO 140, que serviram de apoio a estas atividades experimentais.

Todos os procedimentos, assim como os equipamentos utilizados estão descritos nos itens a seguir. Antes da realização dos ensaios para a determinação da PT das divisórias, foi realizado, também, um processo de qualificação das câmaras reverberantes reduzidas.

5.1 – CÂMARAS REVERBERANTES REDUZIDAS (UFPA – GVA)

A construção das mini-câmaras reverberantes foi realizada de acordo com os padrões e normas internacionais, especificamente, as normas ISO 140 e ISO 354. As dimensões das câmaras reduzidas foram estabelecidas a partir da aplicação de uma escala de 1:6 sobre as dimensões das câmaras da UFSM, embora tenham sido feitas algumas adaptações para o atendimento das exigências das normas.

A Tabela 5.1 apresenta informações referentes às dimensões das câmaras e da abertura de teste, local referente ao posicionamento da divisória, existente entre as mesmas, enquanto a Fig. 5.1 retrata um esquema de ensaio, onde a divisória (amostra de teste) é posicionada entre as duas câmaras reverberantes.

Tabela 5.1 – Dimensões da geometria das câmaras reverberantes e da abertura de teste.

Dimensões	Câmara Emissora	Câmara Receptora	Abertura de Teste
Dimensão x (m)	0,80	0,80	0,05 e 0,10
Dimensão y (m)	0,67	0,67	0,67
Dimensão z (m)	0,55	0,55	0,55
Volume (m ³)	0,295	0,295	-

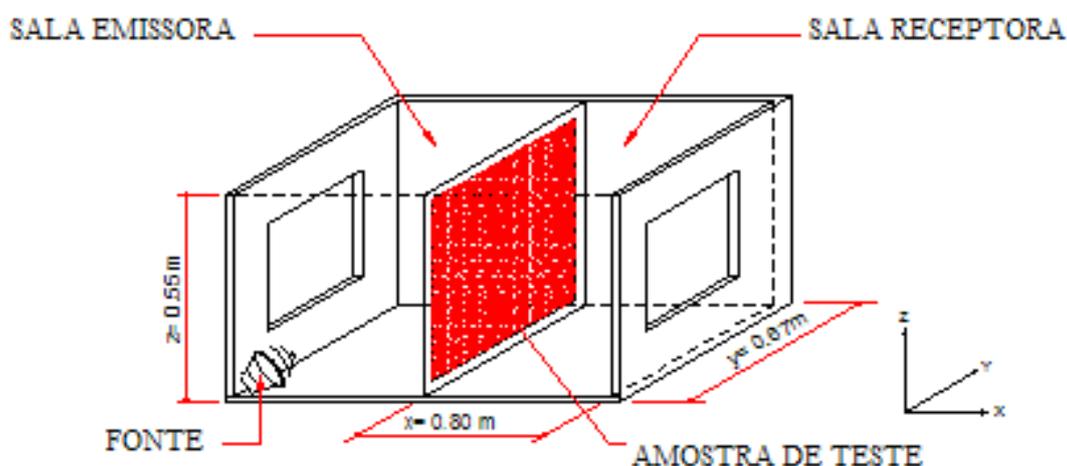


Figura 5.1 – Representação esquemática da determinação da perda de transmissão.

Também é possível notar, conforme as dimensões da abertura de teste, que a divisória se estende do piso ao teto e de parede a parede, cobrindo toda a área de acoplamento entre as duas câmaras, como bem recomenda a norma. A dimensão x, correspondente à abertura de teste, possui dois valores correspondentes às duas espessuras de divisórias utilizadas.

5.2 – SISTEMA DE DIVISÓRIAS – AMOSTRAS DE TESTE

O sistema de divisória foi construído de modo que ficasse separado das câmaras em uma espécie de “colméia” (caixa onde o material constituinte da divisória é instalado), para

que amostras de diversas espessuras pudessem ser usadas sem prejudicar a estrutura das câmaras. Para este estudo foram construídas duas colméias de espessuras diferentes.

O vazamento existente entre as fibras dos materiais regionais usados para a confecção das divisórias, torna estas mantas regionais incapazes de se comportarem como uma parede divisória, com o intuito de se reduzir a transmissão sonora entre dois ambientes adjacentes, necessitando de um material sem vazamentos que as sustentem. O material utilizado para sustentar estas mantas foi o compensado com 4 mm de espessura.

Desta forma, o sistema de divisória ficou constituído de duas folhas de compensado, instaladas paralelamente, separadas por um espaço de ar que foi preenchido com as amostras dos materiais regionais utilizados. As folhas de compensado foram instaladas nas extremidades das colméias, conforme já foi descrito com mais clareza no capítulo anterior.

As amostras regionais escolhidas para estudo, que preencheram o espaço de ar entre as folhas de compensado, foram confeccionadas em forma de uma manta de 0,67m x 0,55m, com dois tipos de espessura para cada tipo de divisória testada. Têm-se, a seguir, descrições dos tipos de divisórias confeccionadas e utilizadas durante os ensaios experimentais.

5.2.1 - Divisória de Fibra de Coco

A divisória de fibra de coco ficou constituída da seguinte forma: Compensado + Fibra de Coco + Compensado. Durante este projeto as divisórias de fibra de coco são representadas pela simbologia DFC (Divisória de Fibra de Coco). Estas amostras formam um conjunto de seis divisórias, com duas espessuras e três densidades diferentes. São elas:

- a) DFC I: corresponde à manta de 50 mm de espessura com densidade de 18 kg/m³;
- b) DFC II: corresponde à manta de 50 mm de espessura com densidade de 60 kg/m³;

c) DFC III: corresponde à manta de 50 mm de espessura com densidade de 130 kg/m³;

d) DFC IV: corresponde à manta de 100 mm de espessura com densidade de 18 kg/m³;

e) DFC V: corresponde à manta de 100 mm de espessura com densidade de 60 kg/m³;

f) DFC VI: corresponde à manta de 100 mm de espessura com densidade de 130 kg/m³.

5.2.2 - Divisória de Fibra de Açai

A divisória de fibra de açai ficou constituída da seguinte forma: Compensado + Fibra de Açai + Compensado. No decorrer do presente texto as divisórias de fibra de açai são representadas pela simbologia DFA (Divisória de Fibra de Açai). Estas amostras formam um conjunto de duas divisórias, com espessuras e densidades diferentes, sendo elas:

a) DFA I: corresponde à manta de 50 mm de espessura com densidade de 119 kg/m³;

b) DFA II: corresponde à manta de 100 mm de espessura com densidade de 65 kg/m³.

É importante observar, que ensaios somente das chapas de compensado foram realizados, para se ter um resultado que permita inferir a mudança de comportamento sobre a perda de transmissão devido ao uso das fibras.

5.3 – SÍNTESE DA NORMA ISO 140 (1997)

Com o intuito de se obter uma boa avaliação experimental da perda de transmissão das divisórias analisadas, o procedimento experimental foi baseado na norma ISO 140

(1997). E devido a sua grande usabilidade, foi realizado um breve resumo sobre as exigências laboratoriais e os procedimentos experimentais recomendados, respectivamente encontrados na Parte 1 e Parte 3 desta norma.

Dentre os principais tópicos presentes nas partes 1 e 3 da norma ISO 140, que auxiliaram na realização dos ensaios experimentais, tem-se:

5.3.1 - Câmaras Reverberantes

Os volumes e os formatos das duas câmaras reverberantes não devem ser iguais. Uma diferença mínima entre os volumes das câmaras de 10% (dez por cento) é recomendada, porém o volume mínimo exigido para uma câmara é de 50 m³.

As razões entre as dimensões de cada uma das câmaras deverão ser adotadas de tal modo que as frequências naturais na região de baixas frequências sejam espaçadas o mais uniforme possível. Entretanto, o uso de difusores é recomendado para a obtenção de uma boa difusividade.

5.3.2 - Amostras de Teste

As dimensões das amostras de teste (divisórias) são determinadas pelas dimensões da abertura de teste apresentada entre as câmaras reverberantes adjacentes, definida na parte 1 da ISO 140. Por este motivo é que se optou em se estender a divisória do piso ao teto e de parede a parede, ou seja, cobrindo toda a abertura de teste.

Cabe ressaltar que o uso de divisórias com dimensões menores que as dimensões da abertura de teste apresentam uma maior sensibilidade nos resultados obtidos devido às influências das condições de fixação e possíveis variações da difusividade do campo sonoro.

A norma sugere para uma obtenção mais realística dos resultados, os seguintes procedimentos: utilização das condições de fixação de forma similar às condições reais; uso da vedação em torno do perímetro da amostra e possíveis junções de fixação.

5.3.3 - Geração do Campo Sonoro na Câmara Emissora

O campo sonoro na câmara emissora deve ser permanente e apresentar um espectro contínuo em toda faixa de frequência analisada. Desta forma, foi utilizada uma excitação do tipo banda larga, ruído rosa. Entretanto, é necessário verificar se o espectro gerado proporciona uma boa relação sinal / ruído na medição do nível de pressão sonora da câmara receptora.

É recomendável, ao se utilizar uma fonte sonora simples, o uso de no mínimo duas posições de fontes distintas, o que não foi possível devido ter sido utilizado uma fonte fixa num dos cantos da câmara emissora. O posicionamento da fonte deve ser otimizado para a geração de um campo o mais difuso possível. Conjuntamente, a distância à estrutura sob teste deve ser tal que o caminho de propagação direto não seja dominante.

5.3.4 - Medição do Nível de Pressão Sonora Médio

O Nível de Pressão Sonora Médio em uma sala é determinado através dos níveis de pressão sonora (NPS_i) que, geralmente, são medidos em diversos pontos de leitura localizados no ambiente de estudo.

O valor do Nível de Pressão Sonora Médio (\overline{NPS}) é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$\overline{NPS} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS_i}{10}} \quad (5.1)$$

onde NPS_i são os níveis de pressão sonora NPS_1 até NPS_n em n posições diferentes da câmara.

Durante as medições dos níveis de pressão sonora médios, o posicionamento dos microfones deve ser configurado de modo a proporcionar o registro do campo difuso gerado pela fonte sonora devidamente posicionada. Para atender a estas exigências as seguintes distâncias mínimas são recomendadas (os valores entre parênteses correspondem aos valores das distâncias mínimas recomendadas transformados em escala reduzida):

- 0,7 (0,12) m entre as posições dos microfones;

- 0,7 (0,12) m entre qualquer posição de microfone e os contornos na câmara e difusores existentes;

- 1,0 (0,17) m entre qualquer posição de microfone e a fonte sonora;

- 1,0 (0,17) m entre qualquer posição de microfone e a divisória.

De acordo com as distâncias mínimas recomendadas foi realizado um estudo estatístico com a média dos resultados para determinados conjuntos de pontos de medição. Por exemplo, foram comparados os resultados do NPS médio entre 12, 9, 6 e outras quantidades de pontos de medições, para em seguida através da análise destes resultados encontrar um valor médio ideal de posições dos microfones para a determinação do NPS de forma que fosse possível reduzir o tempo de análise durante os ensaios experimentais.

Através deste estudo obteve-se a configuração de seis pontos de medição do NPS, conforme a Fig. 5.2 e a Tabela 5.2.

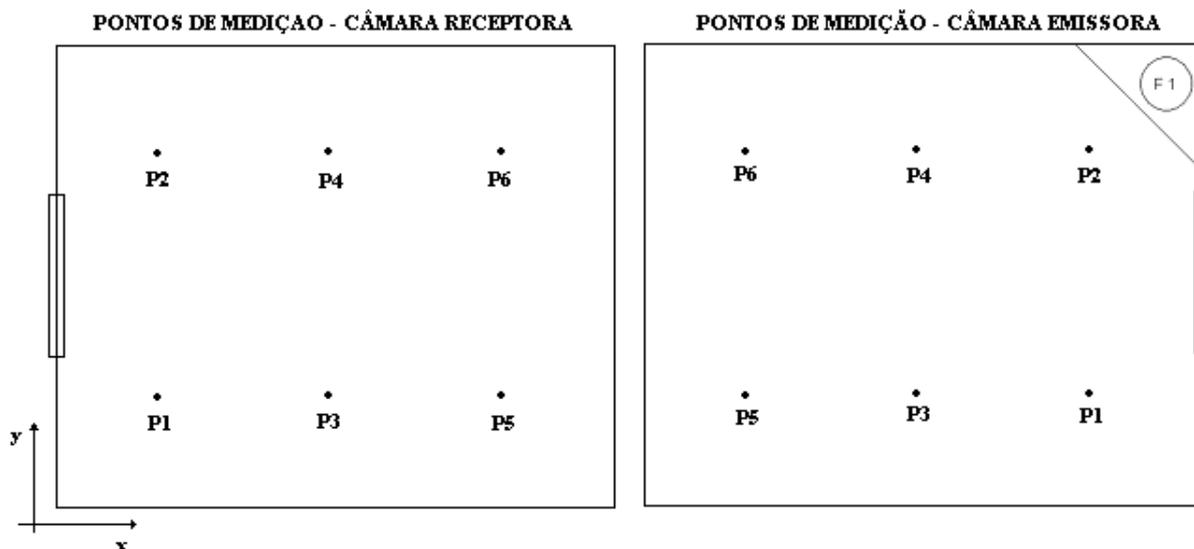


Figura 5.2 – Representação esquemática dos pontos de medição nas câmaras reverberantes.

Tabela 5.2 – Coordenadas dos pontos de medição e localização dos microfones.

Ponto	Dimensão x (m)	Dimensão y (m)
P1	0,17	0,21
P2	0,17	0,46
P3	0,40	0,21
P4	0,40	0,46
P5	0,63	0,21
P6	0,63	0,46

Os valores encontrados na Tabela 5.2 correspondem à câmara receptora, os valores correspondentes da câmara emissora são simétricos aos valores da receptora. Para cada ponto foram realizadas duas medições, alterando-se somente a altura do microfone.

Segundo a ISO 140, em cada posição de microfone individual, o tempo médio de medição deve ser de pelo menos seis segundos em cada banda de frequência com frequências centrais abaixo de 400 Hz. Para bandas de frequências centrais mais altas, é permitido diminuir o tempo a não menos que quatro segundos. Usando um microfone

móvel, o tempo médio de medição cobrirá um número inteiro de travessias e não será menos que trinta segundos.

5.3.5 - Medição da Perda de Transmissão Sonora

Na parte 3 da ISO 140, a perda de transmissão sonora (PT) é avaliada utilizando-se a Eq. (5.2).

$$PT = \overline{NPS}_1 - \overline{NPS}_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (5.2)$$

onde: \overline{NPS}_1 é o nível de pressão sonora médio na sala de emissão, em decibéis; \overline{NPS}_2 é o nível de pressão sonora médio na sala de recepção, em decibéis; S é a área da partição ou da abertura de teste, em metros quadrados; e A é a área de absorção sonora equivalente na sala de recepção, em metros quadrados.

A expressão “*Sound Transmission Loss*” (TL) é, também, usada em países de língua inglesa e é equivalente à perda de transmissão sonora.

