



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE MESTRADO EM VIBRAÇÕES E ACÚSTICA

REGINALDO CASCAES GUEDES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA
REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA PARA A
CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS
ABSORVENTES**

Belém
2007

REGINALDO CASCAES GUEDES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA
REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA PARA A
CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS
ABSORVENTES**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Área de Concentração: Vibrações e Acústica.

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

Belém

2007

REGINALDO CASCAES GUEDES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA
REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA PARA A
CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS
ABSORVENTES**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Área de Concentração: Vibrações e Acústica.

Belém, 31 de Maio de 2007

BANCA EXAMINADORA:

Orientador Prof. Dr. Newton Sure Soeiro
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr^a. Carmem Gilda Barroso Tavares Dias
Universidade Federal do Pará

Profa. Dr^a. Dinara Xavier Paixão
Universidade Federal de Santa Maria

Dedicatória

Aos meus queridos pais
Rui Lopes Guedes e Maria Luiza Cascaes Guedes que
sempre me ensinaram o melhor caminho a seguir e
que continuamente me apoiaram durante toda minha
trajetória estudantil e profissional;

A minha Namorada Valéria pela força
e pelo entendimento nos momentos difíceis.

Se algum dia alguém lhe disser que seu trabalho não é o de um profissional, lembre-se: Amadores construíram a Arca de Noé e profissionais, o Titanic. Procure ser uma pessoa de valor, em vez de ser uma pessoa de sucesso.

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus familiares, em especial as minhas Irmãs Regianne, Rejane e Bernardete pelo incentivo.

Aos meus amigos da turma de mestrado que de alguma forma puderam me ajudar na conclusão deste objetivo: Aviz, Alexandre, Marlenne, Rubenildo, Sérgio, Paulo Tadeo, 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 integrantes e amigos do GVA pelos momentos compartilhados: Alan, Rodrigo, Keliene, Márcio, Erlison, Diana, Roberta, Juliana, Fábio Setúbal, Hélder, entre outros.

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

A CAPES pelo apoio, que foi muito importante para a realização deste projeto de pesquisa.

A 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	xii
ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE SIMBOLOS	xx
NOMENCLATURAS	xxi
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 – OBJETIVOS	2
1.2.1 – OBJETIVO GERAL	2
1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 – JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	3
1.4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	3
1.5 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 – BREVE HISTÓRICO	7
2.2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
CAPÍTULO III – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
3.2 – ABSORÇÃO SONORA	14
3.3 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO	15

3.3.1 – VALORES RECOMENDADOS DE TR	17
3.3.2 – CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	18
A) FÓRMULA DE SABINE	18
B) FÓRMULA DE EYRING	19
3.4 – ACÚSTICA DE SALAS	21
3.4.1 – ACÚSTICA GEOMÉTRICA	21
CAPÍTULO IV – CONSTRUÇÃO DA CÂMARA REVERBERANTE EM	
ESCALA REDUZIDA	23
4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
4.2 – ESCALA SELECIONADA PARA A MINI-CÂMARA	25
4.3 – MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DA MINI-CÂMARA .	26
4.4 – MONTAGEM DA MINI-CÂMARA	28
4.4.1 – PRIMEIRA ETAPA – DIMENSIONAMENTO E CORTE DO	
COMPENSADO	28
4.4.2 – SEGUNDA ETAPA – MONTAGEM DA MINI-CÂMARA	28
4.4.3 – TERCEIRA ETAPA – INSTALAÇÃO DE TIRAS DE	
CEDRO	29
4.4.4 – QUARTA ETAPA – INSTALAÇÃO DAS FOLHAS DE	
VIDRO NA PAREDE FRONTAL	30
4.4.5 – QUINTA ETAPA – INSTALAÇÃO DAS BORRACHAS DE	
VEDAÇÃO	31
4.4.6 – SEXTA ETAPA – INSTALAÇÃO DOS ISOLADORES DE	
VIBRAÇÃO	31
4.4.7 – SÉTIMA ETAPA – INSTALAÇÃO DA FONTE SONORA	33
CAPÍTULO V – MEDIÇÕES	
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	34
5.2 – PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO	34
5.2.1 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	35
5.2.2 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	35