5.3.6 - Medição do Tempo de Reverberação e Avaliação da Área de Absorção Sonora Equivalente

Para a avaliação da perda de transmissão sonora segundo a Eq. 5.2, é preciso obter o valor da área de absorção sonora equivalente (A) da sala receptora. Este valor é avaliado através da medição do Tempo de Reverberação (TR) de acordo com a norma ISO 354 e determinado usando a Eq. (5.3) - Fórmula de Sabine.

$$A = \frac{0,161V}{T} \quad (5.3)$$

onde: A é a área de absorção sonora equivalente na sala de recepção, em metros quadrados; V é o volume da sala de recepção, em metros cúbicos; T é o tempo de reverberação da sala de recepção, em segundos.

A avaliação do tempo de reverberação da curva de decaimento deve começar após 0,1 segundo depois que a fonte sonora foi desligada, ou de um nível de pressão sonora abaixo alguns decibéis do que aquele no começo do decaimento.

A faixa usada não será menos do que 20 dB, e não deve ser tão maior do que o decaimento observado e não pode ser aproximado por uma linha direta. O ruído desta faixa será pelo menos 10 dB acima do nível de ruído de fundo.

O número de curvas de decaimento independentes medidas corresponde ao número de posições do microfone vezes o número de posições da fonte, com no mínimo doze curvas o que não é conseguido facilmente em um volume muito pequeno como o da mini-câmara. Entretanto, pode ser considerado um número mínimo de seis decaimentos medidos para cada banda de frequência.

Segundo recomendações da norma ISO 354, durante as medições do tempo de reverberação algumas exigências devem ser atendidas; os valores entre parênteses correspondem aos valores exigidos transformados em escala reduzida:

- As gravações devem ser feitas com pelo menos três posições de microfone distanciadas entre si de no mínimo meio comprimento de onda sonora ($\lambda/2$) correspondente à frequência central da banda de interesse;

- Deve ser utilizado somente um microfone por vez e afastado pelo menos 1,0 (0,17) m da divisória;

- 1,0 (0,17) m entre qualquer posição de microfone e as superfícies da câmara e dos difusores;

- 2,0 (0,33) m entre qualquer posição de microfone e a fonte sonora.

Os pontos de medição do TR, atendendo todas as exigências quanto à norma, correspondem aos mesmos pontos de medição do NPS descritos anteriormente.

5.3.7 - Correções para o Ruído de Fundo

As medições dos níveis de Ruído de Fundo (RF) devem ser efetuadas para assegurar que as observações realizadas na câmara de recepção não sejam afetadas por sons indesejáveis, tais como: ruídos externos à câmara de teste; ruídos provenientes do sistema elétrico, entre outros.

O nível de ruído de fundo deve ser 6 dB inferior (e preferencialmente mais que 15 dB) ao nível do sinal medido combinado com o ruído de fundo. Se a diferença entre o nível da câmara de recepção e o nível de ruído de fundo é menor que 15 dB, mas superior a 6 dB, então correções referentes ao nível de sinal deverão ser efetuadas.

Desta forma, o cálculo para o nível do sinal é corrigido de acordo com a Eq. (5.4).

$$NPS_{\text{corrigido}} = 10 \log \left(10^{\frac{NPS_{\text{combinado}}}{10}} - 10^{\frac{NPS_{\text{rf}}}{10}} \right) \quad (5.4)$$

onde: $NPS_{\text{combinado}}$ é o nível de pressão sonora do sinal combinado com o ruído de fundo, em decibéis; e NPS_{rf} é o nível de ruído de fundo, em decibéis.

Para os casos em que a diferença é inferior ou igual a 6 dB em qualquer banda de frequência, recomenda-se a utilização do fator de correção de 1,3 dB correspondente à diferença de 6 dB. Sendo necessário, neste caso, notificar no relatório de ensaio as proximidades dos limites de medição.

5.3.8 - Expressões dos Resultados

Os valores encontrados para a perda de transmissão de uma estrutura de teste devem ser apresentados em forma de tabela e na forma gráfica. No primeiro caso, a tabela deve conter todas as frequências medidas e o numeral deverá apresentar apenas uma casa decimal. No segundo caso, a curva gráfica deve apresentar os valores em decibel versus a frequência.

5.4 – DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NAS CÂMARAS

Algumas condições ambientais devem ser levadas em consideração durante as atividades experimentais, pois as mesmas podem interferir de maneira significativa nos resultados destas atividades.

Certas medições, como o tempo de decaimento, dependem ainda das características da sala, tais como o seu volume e a quantidade de absorção sonora do ar presente em seu interior. Sabe-se que absorção sonora do ar deve ser considerada, e secar o ar pode ser necessário para obter resultados mais exatos. Entretanto, para salas pequenas, como no caso das mini-câmaras, a absorção do ar pode ser negligenciada, especialmente em baixas frequências.

5.5 – QUALIFICAÇÃO DAS CÂMARAS REVERBERANTES

Após a construção das câmaras e antes da realização dos ensaios das divisórias foi realizado um processo de qualificação das câmaras reverberantes, para assim prosseguir com maior segurança nos ensaios da perda de transmissão sonora das divisórias estudadas.

Dentre os parâmetros avaliados para a qualificação das câmaras, tem-se: a área de absorção sonora equivalente e a difusividade do campo sonoro. Estes parâmetros foram avaliados seguindo critérios da norma ISO 140 (1997), ISO 354 (1999) e ISO 3741(1988).

5.5.1 - Área de Absorção Sonora Equivalente

A área de absorção sonora é um parâmetro determinado experimentalmente através da medição do tempo de reverberação. Para a norma ISO 140-1, os tempos de reverberação das câmaras reverberantes não devem ser excessivamente longos, entretanto a mesma não recomenda valores limitantes para estes. Já a norma ISO 354, fornece uma delimitação para o tempo de reverberação através da área de absorção sonora equivalente.

Segundo a ISO 354, a área de absorção sonora equivalente de uma câmara vazia, determinada em bandas de oitava, não deve exceder os valores da Tabela 5.3, para uma câmara com um volume de 200 m³.

Tabela 5.3: Máxima área de absorção sonora equivalente para câmara com volume de 200 m³ sugerida pela norma ISO 354, em bandas oitava.

Frequência Central da Banda (Hz)	Área de Absorção Sonora Equivalente (m²)
125	6,5
250	6,5
500	6,5
1000	7,0
2000	9,5
4000	13,0
8000	13,0

Entretanto, quando a câmara difere do volume 200 m³, como é o caso da câmara em estudo, os valores dados na Tabela 5.3 devem ser multiplicados pelo fator $(V/200)^{2/3}$, onde V é o volume da câmara, em metros cúbicos. Como o volume da câmara é de

aproximadamente $0,295 \text{ m}^3$, então se devem multiplicar os valores tabelados pelo fator de 0,013. Portanto, os valores máximos da área de absorção sonora da câmara reduzida vazia não devem exceder os valores da Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Máxima área de absorção sonora equivalente para câmara reduzida com volume de $0,295 \text{ m}^3$, em bandas de oitava.

Frequência Central da Banda (Hz)	Área de Absorção Sonora Equivalente (m²)
125	0,085
250	0,085
500	0,085
1000	0,091
2000	0,124
4000	0,169
8000	0,169

A área de absorção sonora equivalente deve ser determinada através da medição do tempo de reverberação. Os equipamentos utilizados para a determinação do TR foram:

- Microcomputador;
- Analisador dinâmico de sinais Pulse Brüel & Kjaer 3560 C;
- Microfone de campo difuso 4942 Brüel & Kjaer;
- Fonte sonora representada pelo alto-falante modelo MD Bass 6 MB1(Selenium) ;
- Amplificador de potência modelo TP 500, do fabricante Ihc Punch.

Os procedimentos para medição experimental deste parâmetro foram baseados na ISO 354, cujo princípio é baseado no registro do tempo de decaimento referente a 60 dB

quando a fonte sonora em regime permanente é cessada. A Fig. 5.3 fornece um exemplo do registro do decaimento da divisória DFC III para a frequência de 4 kHz. A medição do TR foi realizada por uma rotina do software Pulse Labshop 9.0.

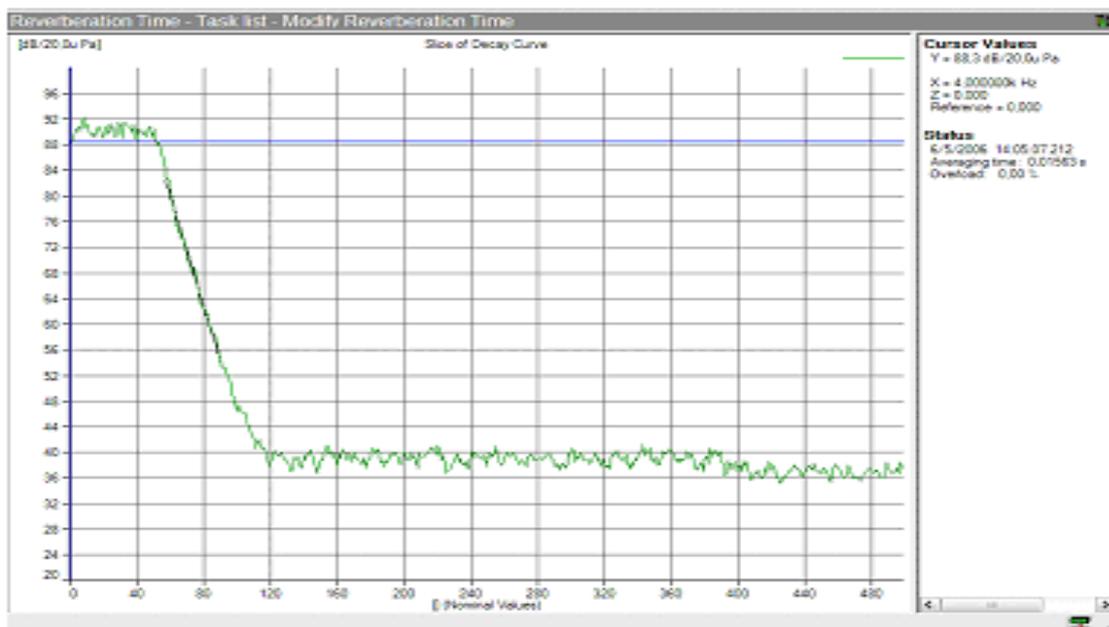


Figura 5.3: Curva de decaimento da pressão sonora para a banda de 4kHz na determinação do tempo de reverberação.

Os valores encontrados para os tempos de reverberação da mini-câmara estão dispostos na Tabela 5.5 para as faixas de frequências de interesse. Os resultados apresentados, correspondentes à melhor configuração encontrada para este processo de qualificação, são referentes à câmara receptora, pois somente para esta câmara é que se faz necessário encontrar o valor da absorção sonora equivalente quando o intuito é se determinar a perda de transmissão sonora.

Tabela 5.5: Resultados do TR da câmara receptora da UFPA-GVA, em bandas de oitava.

Frequência Central da Banda (Hz)	Tempo de Reverberação – Câmara Receptora (s)
125	0,566
250	0,397
500	0,620
1000	0,560
2000	0,386
4000	0,349
8000	0,285

A partir dos valores encontrados para o TR das mini-câmaras, uma análise a respeito da magnitude da área de absorção sonora equivalente pode ser efetuada a câmara receptora. Os resultados desta análise estão dispostos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Análise da área de absorção sonora equivalente para a câmara receptora, em bandas de oitava.

Frequência (Hz)	Área – Medição Experimental (m²)	Área Máxima - Norma ISO 354 (m²)	Análise da Qualificação
125	0,084	0,085	Aprovada
250	0,120	0,085	Reprovada
500	0,077	0,085	Aprovada
1000	0,085	0,091	Aprovada
2000	0,123	0,124	Aprovada
4000	0,136	0,169	Aprovada
8000	0,167	0,169	Aprovada

Através dos resultados encontrados, na Tabela 5.6, pode-se verificar que somente na banda de 250 Hz a câmara receptora foi reprovada. Com o aumento do TR nesta faixa de frequência seria possível corrigir esta reprovação, ou seja, seria necessário diminuir a absorção própria da estrutura da câmara, pois não foi utilizado nenhum material absorvente adicional durante este processo de qualificação.

5.5.2 - Difusividade do Campo Sonoro

Quanto ao critério de difusividade do campo sonoro, a norma ISO 140-1 relata que os campos sonoros de ambas as câmaras devem ser os mais difusos possíveis, já que a formulação de recorrência utilizada para o cálculo da perda de transmissão faz uso de tais hipóteses.

Este parâmetro é avaliado e ajustado através da medição da distribuição espacial do nível de pressão sonora em cada mini-câmara. A distribuição espacial do nível de pressão sonora é um dos métodos pelo qual a difusividade (ou uniformidade, um dos conceitos de difusão) do campo sonoro em câmaras reverberantes pode ser facilmente avaliada.

A norma ISO 3741 estabelece o desvio padrão máximo admissível para cada banda de frequência, em terço de oitava, que proporciona um campo difuso em termos aceitáveis de engenharia. Contudo, tem sido aceito que o campo acústico em uma câmara reverberante qualificada exibe difusividade adequada se o desvio padrão permanecer abaixo de 1,5 dB. Desta forma, a qualificação, quanto à difusividade, das mini-câmaras reverberantes foi realizada considerando-se o valor limite de 1,5 dB como desvio padrão.

Os níveis de pressão sonora (NPS), medidos diante o regime permanente de funcionamento da fonte sonora, e os respectivos desvios associados a cada banda de frequência são apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8, para cada uma das câmaras, respectivamente.

Tabela 5.7: Desvio padrão dos NPS medidos na câmara emissora, em bandas de oitava.

Frequência Central (Hz)	NPS Médio Emissora (dB)	Desvio Padrão	Desvio Admissível	Análise
125	78,77	2,8	1,5	Reprovado
250	87,99	1,5	1,5	Aprovado
500	85,69	1,4	1,5	Aprovado
1000	92,74	0,9	1,5	Aprovado
2000	93,59	0,4	1,5	Aprovado
4000	95,06	1,2	1,5	Aprovado
8000	86,12	0,8	1,5	Aprovado

Tabela 5.8: Desvio padrão dos NPS medidos na câmara receptora, em banda de oitava.

Frequência Central (Hz)	NPS Médio Receptora (dB)	Desvio Padrão	Desvio Admissível	Análise
125	66,69	4,0	1,5	Reprovado
250	76,73	2,4	1,5	Reprovado
500	67,09	0,7	1,5	Aprovado
1000	65,11	1,0	1,5	Aprovado
2000	61,35	0,7	1,5	Aprovado
4000	56,65	0,7	1,5	Aprovado
8000	45,88	1,1	1,5	Aprovado

Através dos resultados encontrados, nas Tabelas 5.7 e 5.8, pode-se verificar que a câmara emissora foi reprovada somente na banda de 125 Hz, enquanto que a câmara receptora foi reprovada nas bandas de 125 e 250 Hz. Mais uma vez o processo de qualificação apresentou uma não conformidade em baixa frequência, fato este que pode ter ocorrido devido à redução da uniformidade do campo sonoro proporcionada pela absorção inerente da câmara, principalmente na região de baixas frequências.

5.5.3 – Análise dos Resultados Obtidos do Processo de Qualificação

Quanto ao primeiro parâmetro de qualificação analisado, a área de absorção sonora equivalente, verificou-se a necessidade do aumento do TR na faixa de 250 Hz que poderia ser obtido através da diminuição da absorção sonora da própria câmara, o que, ao mesmo tempo, beneficiaria a difusividade do campo sonoro, devido à ausência de absorção contribuir para uma melhora da difusividade de um ambiente. Mas, isto só seria possível com o revestimento da estrutura interna da câmara com um material que não fosse o compensado e que permitisse a diminuição da absorção deste ambiente.

Analisando os resultados pode-se verificar, também, que a câmara emissora apresenta uma boa difusividade em seu campo sonoro, proporcionando um campo difuso incidente eficaz sobre a divisória.

Devido às reprovações terem ocorrido nas faixas de frequência abaixo de 250 Hz, passou-se a considerar que os valores adquiridos acima desta banda proporcionam uma maior confiabilidade quanto aos valores estimados para a perda de transmissão das divisórias.

5.6 – DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA

Nesta parte do capítulo estão descritas as atividades experimentais relacionadas à determinação da perda de transmissão sonora das divisórias e realizadas após a qualificação das câmaras reduzidas.

Encontram-se ainda, nesta parte, dados referentes ao processo de montagem experimental utilizado e os procedimentos de medição segundo a norma ISO 140 – Parte 3, finalizando com a apresentação e análise dos valores encontrados para a perda de transmissão sonora referente a cada uma das amostras ensaiadas.

5.6.1 – Descrição do Conjunto de Procedimentos de Medição

Para a determinação da PT é preciso calcular a diferença entre os níveis de ruído gerados no recinto de emissão e os níveis de ruído transmitidos para o recinto de recepção através da divisória que separa estes recintos, posicionando-se a divisória entre os dois ambientes adjacentes.

Para que este parâmetro fosse determinado alguns procedimentos foram realizados, de acordo com a ISO 140 – 3, antes e durante os ensaios para a determinação da PT das divisórias, segundo as atividades a seguir.

(a) Realização da limpeza das superfícies das câmaras antes do acoplamento dos subsistemas (câmara – divisória - câmara) para dar início aos ensaios;

(b) Geração de ruído, assim como a medição do nível de pressão sonora (NPS_1) na câmara emissora para cada uma das divisórias;

(c) Medição do nível de pressão sonora (NPS_2) na câmara de recepção para cada uma das divisórias;

(d) Medição do tempo de reverberação (TR) na câmara de recepção para cada uma das divisórias;

(e) Medição do ruído de fundo (RF) na câmara de recepção para cada uma das divisórias.

A lista das atividades experimentais descrita foi realizada para todos os pontos de medição.

5.6.2 – Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados para as medições dos parâmetros correspondem aos mesmos equipamentos usados durante o processo de qualificação das câmaras reverberantes, descritos anteriormente.

5.6.3 – Processo de Montagem Experimental

A fonte sonora ficou posicionada no canto (encontro de duas paredes e o piso) da câmara emissora para medir o NPS_1 e o NPS_2 , e no canto da câmara de recepção para medir o TR, respeitando as distâncias mínimas exigidas pelas normas.

As medições do NPS e do TR, seguiram, respectivamente, os procedimentos da norma ISO 140 e ISO 354. Um microfone de campo difuso B&K 4942 foi utilizado e uma fonte sonora, um alto-falante modelo MD Bass 6 MB1(Selenium), excitou a sala com ruído rosa, filtrado na faixa de oitava de 125 Hz a 8kHz.

O sinal da fonte, a aquisição e o processamento do sinal recebido foram controlados através de um microcomputador e assim como as respostas das salas, capturadas pelo microfone, foram processadas com a utilização do software PULSE Labshop versão 9.0 para a obtenção dos parâmetros acústicos.

5.6.4 – Resultados Obtidos da Perda de Transmissão das Divisórias

Este item expõe, conforme os padrões da norma ISO 140, os resultados encontrados referentes às PT das divisórias estudadas.

Os experimentos executados foram divididos em três grupos de medições, abrangendo um total de nove divisórias. O primeiro grupo de ensaio realizado foi o da divisória de compensado com o espaçamento de ar preenchido pelas diversas fibras de coco; o segundo grupo de ensaio realizado foi o da divisória de compensado com o

espaçamento de ar preenchido pelas fibras de açai; e, por fim, realizou-se o ensaio da divisória de compensado duplo de 4 mm sem o preenchimento do espaço de ar entre estas folhas de compensado. Este último foi realizado para inferir a influência das fibras usadas sobre o valor da perda de transmissão.

Antes de terem sido iniciadas as medições dos parâmetros acústicos, foram realizadas medições dos níveis de Ruído de Fundo (RF) para assegurar que os valores dos parâmetros medidos nas câmaras de recepção não fossem afetados por sons indesejáveis provocados por ruídos externos à câmara reverberante. A diferença entre o nível de sinal combinado com o ruído de fundo e o nível de ruído de fundo alcançou valores maiores do que 15 dB, assim correções referentes ao nível de sinal não foram efetuadas.

a) Divisória de Fibra de Coco (DFC)

As divisórias de fibra de coco somam um total de 6 divisórias, aqui classificadas, simbolicamente, como: DFC I; DFC II; DFC III; DFC IV; DFC V e DFC VI. As três primeiras correspondem às divisórias de 50 mm de espessura, enquanto que as três últimas correspondem às de 100 mm de espessura, com as suas respectivas densidades de 18 kg/m³, 60 kg/m³, e 130 kg/m³. A norma ISO 140 preconiza que os resultados da PT sejam expressos em forma de tabelas e gráficos. A Tabela 5.9, assim como as Fig. 5.4, Fig. 5.5 e Fig. 5.6, mostram os resultados obtidos referentes às PT das divisórias de fibra de coco ensaiadas.

Tabela 5.9 – Resultados Experimentais da PT das divisórias de fibra de coco.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFC I	18 kg/m ³	17,89	11,56	13,73	22,16	32,79	41,73	39,29
DFC II	60 kg/m ³	17,45	10,50	15,42	25,38	34,76	42,78	40,51
DFC III	130 kg/m ³	18,04	10,38	15,99	27,08	36,94	43,65	43,19
DFC IV	18 kg/m ³	13,79	14,36	19,35	27,61	35,05	39,63	39,33
DFC V	60 kg/m ³	16,87	13,22	19,76	29,53	35,85	41,58	42,46
DFC VI	130 kg/m ³	17,31	14,69	22,06	31,16	36,33	42,71	44,01

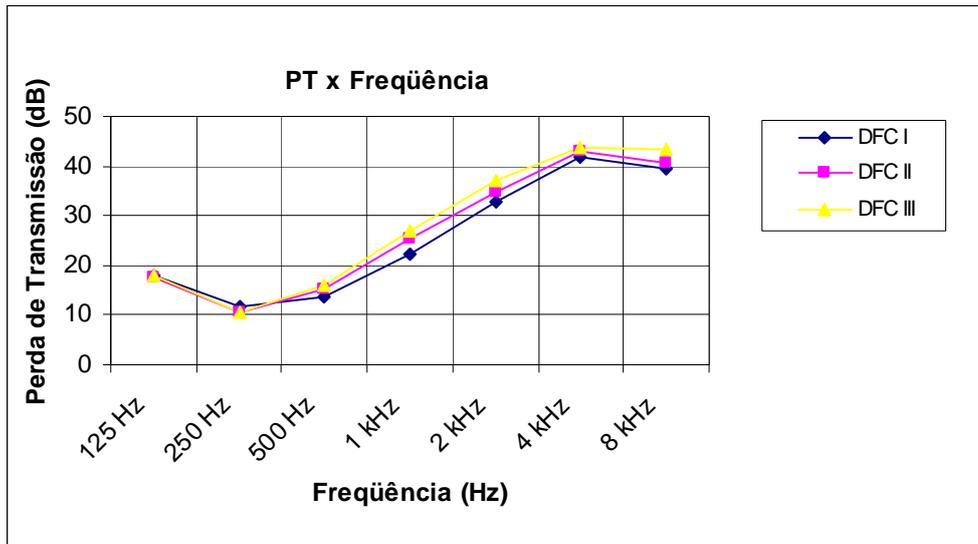


Figura 5.4 – PT gráfica das divisórias de fibra de coco de 50 mm.

Entre as divisórias de 50 mm, a mais densa DFC III, obteve a maior PT para as faixas de frequências analisadas, com exceção na faixa de 250 Hz que foi o menor valor obtido. Houve uma maior divergência dos valores na faixa de frequência de 1 kHz, alcançando uma máxima divergência de, aproximadamente, 5 dB entre as divisórias DFC I e DFC III.

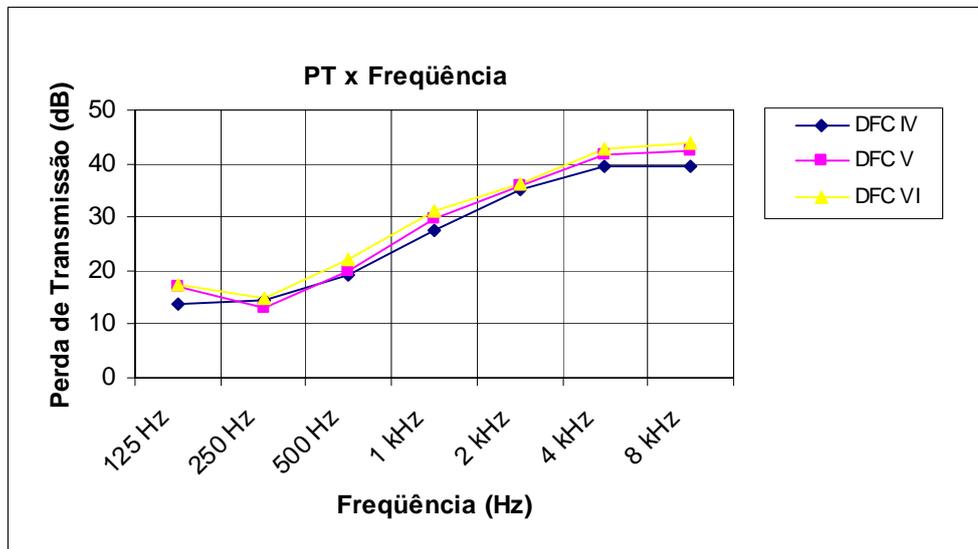


Figura 5.5 – PT gráfica das divisórias de fibra de coco de 100 mm.

A divisória mais densa DFC VI, entre as de fibra de coco de 100 mm de espessura, obteve a maior PT para todas as faixas de frequências. Assim como para a divisória de 50 mm de espessura, a maior divergência nos valores ocorreu na faixa de 8 kHz, alcançando uma máxima divergência de, aproximadamente, 5 dB entre as divisórias DFC IV e DFC VI.

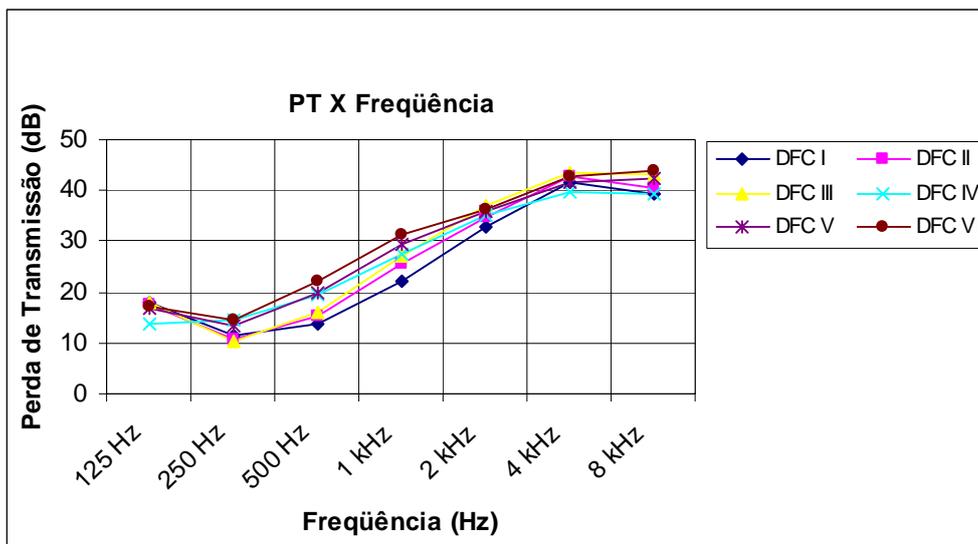


Figura 5.6 – PT gráfica de todas as divisórias de fibra de coco.

A Fig. 5.6 mostra os resultados obtidos para as seis divisórias de fibra de coco de 50 mm e de 100 mm de espessura. Analisando o conjunto de todas as divisórias de fibra de coco, observou-se que a divisória mais densa e de maior espessura, DFC VI, obteve a maior PT para todas as faixas de frequências analisadas, com exceção dos resultados nas faixas de 125 Hz, 2 e 4 kHz, no entanto os valores obtidos para a divisória DFC VI nestas faixas foram bem próximos aos maiores valores, correspondentes às divisórias DFC III.

As divergências entre os valores encontrados podem ser analisadas, de forma mais completa, através da Fig. 5.7 referente ao Desvio Padrão dos valores obtidos. O Desvio Padrão máximo de 3,2 dB ocorreu nas faixas de frequência de 500 Hz e 1 kHz.

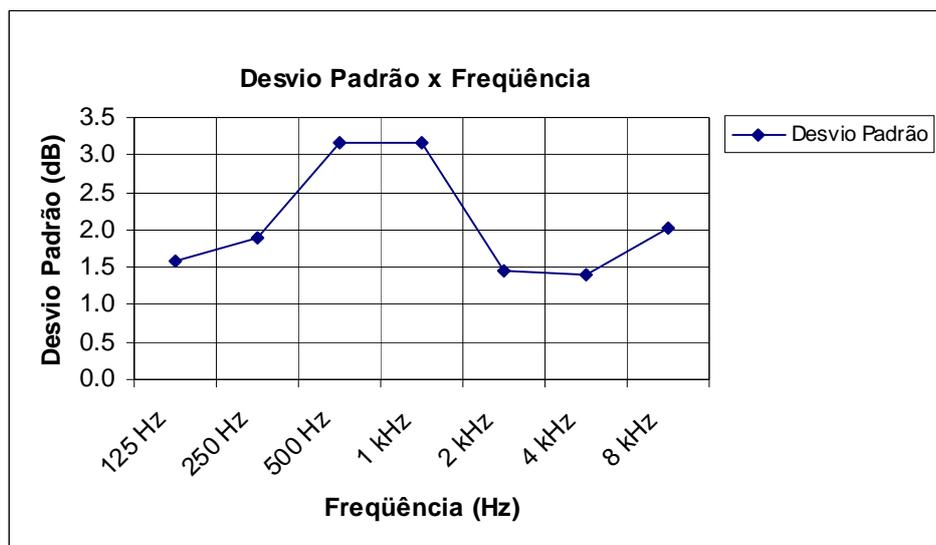


Figura 5.7 – Desvio Padrão das divisórias de fibra de coco.

b) Divisória de Fibra de Açaí (DFA)

As divisórias de fibra de açaí somam um total de duas divisórias, aqui classificadas, simbolicamente, como: DFA I; DFA II, correspondentes às divisórias de 50 mm de espessura com densidade de 119 kg/m³ e 100 mm de espessura com densidade de 65 kg/m³, respectivamente.

A Tabela 5.10, assim como a Fig. 5.8, mostram os resultados obtidos referentes às PT das divisórias de fibra de açaí ensaiadas.