5.2.3 – MEDIÇÃO DO TR.....	35
5.2.4 – POSIÇÕES DO MICROFONE E DA FONTE SONORA NA CÂMARA E Nº DE CURVAS DE DECAIMENTO	36
5.2.5 – DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA CÂMARA	38
5.2.6 – GERAÇÃO DO CAMPO SONORO NA CÂMARA	38
5.3 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	38
5.4 – QUALIFICAÇÃO DA MINI-CÂMARA	40
5.4.1 ÁREA DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE DA CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA	43
5.5 – CÁLCULO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA DA FONTE (NWS)	44
5.6 – MATERIAIS TESTADOS NA MINI-CÂMARA	45
5.6.1 – COMENTÁRIOS INICIAIS	45
5.6.2 – SONEX – FLEXONIC	46
5.6.3 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DAS AMOSTRAS	47
5.6.4 – FIBRA DE CÔCO	48
5.6.5 – NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA (NPS) DA CÂMARA	51
5.6.6 – CÂMARA SEM AMOSTRA	51
5.6.7 – CÂMARA COM AMOSTRA SNX2.....	52
5.6.7.1 – AMOSTRA SNX2 NA POSIÇÃO 1.....	52
5.6.7.2 – AMOSTRA SNX2 NA POSIÇÃO 2	54
5.6.7.3 – AMOSTRA SNX2 NA POSIÇÃO 3.....	55
5.6.7.4 – AMOSTRA SNX2 COM GEOMETRIA DIFERENTE	57
5.7 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	59
 CAPÍTULO VI – MODELAGEM NUMÉRICA	 61
6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	61
6.2 – O SOFTWARE RAYNOISE (ACÚSTICA DE RAIOS)	61
6.2.1 – MÉTODO DA FONTE IMAGEM ESPECULAR (MIRROR IMAGE SOURCE METHOD - MISM)	62

6.2.2 – MÉTODO DE TRAÇADO DE RAIOS (RAY TRACING METHOD - RTM)	64
6.2.3 – MÉTODOS HÍBRIDOS DE RAIOS ACÚSTICOS	65
6.2.4 – MÉTODO DOS RAIOS CÔNICOS (CONICAL BEAM METHOD - CBM)	66
6.2.5 – MÉTODO DOS RAIOS TRIANGULARES (TRIANGULAR BEAM METHOD - TBM)	68
6.3 – MODELO RAYNOISE.....	69
6.3.1 – DADOS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA SALA	69
6.3.2 – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS, NÚMERO DE RAIOS E ORDEM DE REFLEXÃO.....	70
6.3.3 – MÉTODO DE CONVERGÊNCIA	71
6.4 – CASOS SIMULADOS	74
6.4.1 SALA SIMULADA SEM AMOSTRA DE TESTE(1º CASO).....	74
6.4.2 SALA SIMULADA COM AMOSTRA SNX2 NA POSIÇÃO 1 (2º CASO).....	88
6.4.3 SALA SIMULADA COM AMOSTRA SNX2 NA POSIÇÃO 2 (3º CASO).....	89
6.4.4 SALA SIMULADA COM AMOSTRA SNX2 COM GEOMETRIA DIFERENTE (4º CASO).....	91
6.5 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	93
 CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	 95
7.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	95
7.2- CONCLUSÕES	95
7.3 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	97

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXOS	103

RESUMO

Guedes, Reginaldo Cascaes, (2007). “Projeto e Construção de uma Câmara em Escala Reduzida para a Caracterização Acústica de Materiais Absorventes”.