Tabela 5.10 – Resultados Experimentais da PT das divisórias de fibra de açaí.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFA I	119 kg/m ³	21,44	13,36	21,64	29,26	36,86	45,15	47,56
DFA II	65 kg/m ³	17,91	15,09	21,58	29,25	37,12	43,78	44,19

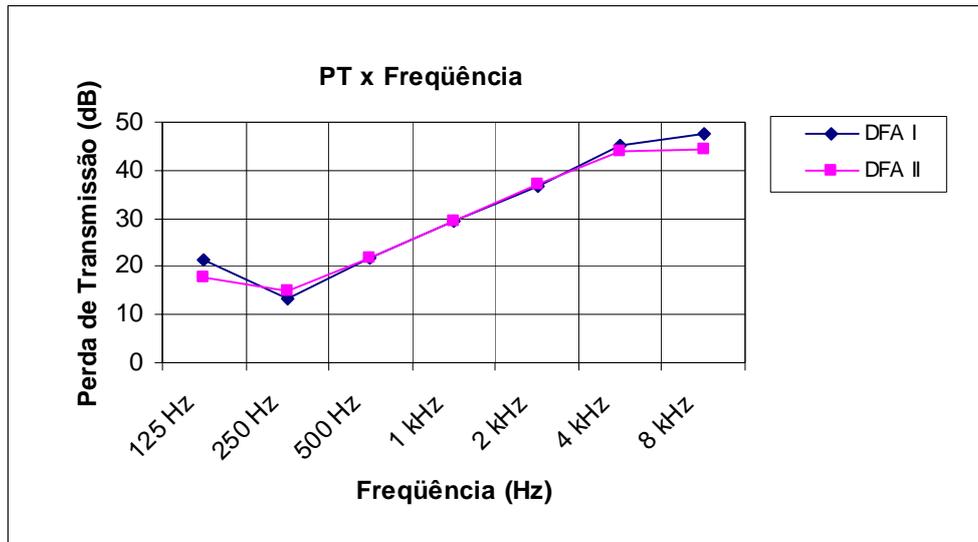


Figura 5.8 – PT gráfica para as divisórias de fibra de aço.

A Fig. 5.8 mostra os resultados obtidos para as duas divisórias de fibra de aço. Observou-se que a divisória mais densa DFA I, obteve a maior PT para todas as faixas de frequências analisadas, com exceção dos resultados correspondentes às faixas de frequência de 250 Hz e 2 kHz. Esta divisória obteve a maior PT de, aproximadamente, 48 dB na faixa de 8 kHz.

As divergências entre os valores encontrados podem ser analisadas, de forma mais completa, através da Fig. 5.9 referente ao Desvio Padrão dos valores obtidos. O Desvio Padrão máximo de 2,5 dB ocorreu na faixa de frequência de 125 Hz.

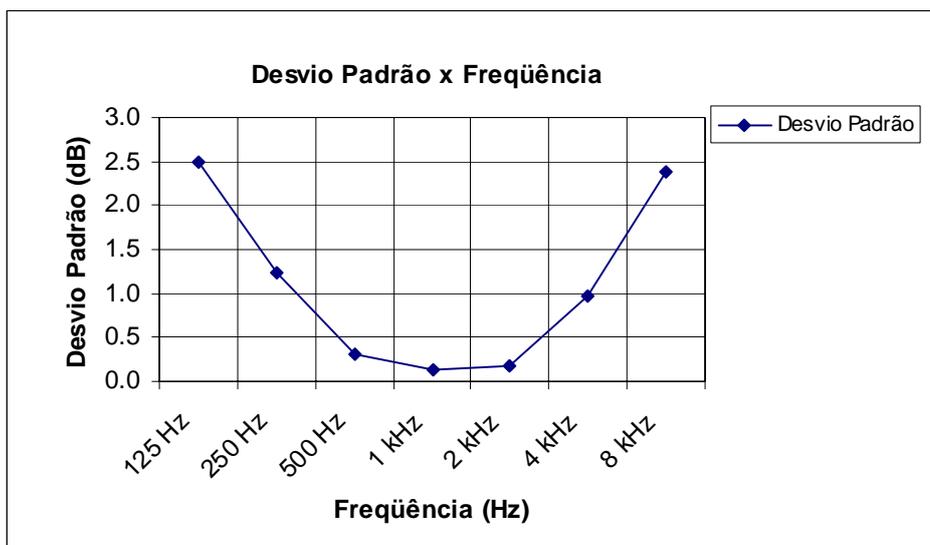


Figura 5.9 – Desvio Padrão das divisórias de fibra de aço.

c) Divisória de Compensado de 4 mm

Com o intuito de se estabelecer o efeito sobre o valor da PT devido ao uso das fibras regionais estudadas, foi realizado, também, um estudo experimental da PT da divisória de compensado sem amostra (DCSA). Com isto, é possível verificar a contribuição, quanto a PT, ao se inserir as fibras no espaço de ar entre as folhas de compensado de 4 mm. A Tabela 5.11, assim como a Fig. 5.10, mostram os resultados obtidos referentes às PT da divisória de compensado sem amostra.

Tabela 5.11 – Resultado Experimental da PT da divisória de compensado sem amostra.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DCSA	458 kg/m ³	14,95	9,16	11,33	15,99	23,90	35,78	38,41

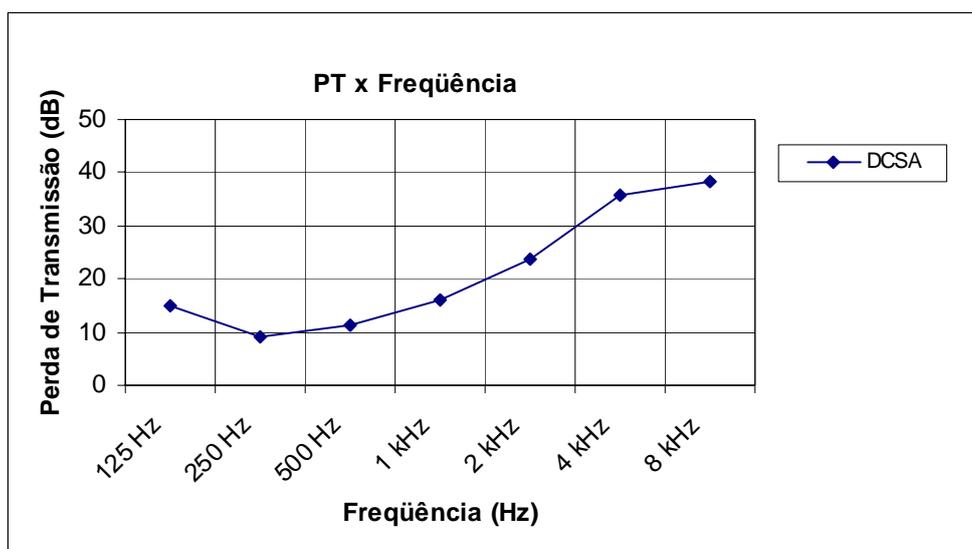


Figura 5.10 – PT gráfica para a divisória de compensado sem amostra.

A divisória DCSA tem a maior PT de, aproximadamente, 38 dB na faixa de 8 kHz.

d) Análise Comparativa de Todos os Resultados Experimentais

Retomando os resultados, através da Tabela 5.12 e da Fig. 5.11, é possível fazer uma análise comparativa das PT obtidas para todas as divisórias ensaiadas experimentalmente.

Tabela 5.12 – Resultados Experimentais da PT de todas as divisórias ensaiadas.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFC I	18 kg/m ³	17,89	11,56	13,73	22,16	32,79	41,73	39,29
DFC II	60 kg/m ³	17,45	10,50	15,42	25,38	34,76	42,78	40,51
DFC III	130 kg/m ³	18,04	10,38	15,99	27,08	36,94	43,65	43,19
DFC IV	18 kg/m ³	13,79	14,36	19,35	27,61	35,05	39,63	39,33
DFC V	60 kg/m ³	16,87	13,22	19,76	29,53	35,85	41,58	42,46
DFC VI	130 kg/m ³	17,31	14,69	22,06	31,16	36,33	42,71	44,01
DFA I	119 kg/m ³	21,44	13,36	21,64	29,26	36,86	45,15	47,56
DFA II	65 kg/m ³	17,91	15,09	21,58	29,25	37,12	43,78	44,19
DCSA	458 kg/m ³	14,95	9,16	11,33	15,99	23,90	35,78	38,41

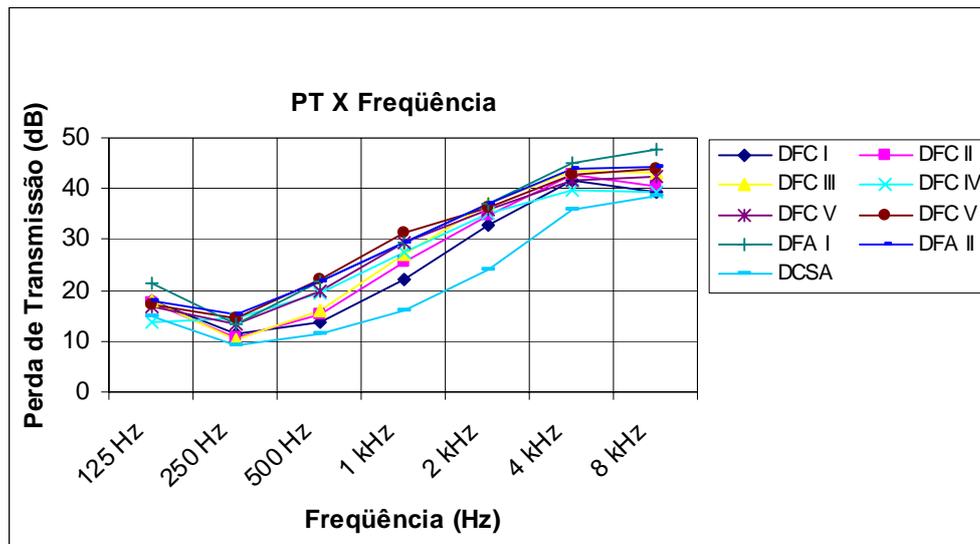


Figura 5.11 – Comparação da PT de todas as divisórias ensaiadas.

Analisando os valores de todas as divisórias estudadas, pode-se concluir que a divisória de fibra de coco DFC VI obteve a maior PT para as faixas de frequências de 500 Hz e 1 kHz. Já a divisória de fibra de açaí DFA I obteve as maiores PT para as frequências de 125 Hz, 4 e 8 kHz, enquanto que a divisória DFA II obteve a maior PT para as frequências de 250 Hz e 2 kHz.

As divergências entre os valores medidos podem ser analisadas, de forma mais completa, através da Fig. 5.12 referente ao Desvio Padrão dos valores obtidos. O Desvio Padrão máximo de 4,7 dB ocorreu na faixa de frequência de 1 kHz.

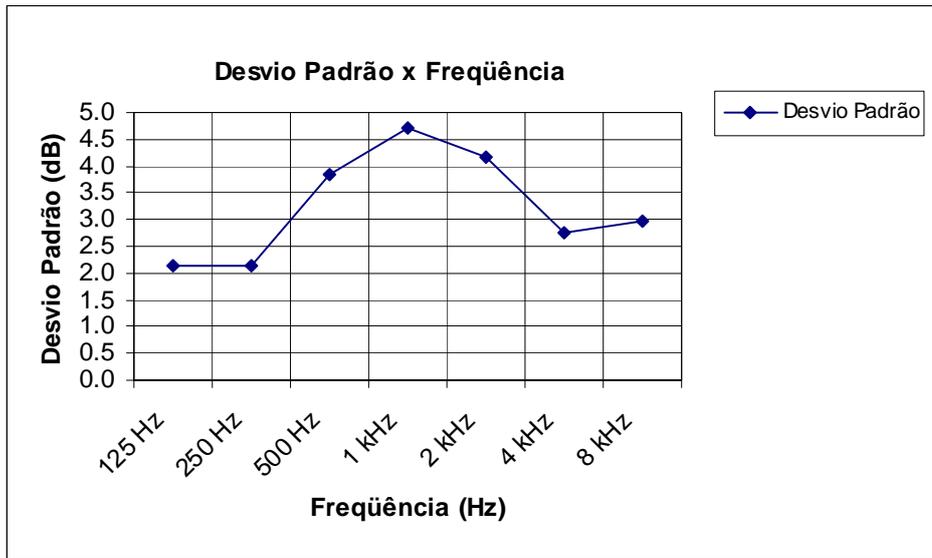


Figura 5.12 – Desvio Padrão de todas as divisórias ensaiadas.

De acordo com os valores adquiridos, ficou demonstrado que os melhores resultados foram estabelecidos para a divisória DFC VI e para a divisória DFA I. Assim, foi realizada uma comparação, ver Fig. 5.13, que analisa estas divisórias com a divisória DCSA. Desta forma é possível ter uma visão, mais clara, da contribuição destas fibras quanto as suas PT.

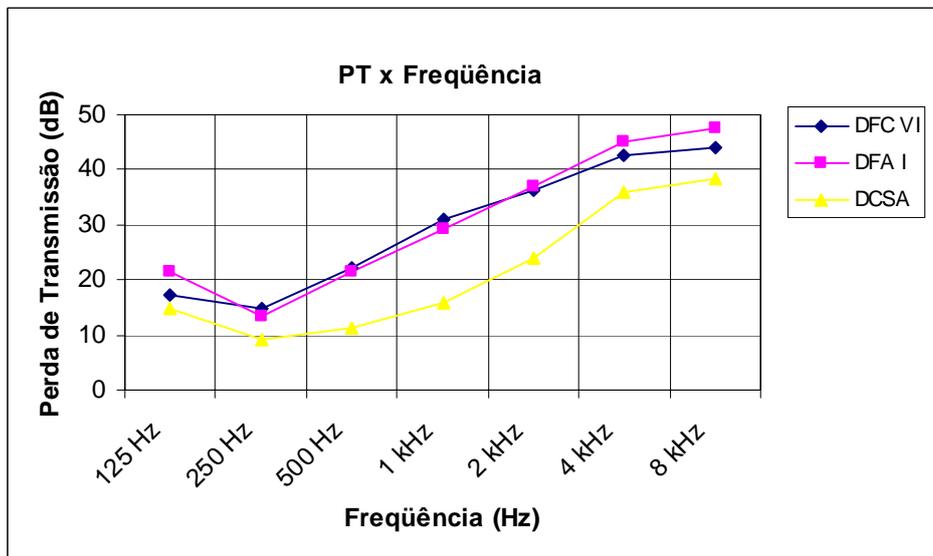


Figura 5.13 – Comparação da PT das divisórias DFC VI, DFA I e DCSA.

O gráfico anterior demonstra que ao se inserir a fibra regional, seja ela de coco ou de açaí, há um aumento significativo na Perda de Transmissão Sonora.

5.7 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Avaliando os resultados experimentais encontrados, estes sugerem que as câmaras reverberantes reduzidas da UFPA – GVA estão qualificadas para a caracterização da perda de transmissão das divisórias regionais ensaiadas. Sendo necessário ressaltar que os resultados, quanto à qualificação das câmaras, foram reprovados para bandas inferiores a 250 Hz e devido às reprovações passou-se a considerar que os valores adquiridos acima desta banda proporcionam uma maior confiabilidade quanto aos valores estimados para a perda de transmissão das divisórias.

Analisando o conjunto das divisórias de fibra de coco, observou-se que a divisória DFC VI obteve a maior Perda de Transmissão, chegando a atingir 9 dB acima dos valores das outras divisórias de fibra de coco. Quanto às divisória de fibra de açaí, observou-se que a maior Perda de Transmissão ficou variando entre as divisórias DFA I e DFA II de acordo com a faixa de frequência, chegando a atingir uma divergência máxima de 3,53 dB entre estes valores.

De forma geral, concluiu-se que os melhores resultados, quanto à Perda de Transmissão sonora, foram estabelecidos para a divisória de fibra de coco DFC VI e para a divisória de fibra de açaí DFA I. Verificou-se que ao se inserir estas fibras entre as folhas de compensado de 4 mm, houve um aumento mínimo de 2,36 dB e um aumento máximo de 15,17 dB na Perda de Transmissão Sonora estabelecendo-se, por fim, que as fibras regionais contribuíram de forma positiva no que se diz respeito à Perda de Transmissão Sonora das divisórias para as faixas de frequências analisadas.

CAPÍTULO VI - CÁLCULOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA ATRAVÉS DA SEA

As atividades analíticas contemplam este capítulo. A primeira parte corresponde à determinação da PT através de cálculos analíticos utilizando as equações da SEA; na segunda parte, adicionalmente à atividade analítica, pode-se encontrar uma comparação dos resultados encontrados analiticamente e experimentalmente.

6.1 DETERMINAÇÃO DA PT ATRAVÉS DE CÁLCULOS ANALÍTICOS UTILIZANDO A SEA

Os cálculos analíticos realizados, através da SEA, se baseiam na formulação para a medição da PT com o auxílio das duas câmaras reverberantes reduzidas. Esta conexão entre a PT e a metodologia SEA considera um sistema composto para três subsistemas, conforme a Figura 6.1, sendo estes: Câmara de Emissão – Subsistema (01); Parede Simples (Divisória) – Subsistema (02); e Câmara de Recepção – Subsistema (03).

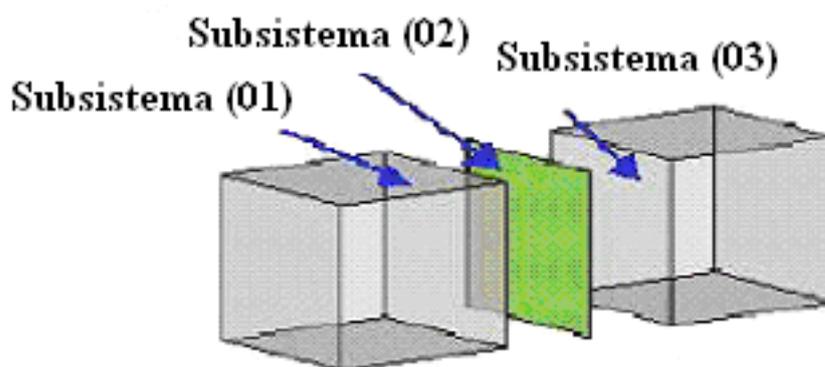


Figura 6.1 – Modelo de SEA composto por três subsistemas.

Fonte: Adaptada de *AUTOSEA USER'S GUIDE* (2002).

6.1.1 Formulação Matemática para Determinação da PT segundo a SEA

A relação existente entre a grandeza PT e as equações da SEA são aqui detalhadas.

Adaptando-se a formulação apresentada por GERGES (2002) à formulação utilizada em SEA, a PT pode ser reescrita por:

$$PT = \langle NPS_1 \rangle - \langle NPS_3 \rangle + 10 \log \left(\frac{S_2}{A_3} \right) \quad (6.1)$$

onde: $\langle NPS_i \rangle$ é o nível de pressão sonora médio no espaço e no tempo; A_3 é a absorção total da câmara de recepção (constante de Sabine); e S_2 é a área superficial da divisória.

A seguir, são apresentados os processos referentes à transformação dos parâmetros apresentados acima em parâmetros de SEA, possibilitando uma metodologia direta de cálculo para a PT.

Representando a absorção total da sala de recepção, subsistema 03, em termos de tempo de reverberação (T_{03}), tem-se:

$$A_3 = \frac{0,161V_3}{T_{03}} \quad (6.2)$$

Assim, substituindo a Eq. (3.46) na Eq. (6.2), a absorção total da câmara de recepção pode ser representada através de parâmetros de SEA por:

$$A_3 = \left[\frac{1}{0,161V_3 \left(\frac{2,2}{f\eta_3} \right)} \right]^{-1} \quad (6.3)$$

onde: V_i é o volume do subsistema i ; η_i é o fator de perda por amortecimento do subsistema i ; e f é a frequência central da banda.

Da definição de Nível de Pressão Sonora (NPS) e da definição da energia de um subsistema acústico, Eq. (3.39), o NPS médio no espaço e no tempo do subsistema i , pode ser representado por:

$$\langle NPS_i \rangle = \left(\frac{E_i \rho c^2}{V_i P_0^2} \right) \quad (6.4)$$

onde: E é a energia contida no subsistema i ; ρ é a densidade volumétrica do fluido contido no subsistema acústico; c é a velocidade do som contida no subsistema acústico; V_i é o volume do subsistema i ; P_0 é a pressão sonora de referência (limiar inferior da audição humana: $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$).

Retomando a Eq. (6.1), e substituindo as Eq. (6.3) e (6.4), tem-se:

$$PT = 10 \log \left(\frac{E_1 \rho c^2}{V_1 P_0^2} \right) - 10 \log \left(\frac{E_3 \rho c^2}{V_3 P_0^2} \right) + 10 \log \left(\frac{S_2}{0,161 V_3} \left(\frac{2,2}{f \eta_3} \right) \right) \quad (6.5)$$

Algebrizando os dois primeiros termos da Eq. (6.5) encontra-se a grandeza denominada Redução Sonora (RS), apresentada por Crocker & Price (1970). Sendo o sistema composto pelo mesmo fluido, em ambos os lados do painel, tem-se:

$$RS = 10 \log \left(\frac{E_1}{E_3} \right) - 10 \log \left(\frac{V_1}{V_3} \right) \quad (6.6)$$

Portanto, a Eq. (6.5) se reduz a:

$$PT = RS + 10 \log \left(\frac{S_2}{0,161V_3} \left(\frac{2,2}{f\eta_3} \right) \right) \quad (6.7)$$

Para o cálculo final da PT a Eq. (6.7) ainda pode ser descrita através da Eq. (6.8), apresentada por Crocker & Price (1969).

$$PT = NPS_1 - NPS_3 + 10 \log \left(\frac{S_2}{0,161V_3} \left(\frac{2,2}{f\eta_3} \right) \right) \quad (6.8)$$

onde: NPS_i são os níveis de pressão sonora das câmaras reverberantes medidos experimentalmente; S_2 é a área da divisória ($0,369 \text{ m}^2$); V_3 é o volume da câmara receptora ($0,295 \text{ m}^3$); f é a frequência em Hz; e η_3 é o fator de perda por amortecimento da câmara receptora.

Desta forma, a Eq. (6.8) foi utilizada para se determinar, analiticamente, a perda de transmissão sonora através do *software* MATLAB (cuja rotina de cálculos realizados encontra-se em anexo). No entanto, os valores de alguns parâmetros foram determinados experimentalmente, como no caso dos níveis de pressão sonora (NPS_i) e do fator de perda por amortecimento (η_i).

O fator de perda por amortecimento, em geral, não possui formulações analíticas para a sua determinação e visto que esse pode variar muito com o tipo de material e geometria da estrutura analisada, recomenda-se assim uma avaliação experimental do mesmo. Atualmente, três procedimentos experimentais têm sido utilizados para a sua determinação: Método da Potência de Entrada, Método do Decaimento e Método da Banda de Meia Potência. Neste trabalho, adotou-se o Método do Decaimento (ou Tempo de Reverberação T_{60}), segundo a Eq. (3.46), tendo em vista a sua simplicidade de execução e pelo fato do tempo de reverberação já ter sido medido durante a qualificação das câmaras.

6.1.2 Resultados Obtidos Analiticamente da Perda de Transmissão das Divisórias

Este item expõe os resultados encontrados através de cálculos analíticos, utilizando as equações da SEA, referentes às PT das divisórias estudadas. Assim como nos ensaios experimentais, os resultados analíticos foram divididos em três grupos de medições, análogo aos grupos descritos no capítulo anterior.

a) Divisória de Fibra de Coco (DFC)

As divisórias de fibra de coco somam um total de 6 divisórias, aqui classificadas, simbolicamente, como: DFC I; DFC II; DFC III; DFC IV; DFC V e DFC VI. As três primeiras correspondem às divisórias de 50 mm de espessura, enquanto que as três últimas correspondem às de 100 mm de espessura, com as suas respectivas densidades de 18 kg/m³, 60 kg/m³ e 130 kg/m³.

A Tabela 6.1, assim como as Fig. 6.2, Fig. 6.3 e Fig. 6.4, mostram os resultados dos cálculos obtidos referentes às PT das divisórias de fibra de coco ensaiadas.

Tabela 6.1 – Resultados Analíticos da PT das divisórias de fibra de coco.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFC I	18 kg/m ³	17,93	11,53	13,73	22,11	32,86	41,74	39,30
DFC II	60 kg/m ³	17,41	10,63	15,40	25,35	34,82	42,77	40,54
DFC III	130 kg/m ³	18,07	10,35	15,97	27,02	36,97	43,64	43,19
DFC IV	18 kg/m ³	13,82	14,34	19,37	27,62	35,11	39,63	39,34
DFC V	60 kg/m ³	16,90	13,22	19,74	29,53	35,91	41,59	42,46
DFC VI	130 kg/m ³	17,34	14,66	22,12	31,14	36,37	42,71	44,01

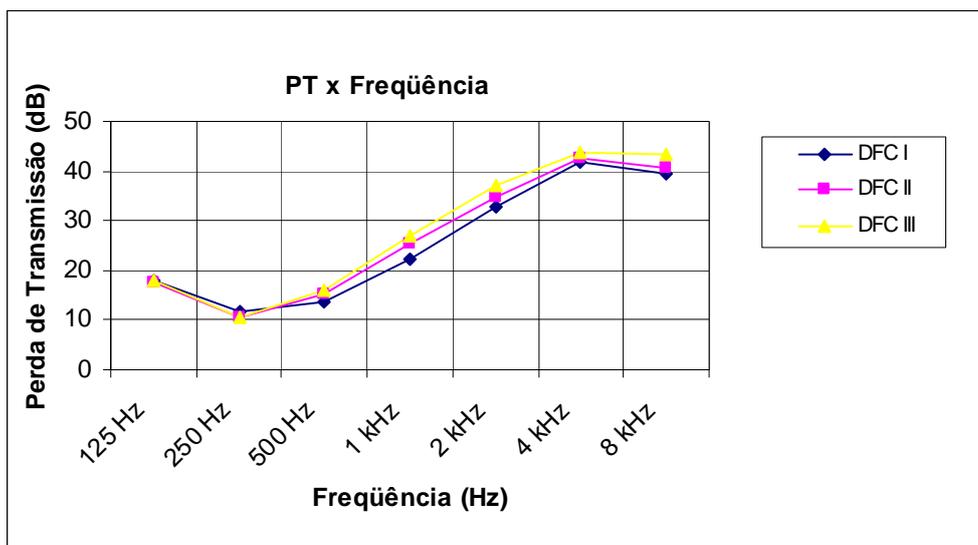


Figura 6.2 – PT Analítica das divisórias de fibra de coco de 50 mm.

A divisória DFC III, a mais densa entre as divisórias de 50 mm, obteve a maior PT para todas as faixas de frequências, com exceção do resultado na faixa de 250 Hz. Houve uma maior divergência nos valores calculados na faixa de frequência de 1 kHz, alcançando uma máxima divergência de 4,91 dB entre as divisórias DFC I e DFC III.

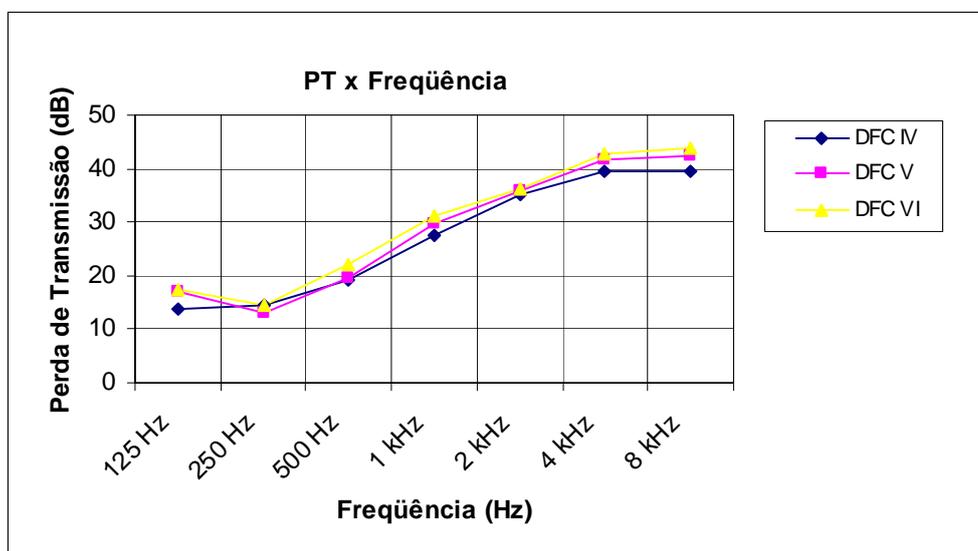


Figura 6.3 – PT Analítica das divisórias de fibra de coco de 100 mm.

A divisória DFC VI, a mais densa entre as divisórias de 100 mm, obteve a maior PT para todas as faixas de frequências analisadas. Houve uma maior divergência nos valores medidos na faixa de frequência de 8 kHz, alcançando uma máxima divergência de, aproximadamente, 4,67 dB entre as divisórias DFC IV e DFC VI.

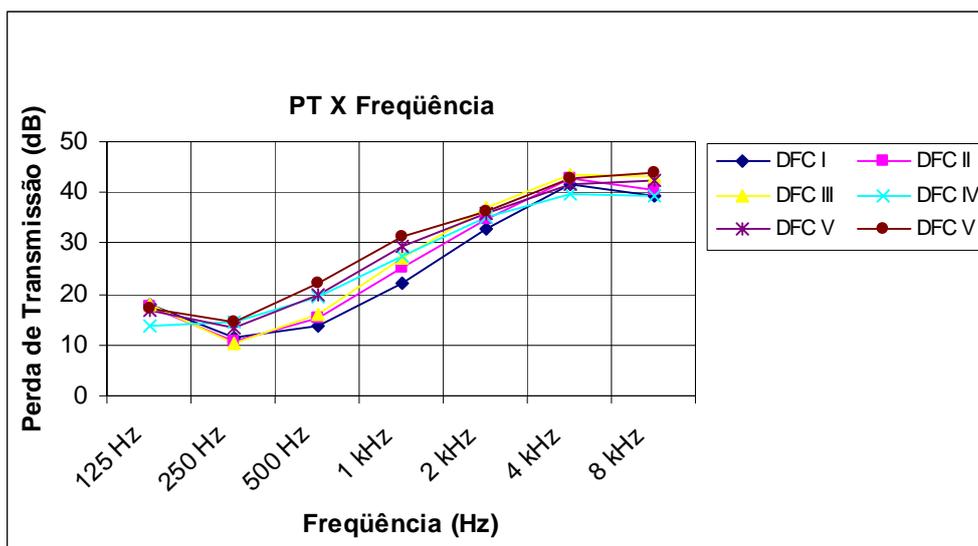


Figura 6.4 – PT Analítica de todas as divisórias de fibra de coco.