Na área da Acústica, no que diz respeito às últimas décadas, tem crescido substancialmente a demanda por informações sobre a capacidade de absorção dos materiais acústicos, bem como a utilização de métodos de modelagem que permitam inferir o comportamento acústico dos sistemas reais, os quais demandam uma infraestrutura de porte, o que representa um alto investimento. Assim, visando atender a estas demandas, possibilitar o desenvolvimento de pesquisas sobre as características de absorção sonora de materiais tipicamente regionais e o desenvolvimento de aulas práticas no âmbito da acústica, tanto no curso de graduação quanto na pós-graduação, este trabalho apresenta todas as informações pertinentes ao projeto e construção de uma mini-câmara reverberante, na escala de 1:6 de um volume de 200 m³. Além disso, é apresentada uma metodologia de qualificação e adequação do campo acústico interno, tendo por base as orientações contidas na norma ISO-354. Por outro lado, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, a partir de ensaios realizados nesta mini-câmara, caracterizando e validando os painéis de fibra de coco, desenvolvidos pelo Grupo de Vibração e Acústica, da Universidade Federal do Pará, bem como uma simulação numérica por Raios Acústicos, tendo por base a cavidade acústica da mini-câmara, para permitir a validação do modelo numérico a partir dos dados experimentais.

Palavras-chave: câmara reverberante, modelo reduzido, absorção sonora, campo difuso.

ABSTRACT

Guedes, Reginaldo Cascaes, (2007). "Project and construction of a scaled reverberant chamber for characterization of sound absorbing materials"

In the area of Acoustics, concerning the last decades, a significant growth has been observed in the demand for data regarding not only the absorbing characteristics of acoustical materials, but also the usage of numerical methods which are able to represent the acoustical behavior of real systems. These real systems demand a significant infrastructure, which means a great deal of investments. Thus, in order to attend such demands for new data, to allow the development of research regarding the sound absorbing characteristics of regional materials and to develop practical classes on acoustics, both for graduate and post-graduate students, this work presents all the information regarding the project and construction of a scaled reverberant chamber (1:6 of a 200 m³ real chamber). Besides, a methodology is presented regarding the qualification and adequacy of the internal acoustic field, based on the guidance of ISO-354. On the other hand, experimental results for the miniaturized chamber are presented and discussed, which characterize and validate the usage of the coconut fiber panels, developed by the Acoustics and Vibration Group of the Federal University of Pará. Finally, numerical results, based on Ray Tracing Methods, are presented and compared to those measured for the scaled chamber, seeking the validation of the developed numerical model.

Keywords: reverberant chamber, scaled model, sound absorbing, diffuse field.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Crescimento e Decaimento do NPS com o Tempo	16
Figura 3.2	Tempos de Reverberação Recomendados	17
Figura 4.1	Desenho Esquemático da Mini-Câmara	24
Figura 4.2	Câmara em Fase de Montagem	29
Figura 4.3	Quadro de Madeira de Cedro Montado	29
Figura 4.4	Parede Frontal com a Janela de Visualização Montada	31
Figura 4.5	Câmara em Fase de Montagem com a Borracha Instalada	31
Figura 4.6	Isoladores de Vibração Linha Micro, tipo Micro II	32
Figura 4.7	Mini-Câmara com os Isoladores Instalados	32
Figura 4.8	Fonte sonora instalada	33
Figura 5.1	Curva de decaimento típica da pressão sonora para a banda de 1kHz na determinação do tempo de reverberação	36
Figura 5.2	Pontos de medição no interior da câmara	37
Figura 5.3	Difusores estáticos	40
Figura 5.4	Difusores estáticos instalados	41
Figura 5.5	Pontos de medição após o planejamento experimental	41
Figura 5.6	Gráfico da média do Coeficiente de Absorção Sonora nas faixas de 500Hz à 4KHz pelo numero de difusores	42
Figura 5.7	Coeficientes de Absorção Sonora dos materiais comerciais	47
Figura 5.8	Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora do SNX1	47
Figura 5.9	Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora do SNX2	48
Figura 5.10	Comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora do SNX 1 e SNX 2 medidos experimentalmente	48
Figura 5.11	Amostra de fibra de coco com espessura de 50mm e com densidade 130Kg/m ³	49
Figura 5.12	Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora das mantas FC1, FC2 e FC3	49

Figura 5.13	Amostra de fibra de coco com espessura de 100mm e com densidade 130Kg/m ³	49
Figura 5.14	Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora das mantas FC4, FC5 e FC6	50
Figura 5.15	Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora das mantas FC1, FC2, FC3, FC4, FC5 e FC6	50
Figura 5.16	Gráfico do NPS experimental da câmara sem amostra	51
Figura 5.17	Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora das paredes da câmara (sem amostra)	52
Figura 5.18	Amostra na Posição 1	52
Figura 5.19	Gráfico do NPS experimental do SNX2 na Posição 1	53
Figura 5.20	Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora para amostra SNX2 na Posição 1	53
Figura 5.21	Amostra na Posição 2	54
Figura 5.22	Gráfico do NPS experimental do SNX2 na Posição 2	54
Figura 5.23	Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora para amostra SNX2 na Posição 2	55
Figura 5.24	Amostra na Posição 3	55
Figura 5.25	Gráfico do NPS experimental do SNX2 na Posição 3	56
Figura 5.26	Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora para amostra SNX2 na Posição 3	56
Figura 5.27	Amostra com Geometria Diferente	57
Figura 5.28	Gráfico do NPS experimental do SNX2 com geometria diferente	57
Figura 5.29	Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora para amostra SNX2 com Geometria Diferente	58
Figura 5.30	Gráfico de comparação do NPS do SNX2 entre as três posições distintas da amostra e para a amostra com geometria diferente	58
Figura 5.31	Gráfico de comparação do Coeficiente de absorção Sonora do SNX2 entre as três posições distintas da amostra e para a amostra com geometria diferente	59
Figura 6.1	Trajetos de Reflexão de Primeira Ordem em Salas Retangulares ...	63
Figura 6.2	Fonte Imagem de Terceira Ordem F ₁₂₄	63
Figura 6.3	Teste de Visibilidade: Receptor R ₁ visível a F ₁ e R ₁ ' não visível a F ₁	64

Figura 6.4	Traço de um raio acústico da fonte ao volume receptor	65
Figura 6.5	Feixe de raios cônico ou triangular	66
Figura 6.6	Compensação dos raios cônicos, ponderação máxima no centro e mínima nas bordas	67
Figura 6.7	Estreitamento de raio que ocorre tanto em feixes cônicos quanto triangulares	67
Figura 6.8	Receptor 1, relativo a uma falsa imagem e Receptor 2, relativo a uma imagem perdida	68
Figura 6.9	Feixe de raios acústicos na forma de cone e de pirâmide triangular	68
Figura 6.10	Vista em Perspectiva da Sala	69
Figura 6.11	Gráfico do TR para o 1º caso de convergência	72
Figura 6.12	Gráfico do NPS para o 1º caso de convergência	72
Figura 6.13	Gráfico do TR para o 2º caso de convergência	73
Figura 6.14	Gráfico do NPS para o 2º caso de convergência	74
Figura 6.15	Câmara sem Amostra de Teste	74
Figura 6.16	Comparação dos TR's numérico e experimental da sala sem Amostra de Teste	75
Figura 6.17	Comparação dos NPS's numérico e experimental da sala sem Amostra	75
Figura 6.18	Campo de pressão sonora para a banda de freqüência de 125 Hz nos planos horizontais 1 e 2	76
Figura 6.19	Campo de pressão sonora para a banda de freqüência de 250 Hz nos planos horizontais 1 e 2	77
Figura 6.20	Campo de pressão sonora para a banda de freqüência de 500 Hz nos planos horizontais 1 e 2	78
Figura 6.21	Campo de pressão sonora para a banda de freqüência de 1000 Hz nos planos horizontais 1 e 2	79
Figura 6.22	Campo de pressão sonora para a banda de freqüência de 2000 Hz nos planos horizontais 1 e 2	80
Figura 6.23	Campo de pressão sonora para a banda de freqüência de 4000 Hz nos planos horizontais 1 e 2	81
Figura 6.24	Campo de pressão sonora para a banda de freqüência de 125 Hz nos planos verticais 1 e 2	82