Analisando o conjunto de todas as divisórias de fibra de coco, observou-se que, assim como nos resultados experimentais, a divisória mais densa e de maior espessura, DFC VI, obteve a maior PT para todas as faixas de frequências analisadas, com exceção dos resultados nas faixas de 125 Hz, 2 e 4 kHz. No entanto, os valores obtidos para a divisória DFC VI nestas faixas foram bem próximos aos maiores valores, correspondentes às divisórias DFC III.

As divergências entre os valores encontrados podem ser analisadas, de forma mais completa, através da Fig. 6.5 referente ao Desvio Padrão dos valores obtidos. O Desvio Padrão máximo de 3,2 dB ocorreu nas faixas de frequências de 500 Hz e 1 kHz.

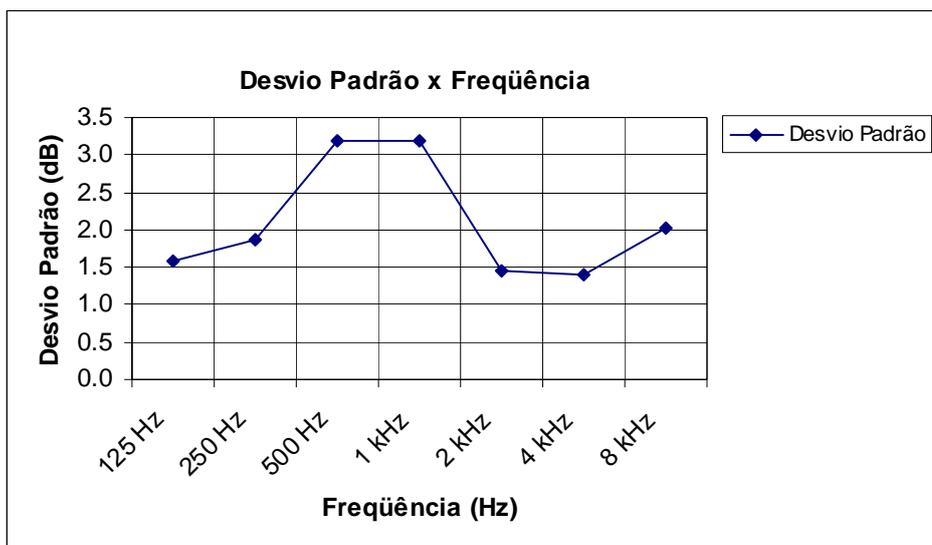


Figura 6.5 – Desvio Padrão Analítico das divisórias de fibra de coco.

b) Divisória de Fibra de Açaí (DFA)

As divisórias de fibra de açaí somam um total de duas divisórias, aqui classificadas, simbolicamente, como: DFA I; DFA II, correspondentes às divisórias de 50 mm de espessura com densidade de 119 kg/m³ e 100 mm de espessura com densidade de 65 kg/m³, respectivamente.

A Tabela 6.2, assim como a Fig. 6.6, mostra os resultados obtidos, analiticamente, referentes às PT das divisórias de fibra de açaí ensaiadas.

Tabela 6.2 – Resultados Analíticos da PT das divisórias de fibra de açaí.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFA I	119 kg/m ³	21,43	13,36	21,66	29,23	36,80	45,10	47,54
DFA II	65 kg/m ³	17,92	15,02	21,55	29,22	37,19	43,75	44,19

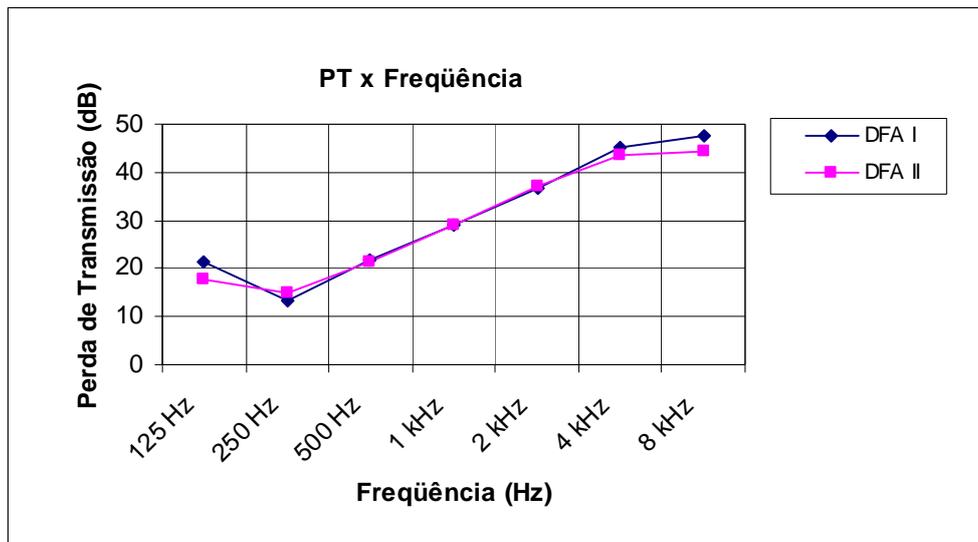


Figura 6.6 – PT Analítica para as divisórias de fibra de aço.

Os resultados analíticos obtidos para a fibra de aço retratam que a divisória mais densa DFA I, obteve a maior PT para todas as faixas de frequências analisadas, com exceção dos resultados correspondentes às faixas de frequência de 250 Hz e 2 kHz. Esta divisória obteve a maior PT de 47,54 dB na faixa de 8 kHz.

As divergências entre os valores podem ser analisadas através da Fig. 6.7, referente ao Desvio Padrão dos valores obtidos. O Desvio Padrão máximo de 2,5 dB ocorreu na faixa de frequência de 125 Hz.



Figura 6.7 – Desvio Padrão das divisórias de fibra de aço.

c) Divisória de Compensado de 4 mm

Também foi verificada a PT, analítica, da divisória de compensado sem amostra (DCSA). A Tabela 6.3, assim como a Fig. 6.8, mostra os resultados obtidos referentes à PT da divisória de compensado sem amostra.

Tabela 6.3 – Resultado Analítico da PT da divisória de compensado sem amostra.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DCSA	458 kg/m ³	14,95	9,18	11,37	15,99	23,93	35,85	38,47

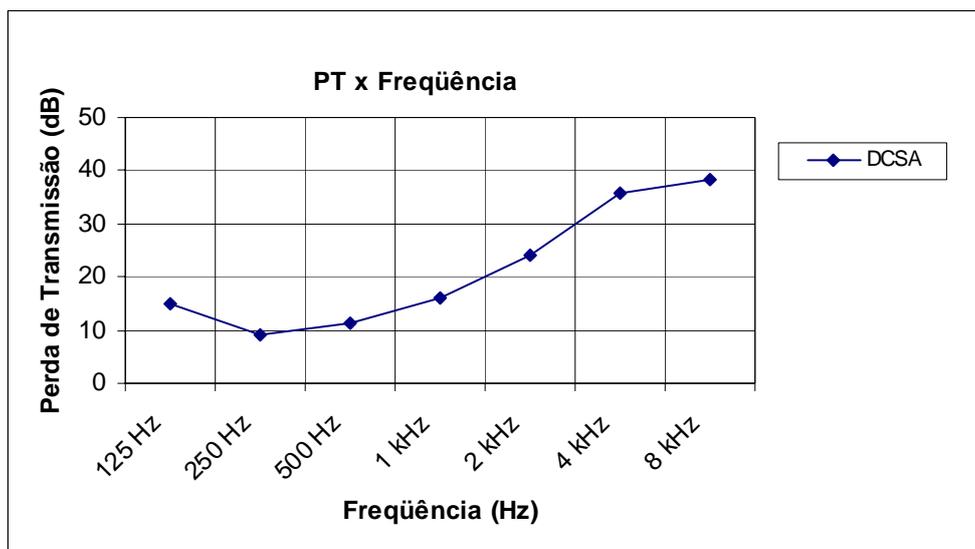


Figura 6.8 – PT Analítica para a divisória de compensado sem amostra.

d) Análise Comparativa de Todos os Resultados Analíticos

A Tabela 6.4 e a Fig. 6.9 fazem uma análise comparativa das Perdas de Transmissão obtidas para todas as divisórias ensaiadas analiticamente.

Tabela 6.4 – Resultados Analíticos da PT de todas as divisórias.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFC I	18 kg/m ³	17,93	11,53	13,73	22,11	32,86	41,74	39,30
DFC II	60 kg/m ³	17,41	10,63	15,40	25,35	34,82	42,77	40,54
DFC III	130 kg/m ³	18,07	10,35	15,97	27,02	36,97	43,64	43,19
DFC IV	18 kg/m ³	13,82	14,34	19,37	27,62	35,11	39,63	39,34
DFC V	60 kg/m ³	16,90	13,22	19,74	29,53	35,91	41,59	42,46
DFC VI	130 kg/m ³	17,34	14,66	22,12	31,14	36,37	42,71	44,01
DFA I	119 kg/m ³	21,43	13,36	21,66	29,23	36,80	45,10	47,54
DFA II	65 kg/m ³	17,92	15,02	21,55	29,22	37,19	43,75	44,19
DCSA	458 kg/m ³	14,95	9,18	11,37	15,99	23,93	35,85	38,47

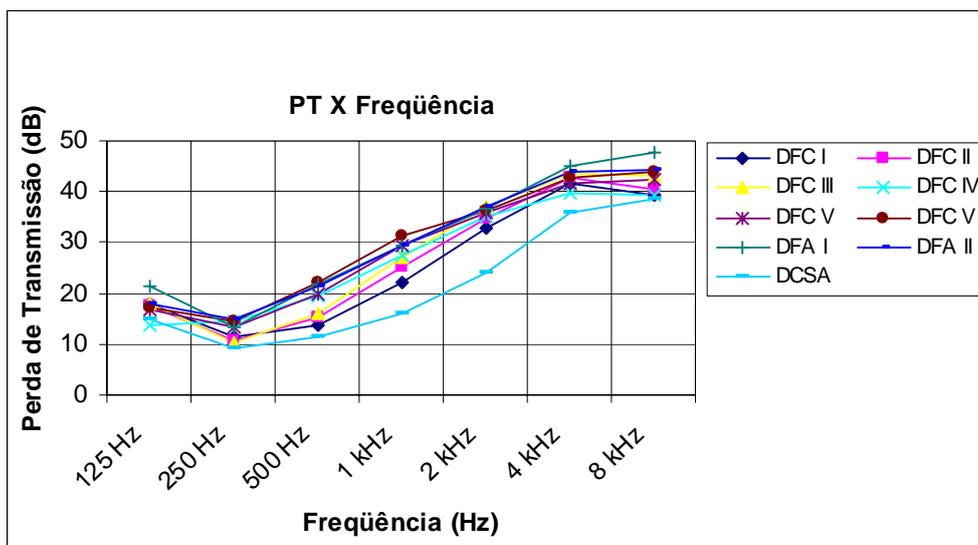


Figura 6.9 – Comparação da PT Analítica de todas as divisórias.

Analisando os valores analíticos, pode-se concluir que a divisória DFC VI obteve as maiores PT para as frequências de 500 Hz e 1 kHz; já a divisória DFA I obteve para as frequências de 125 Hz, 4 e 8 kHz; enquanto a divisória DFA II obteve para as frequência de 250 Hz e 2 kHz. O Desvio Padrão máximo de 4,7 dB ocorreu na frequência de 1 kHz.

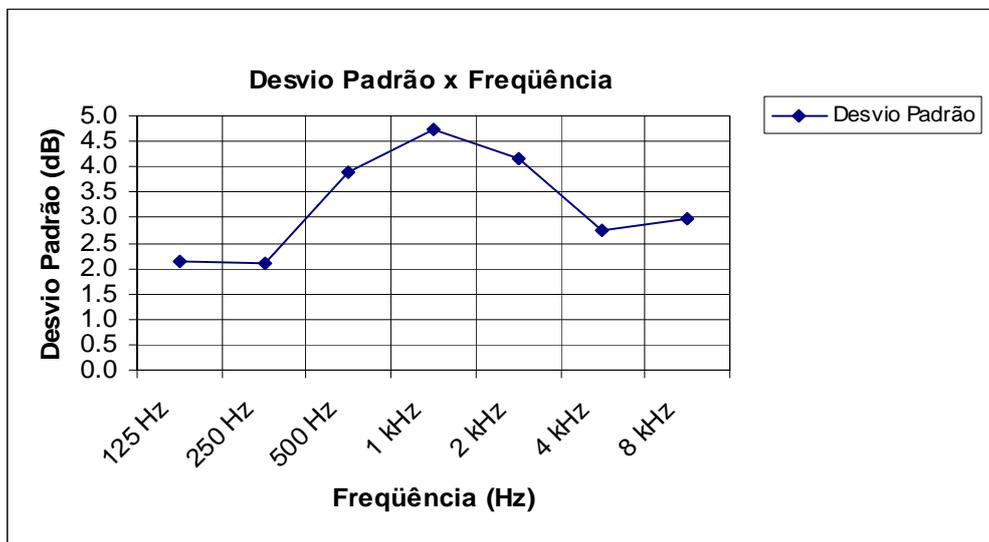


Figura 6.10 – Desvio Padrão Analítico de todas as divisórias.

De acordo com os valores adquiridos, ficou demonstrado que os melhores resultados analíticos foram estabelecidos para a divisória de fibra de coco DFC VI e para a divisória de fibra de açaí DFA I. Desta forma, foi realizada uma comparação, conforme a Fig. 6.11, que analisa estas divisórias com a divisória DCSA verificando assim a contribuição destas fibras quanto as suas características de PT.

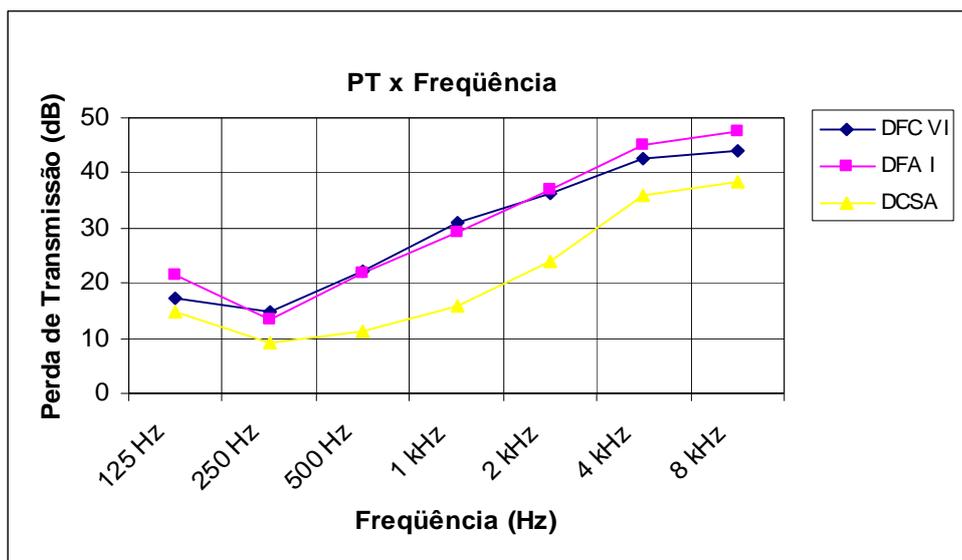


Figura 6.11 – Comparação da PT Analítica das divisórias DFC VI, DFA I e DCSA.

Analisando os resultados analíticos de todas as divisórias, observou-se que estes valores foram bem aproximados aos valores encontrados experimentalmente. Havendo casos em que os resultados foram iguais para os dois estudos realizados.

6.2 – ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS ANALÍTICOS

Após a compilação e análise dos resultados experimentais e analíticos foram realizadas comparações entre estes, referentes às divisórias com os melhores resultados adquiridos.

Diante disto, tanto de forma experimental quanto analítica, foi possível confirmar que as divisórias DFC VI e DFA I possuem os melhores valores referentes à PT. Sendo assim, fez-se um estudo comparativo dos resultados encontrados para estas duas amostras conforme o exposto nas tabelas e figuras a seguir.

A Tabela 6.5 e a Fig. 6.12 fazem uma comparação entre os resultados da divisória de fibra de coco DFC VI.

Tabela 6.5 – Comparação dos resultados experimental e analítico da divisória DFC VI.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFC VI Experimental	130 kg/m ³	17,31	14,69	22,06	31,16	36,33	42,71	44,01
DFC VI Analítica	130 kg/m ³	17,34	14,66	22,12	31,14	36,37	42,71	44,01

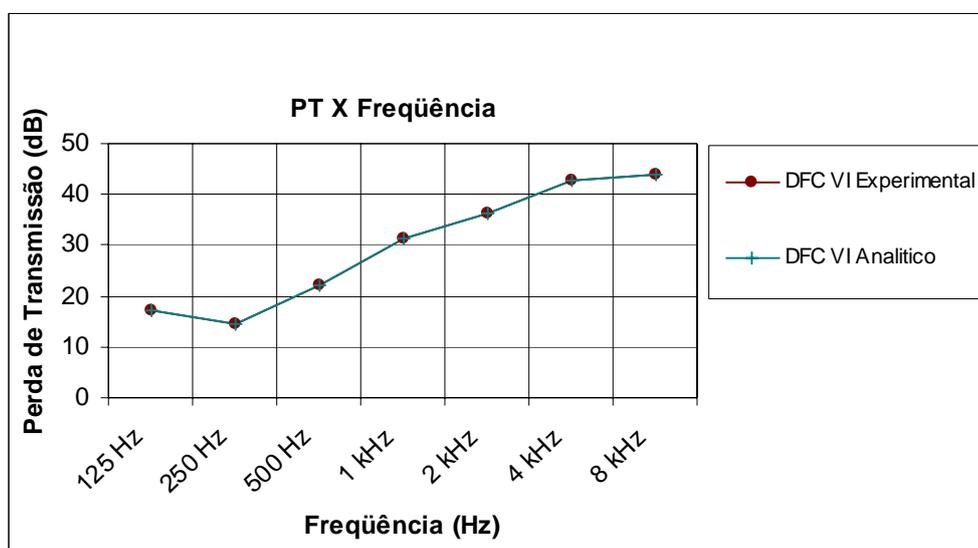


Figura 6.12 – Comparação dos resultados da divisória DFC VI.

Os valores apresentaram uma excelente concordância entre as duas curvas para a divisória DFC VI, havendo uma pequena diferença nos valores a partir da segunda casa decimal. Houve casos em que os dois valores foram idênticos, como nas faixas de

freqüência de 4 e 8 kHz onde o Desvio Padrão encontrado foi nulo, como visto na Fig. 6.13.

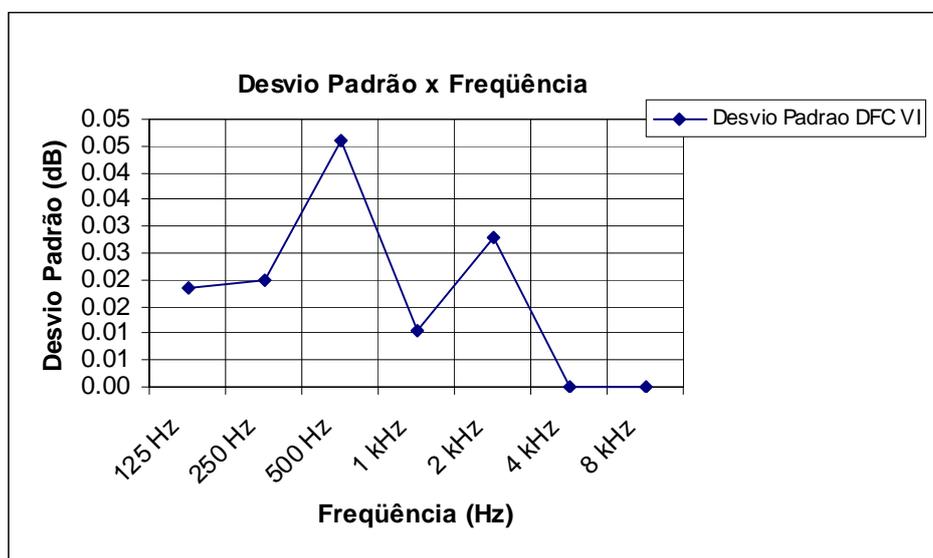


Figura 6.13 – Desvio Padrão da divisória DFC VI.

A Tabela 6.6 e a Fig. 6.14 fazem uma comparação entre os resultados da divisória de fibra de açaí DFA I.

Tabela 6.6 – Comparação dos resultados experimental e analítico da divisória DFA I.

DIVISÓRIA	DENSIDADE	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA (dB)						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
DFA I Experimental	119 kg/m ³	21,44	13,36	21,14	29,06	36,86	45,15	47,56
DFA I Analítico	119 kg/m ³	21,43	13,36	21,16	29,03	36,80	45,10	47,54

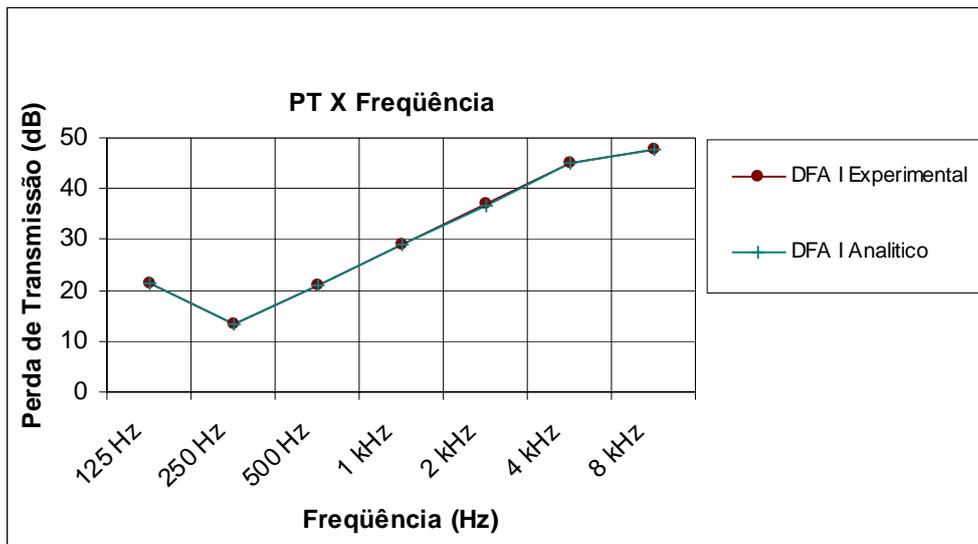


Figura 6.14 – Comparação dos resultados da divisória DFA I.

Os valores experimentais e analíticos da divisória DFA I, também apresentaram uma excelente concordância entre as duas curvas, também havendo casos em que os dois valores foram idênticos, como na faixa de frequência de 250 Hz onde o Desvio Padrão encontrado foi nulo, conforme a Fig. 6.15.

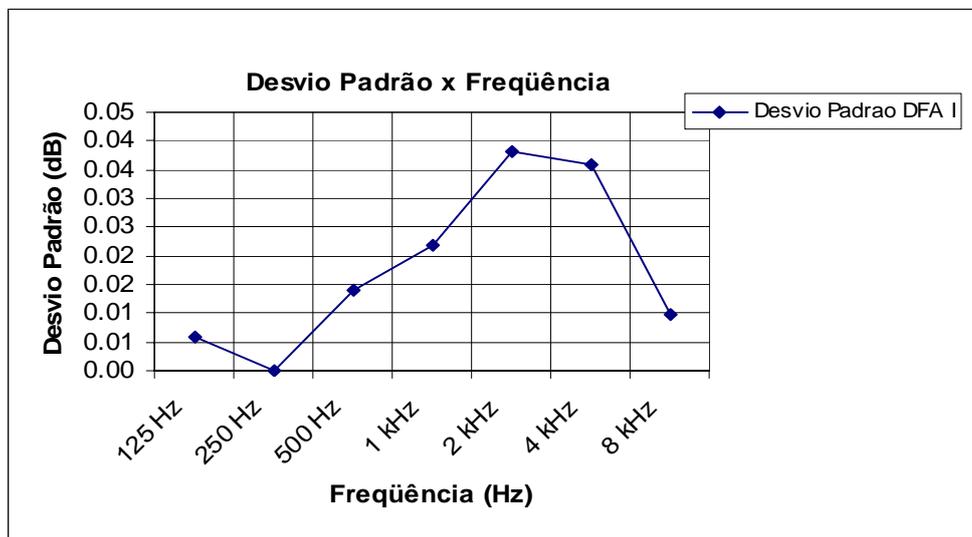


Figura 6.15 – Desvio Padrão da divisória DFA I.

6.3 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Através das respostas analíticas, observou-se que a divisória DFC VI obteve a maior PT, chegando a atingir 9,03 dB acima dos valores das outras divisórias de fibra de coco. Quanto às divisórias de fibra de açaí, observou-se que a maior PT ficou variando entre as divisórias DFA I e DFA II de acordo com a faixa de frequência.

De forma geral, concluiu-se que os melhores resultados, quanto à PT sonora analítica, também foram estabelecidos para a divisória DFC VI e para a divisória DFA I. Verificou-se que ao se inserir estas fibras entre as folhas de compensado de 4 mm, houve um aumento mínimo de 2,39 dB e um aumento máximo de 15,15 dB na Perda de Transmissão Sonora.

Ao compararem-se os estudos experimentais e analíticos, observou-se que há pouca variação de resultados e que estes valores são bem aproximados estabelecendo-se, assim, de forma experimental e analítica que as fibras regionais contribuíram de forma positiva no que se diz respeito à PT das divisórias para as faixas de frequências analisadas.

CAPÍTULO VII – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

7.1 – CONCLUSÕES FINAIS

Quando se trabalha com modelos, existem dois processos físicos semelhantes que são o protótipo e o próprio modelo (que, normalmente, são menores e até podem ser maiores que os protótipos). Neste trabalho, utilizou-se um modelo em escala reduzida, exatamente 1:6, por diversos fatores como a viabilidade financeira para a sua construção, a possibilidade da modificação da sua estrutura em caso de necessidade e por ser mais fácil de ensaiá-lo em laboratório.

Ao se trabalhar com um modelo em escala reduzida é preciso fazer um estudo da análise dimensional e das condições de semelhança que devem ser obedecidas nos ensaios laboratoriais com este modelo reduzido. A semelhança geométrica é uma condição muito importante para a semelhança entre os processos físicos, mas não é uma condição suficiente; é preciso que haja uma relação pela escala geométrica entre as dimensões destes processos físicos, além da relação entre as magnitudes da grandeza no modelo e no protótipo (é o chamado fator de escala).

Além dos fatores dimensionais, os resultados das medições nas câmaras reverberantes reduzidas são afetados pelo grau de difusão do campo sonoro nas câmaras, acoplamentos entre os subsistemas e até por erros nas medidas dos parâmetros acústicos.

A falta de habitualidade de um estudo preliminar das propriedades acústicas dos materiais usados em projetos de edificações e/ou ainda pela não caracterização das propriedades acústicas destes materiais faz com que o desempenho acústico das edificações torne-se deficiente e, em consequência pela busca da solução desta deficiência, aumente o custo financeiro das construções.

A solução para a resolução destes problemas, quando se utiliza materiais que já possuem as suas propriedades acústicas caracterizadas, é fazer um estudo e identificar, ainda em fase de projeto, uma escolha capaz de minorar os problemas decorrentes de ruído, de forma rápida, confiável e econômica. Já, quando se utilizam materiais em que não se conhecem as propriedades acústicas a solução mais usual, e que na maioria aumenta o custo da construção, é arriscar e esperar que o material tenha uma boa resposta acústica ou fazer ensaios laboratoriais para se conhecer suas propriedades.

Desta forma, a construção das câmaras reduzidas atende a necessidade de conhecimento das propriedades acústicas, nesse caso a PT de materiais normalmente usados na construção civil, de novos materiais e de materiais regionais.

Com isso, o objetivo desta dissertação foi a construção de duas mini-câmaras reverberantes que permita realizar estudos da PT de divisórias desenvolvidas com material regional, estabelecendo comparação entre os seus desempenhos, e ao mesmo tempo permitir a sua utilização em aulas práticas de acústica. O estudo aqui apresentado referiu-se à PT das fibras regionais de coco e açaí.

Antes de terem sido realizados os ensaios experimentais, as câmaras reduzidas foram qualificadas. Quanto ao primeiro parâmetro de qualificação analisado, a área de absorção sonora equivalente, verificou-se uma reprovação na faixa de 250 Hz; quanto ao segundo parâmetro de qualificação analisado, a difusividade do campo sonoro, verificaram-se reprovações na faixa de 125 Hz para a câmara emissora e nas faixas de 125 e 250 Hz para a câmara receptora. A câmara emissora apresentou uma boa difusividade em seu campo sonoro, proporcionando um campo difuso incidente eficaz sobre a divisória.

Assim, devido às reprovações terem ocorrido nas faixas de frequência abaixo de 250 Hz, passou-se a considerar que os valores adquiridos acima desta banda proporcionam uma maior confiabilidade quanto aos valores estimados para a PT das divisórias.

Os valores obtidos para a PT das divisórias, quer sejam eles experimentais ou analíticos, demonstram que as fibras trouxeram vantagens, pois ao inseri-las entre as folhas

de compensado 4 mm houve um aumento mínimo de 2,36 dB e um aumento máximo de 15,17 dB na PT. Houve uma boa concordância entre os resultados preditos analiticamente, através das equações da SEA, e os valores obtidos dos ensaios experimentais, oferecendo uma boa estimativa para a PT.

Portanto, espera-se que os estudos dos desempenhos acústicos dos materiais usados nas edificações possam, o mais rápido possível, estar ao alcance dos profissionais da área e, assim, contribuir para a melhoria na qualidade de vida das pessoas.

7.2 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se como forma de melhorias para trabalhos futuros:

Realizar projetos de modelos com diferentes configurações para a avaliação do desempenho acústico destas câmaras de acordo com os seus *designs*.

Ensaiai materiais que tenham sido estudados em câmaras reverberantes reais para a realização de um estudo do comportamento acústico das câmaras reverberantes em escala real e reduzida.

Alteração das superfícies internas das câmaras, revestindo-as com diversos materiais de tal forma que torne o revestimento interno mais reflexivo para diminuir a absorção.

Realizar ensaios para a determinação de alguns parâmetros que permitam identificar as frequências da coincidência, de ressonância e crítica e, assim, determinar as suas influências nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT), *Divisórias Leves Internas Moduladas – Determinação da Isolação Sonora*, NBR 3258, Rio de Janeiro, 1990.

ARAÚJO, M. A. N., *Investigation on the parameters involved in measuring sound absorption in reverberant chambers: critical review of the standard*, D.Sc. Thesis, Federal University of Rio de Janeiro. COPPE, 2002.

ARAÚJO, M. A. N., *Influência das dimensões e geometria de amostras planas no coeficiente de absorção sonora medido em câmaras reverberantes*, II Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações. SIBRAMA, 2002.

AUTOSEA 2, *Advanced Technology for Noise & Vibration Design – User’s Guide*, Vibro-Acoustic Sciences, San Diego – CA 92130, 1999.

AUTOSEA 2, *Calculating transmission Loss in AutoSEA2*, Application Note # 25, 2001.

AUTOSEA 2, *SEA substructuring of sound-radiating panels*, Application Note # 5, 2001.

BARRON, M., COLEMAN, S., *Measurements of the absorption by auditorium seating – A Model Study*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 239, N° 4, pp.573-587, 2000.

BBC (British Broadcasting Corporation), *Acoustic Scaling: General Outline*, Research Department Report, N° 13, 1970.

BBC (British Broadcasting Corporation), *Acoustic Modelling: Approximations to the Real World*, Research Department Report, 2001.

BRUEL & KJAER, *Measurements in Building Acoustic*, Naerum - Denmark, Janeiro, 1988.

CAIXETA, G. P., *Tópicos em MATLAB* – Apostila da Universidade São Francisco (UFS), 1997.

CAPES, Portal de Periódicos. Contém informações sobre publicações científicas mundiais em jornais e revistas. Disponível em: www.periodicos.capes.gov.br. Acesso em: 20 mar. 2005.

CARNEAL, J. P., FULLER, C. R., *An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 272, pp 749–771, 2004.

CARNEIRO, F. L., *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*, 2ª edição, 1996.

CRAIK, R. J. M., *The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings*, Applied Acoustics 62, pp 29-46, 2001.

CRAIK, R. J. M., *Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis*, Applied Acoustics 64, pp 325–341, 2001.

CRAIK, R. J. M., *The prediction of sound transmission through buildings using statistical energy analysis*, Journal of sound and Vibration, Vol. 82, Nº 4, pp 505-516, June 1982.

CRAIK, R. J. M., SMITH, R. S., *Sound transmission through double leaf lightweight partitions part I: airborne sound energy analysis*, Applied Acoustics 61, pp 223–245, 2000.

CRAIK, R. J. M., SMITH, R. S., *Sound transmission through double leaf lightweight partitions part II: structure-borne sound*, Applied Acoustics 61, pp 247–269, 2000.

- CROCKER, M. J., PRICE, A. J., *Sound transmission using statistical energy analysis*, Department of Building Science, University of Liverpool, England, *Journal of sound and Vibration*, Vol. 9, Nº 3, pp 469-486, 1969.
- GERGES, S. N. Y., *Ruído - Fundamentos e Controle*, Editora NR, 2ª edição, Florianópolis – SC – Brasil, 2000.
- GOMES, M. H. A., *Determination of the Acoustical Random-Incidence Scattering Coefficient*, D. Sc. Thesis, Federal University of Santa Catarina, 2002.
- GOMES, C. H., *Caracterização do Isolamento Acústico de Painéis Metálicos, Utilizando Analise Estatística Energética (SEA)*, Dissertação de Mestrado, Florianópolis – UFSC, 2005.
- HAAN, H. K., KWON, K.W., *A method of evaluating surface diffusivity of rooms — I: computer modeling and field measurement*, *Applied Acoustics* 62, 1313–1327, 2001.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 140 -, *Acoustics – Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms*, 1997.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 354 -, *Acoustics – Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms*, 1999.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 3741 -, *Acoustics – Determination of Sound power levels of noise sources using sound pressure-precision method for reverberation rooms*, 1999.
- ISBERT, A. C., *Diseno Acustico de Espacios Arquitectonicos*, Alfaomega Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona – Espana, pp 56 – 66 (2001).
- ISOMAQ, *Isoladores de Vibração. Contém informações técnicas sobre amortecedores de vibração em molas e borracha para equipamentos*. Disponível em: www.isomaq.com.br. Acesso em: 02 dez. 2005.

- KANG, H. J., IH, J. G., KIM, H. S., KIM, J.S., *An experimental investigation on the directional distribution of incident energy for the prediction of sound transmission loss*, Applied Acoustics 63, pp 283–294, 2002.
- KHILMAN, T., NILSSON, A. C., *The Effects of Some Laboratory Designs and Mounting Conditions on Reduction Index Measurements*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 24, N° 3, pp 349-364, 1972.
- LARANJA, R. A. C., TAMAGMA, A., *Transmissão Sonora Através de Paredes Simples*, Porto Alegre: UFRGS – EE – DEMEC – Gmap, 2002.
- LI, X., HANSEN, C. H., *Comparison of Models for Predicting the Transmission Loss of Plenum Chambers*, Applied Acoustics 66, pp 810–828, 2005.
- LONDON, A., *Transmission of Reverberant Sound through Double Walls*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 22, N° 2, March, 1950.
- LOPEZ, M. R, *Acustica Arquitectonica – Soluciones Practicas*, Editorial Paraninfo S. A, 1992.
- MAFRA, M. P. A., *Desenvolvimento de Infra-Estrutura para Caracterização e Análise de Painéis Acústicos*, UFPA, 2004.
- NASCIMENTO, R. L. X, ZINDELUK M., *Scaled Absorption Materials for Scale Modeling*, The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2005.
- NUNES, A., *Análise Modal Teórica e Experimental de cavidades com absorção sonora*, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 115p. Dissertação (Mestrado), 2001.
- PAIXAO, D. X., *Caracterização do Isolamento Acústico de uma Parede de Alvenaria, Utilizando Análise Estatística Energética (SEA)*, Tese de Doutorado, Florianópolis – UFSC, 2002.

- PAIXÃO, D. X., GERGES, S. N. Y., *Predição de transmissão em edificações usando Análise Estatística de Energia (SEA)*, IN: XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Anais Belo Horizonte, pp177-182, 2000.
- PAPADOPOULOS, C. I., *Development of an Optimised, Standard-Compliant Procedure to Calculate Sound Transmission Loss: Design of Transmission Rooms*, Applied Acoustic 63, pp 1003-1029, 2002.
- PULSE, *Manual – Getting Started*, Brüel&Kjær, 2003.
- QUIRT, J. D., *Sound transmission through windows II. Double and triple glazing*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 22, Nº 8, May, 1983.
- SCARAZZATO, P. S., *Curso Básico de Acústica Arquitetônica*, Outubro, 2002.
- SCHROEDER, M. R., *New Method of Measuring Reverberation Time*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 3, Nº 3, December, 1964.
- TADEU, A., ANTÓNIO, J., MATEUS, D., *Sound insulation provided by single and double panel walls—a comparison of analytical solutions versus experimental results*, Applied Acoustics 65, pp 15–29, 2004.
- TADEU, A. J. B., MATEUS, D. M. R., *Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation*, Applied Acoustics 62, 307-325, 2001.
- TSOUMIS, G., *Science and technology of Wood: Structure, Properties, Utilization*, New York: Chapman & Hall, pp 309-339, 1991.
- VIBRA-STOP, *Isoladores de Vibração. Contém informações técnicas sobre amortecedores de vibração da Linha Vibra -Stop para máquinas industriais e domésticas. Disponível em: www.vibra-stop.com.br. Acesso em: 09 dez. 2005.*

WALKER, J. C. F., *Primary Wood Processing: Principles and Practice*, London: Chapman & Hall, pp 377-416, 1993.

WILSON, G. R., *A Statistical Analysis of Surface Reverberation*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 21, N° 8, April, 1983.

XIAOXIANG. S., YONG, S., ZHOU, J., *Optimization of the locations of the loudspeaker and absorption material in a small room*, Applied Acoustics 65, pp 791–806, 2004.

A.1 - ROTINA ELABORADA NO MATLAB

Rotina para obtenção dos parâmetros de forma analítica através do software MATLAB.

```
% Universidade Federal do Pará
% Centro Tecnológico
% Departamento de Engenharia Mecânica
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

clear
clc
close all

%Programa para calcular a PT Sonora pelo Metodo ISO e SEA

%Metodo ISO:  $PT_{iso} = NPS1 - NPS2 + 10 \cdot \log_{10}(S/A)$ 
%Metodo SEA:  $PT_{sea} = NPS1 - NPS2 + 10 \cdot \log_{10}((S/0.161V) \cdot (2.2/fn))$ 

%onde:
%NPS1 nivel de pressao sonora media na sala de emissao (dB)
%NPS2 nivel de pressao sonora media na sala de recepcao (dB)
%S area da particao ou da abertura de teste em metros quadrados = 0.3685 m2
%A area de absorcao sonora equivalente na sala de recepcao em metros quadrados:
 $A = 0.161 \cdot V / TR$ 
%V volume da camara receptora = 0.2948 m3
%f frequencia da banda de interesse, em oitava (125, 250, 500, 1000,
%2000, 4000, 8000) Hz
%n corresponde ao fator de Perda por Amortecimento:  $n = 2.2 / (f \cdot TR)$ 

%entrada:
%Tempo de reverberacao: TR(s)
%NPS1
%NPS2
%nome

%Saida
%Perda de Transmissao Sonora Metodo ISO: PTiso
%Perda de Transmissao Sonora Metodo SEA: PTsea
```

```
%variaveis constantes
clear
clc
f=[125 250 500 1000 2000 4000 8000];
S=0.3685;
V=0.2948;

%entrada
disp(' ')
disp('Programa para calcular a PT Sonora pelo Metodo ISO e SEA')
disp('Metodo ISO: PTiso = NPS1 - NPS2 + 10*log10(S/A)')
disp('Metodo SEA: PTsea = NPS1 - NPS2 + 10*log10((S/0.161V)*(2.2/fn))')
disp('NPS1 nivel de pressao sonora media na sala de emissao (dB)')
disp('NPS2 nivel de pressao sonora media na sala de recepção (dB)')
disp('S   area da partição ou da abertura de teste em metros quadrados = 0.3685 m2')
disp('A area de absorção sonora equivalente na sala de recepção em metros quadrados: A
= (0.161*V)/TR')
disp('V   volume da camara receptora = 0.2948 m3')
disp('f   frequencia da banda de interesse, em oitava (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000,
8000) Hz')
disp('n   corresponde ao fator de Perda por Amortecimento: n = 2.2/(f*TR)')
disp(' ')
disp(' ')
% nome=input(' Digite o nome da amostra entre apostrofos: ');
% disp(' ')
TR=input(' Digite o tempo de reverberação por terço de oitava (s): [TR1 TR2 ... TR7] :
');
disp(' ')
NPS1=input(' Digite o nivel de pressao sonora media na sala de emissao (dB): [NPS11
NPS12 ... NPS17] : ');
disp(' ')
NPS2=input(' Digite o nivel de pressao sonora media na sala de recepção (dB): [NPS21
NPS22 ... NPS27] : ');
disp(' ')

%calculando A
A=(0.161*V)/TR;

%calculando PTiso
PTiso=NPS1 - NPS2 + 10.*log10(S./A);

%calculando n
n=2.2./(f.*TR);

%calculando PTsea
v1=(S./(0.161.*V));
```

```
v2=(2.2./(f.*n));
```

```
PTsea = NPS1 - NPS2 + (10.*log10(v1.*v2));
```

```
%plotando na area de comandos
```

```
sprintf('A = %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f',A)
```

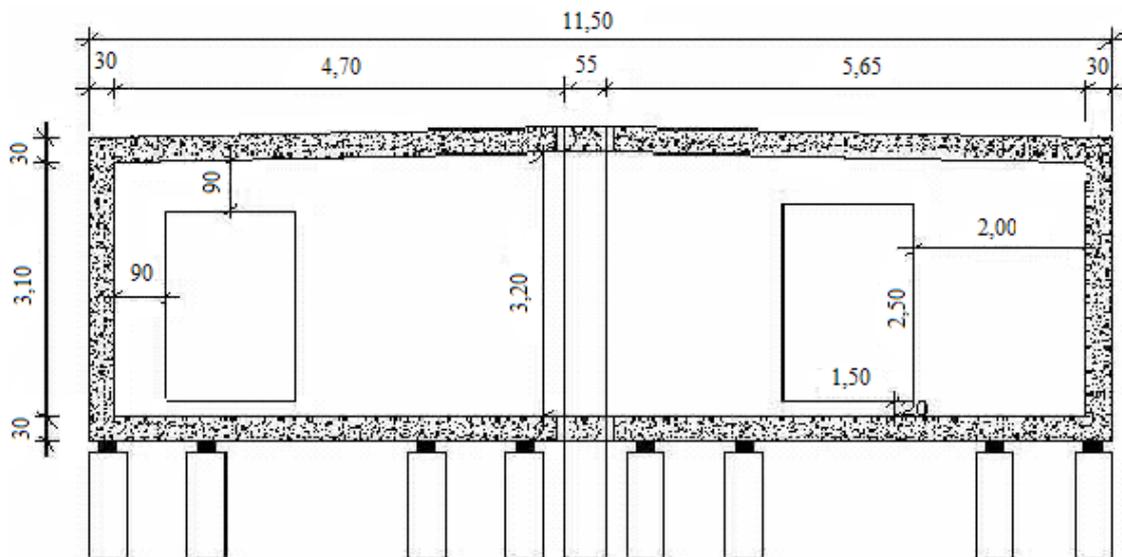
```
sprintf('n = %2.6f %2.6f %2.6f %2.6f %2.6f %2.6f %2.6f',n)
```

```
sprintf('PTiso = %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f (dB)',PTiso)
```

```
sprintf('PTsea = %2.3f %2.3f %2.3f %2.3f %2.3f %2.3f %2.3f (dB)',PTsea)
```

A.2 – CÂMARAS REVERBERANTES DA UFSM

A figura a seguir refere-se às câmaras reverberantes para ensaios de transmissão sonora da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), cujas dimensões serviram como base para a construção das mini-câmaras reverberantes da UFPA.



A.3 – FOTOS ADICIONAIS

As fotos aqui expostas referem-se às mini-câmaras reverberantes, às divisórias e alguns instrumentos utilizados.

A.3.1 – Fotos das Câmaras Reverberantes



Câmaras Reverberantes



Câmaras Reverberantes Acopladas



Visualização do Acoplamento

A.3.2 – Fotos das Divisórias



Divisórias de 5 cm e 10 cm