Figura 6.25	Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 250 Hz nos planos verticais 1 e 2	83
Figura 6.26	Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 500 Hz nos planos verticais 1 e 2	84
Figura 6.27	Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 1000 Hz nos planos verticais 1 e 2	85
Figura 6.28	Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 2000 Hz nos planos verticais 1 e 2	86
Figura 6.29	Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 4000 Hz nos planos verticais 1 e 2	87
Figura 6.30	Amostra SNX2 na Posição 1	88
Figura 6.31	Comparação dos TR's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 na Posição 1	88
Figura 6.32	Comparação dos NPS numérico e experimental da sala com amostra SNX2 na Posição 1	89
Figura 6.33	Amostra na Posição 2	89
Figura 6.34	Comparação dos TR's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 na Posição 2	90
Figura 6.35	Comparação dos NPS's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 na Posição 2	90
Figura 6.36	Amostra com Geometria Diferente	91
Figura 6.37	Comparação dos TR's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 com Geometria Diferente	92
Figura 6.38	Comparação dos NPS's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 com Geometria Diferente	92
Figura 6.39	Comparação dos TR's numéricos da sala com amostra SNX2 com as três configurações analisadas (Posição 1, Posição 2 e Geometria Diferente)	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Relações de dimensões recomendadas para câmara	25
Tabela 4.2	Dimensões Principais em m da Câmara Real e da Mini-Câmara	25
Tabela 4.3	Relação entre duas dimensões na mini-câmara	26
Tabela 4.4	Comprimento da maior linha reta interna da mini-Câmara	26
Tabela 4.5	Isolamento sonoro fornecido pelo compensado	26
Tabela 4.6	Isolamento sonoro fornecido pelo vidro	30
Tabela 4.7	Dados característicos do isolador	32
Tabela 5.1	Coordenadas dos pontos de medições	37
Tabela 5.2	Média do TR no Planejamento Experimental	40
Tabela 5.3	Coordenadas dos pontos de localização do microfone	42
Tabela 5.4	Valores máximos da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante sem amostra	43
Tabela 5.5	Valores máximos da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante em escala reduzida sem amostra	43
Tabela 5.6	Valores máximos calculados da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante em escala reduzida sem amostra	44
Tabela 5.7	NPS Experimental para o cálculo do NWS da fonte	45
Tabela 5.8	Valores de NWS da fonte	45
Tabela 5.9	Lista de materiais testados na câmara reverberante em escala reduzida	46
Tabela 6.1	Valores de Coeficiente de Absorção Sonoro dos materiais que constituem a sala	70
Tabela 6.2	Número de raios utilizados nas tentativas de convergência	71
Tabela 6.3	Resultados de TR obtidos na convergência do número de raios.....	71
Tabela 6.4	Resultados de NPS obtidos na convergência dos números de raios	72
Tabela 6.5	Valores distintos para a Ordem de Reflexão, utilizados nas tentativas de convergência	73
Tabela 6.6	Resultados de TR obtidos na convergência da Ordem de Reflexão	73
Tabela 6.7	Resultados de NPS obtidos na convergência da Ordem de Reflexão	73

Tabela 6.8	Valores de TR nos três casos estudados	93
------------	--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Fator de escala
NPS	Níveis de pressão sonora
z	Impedância característica
v	Velocidade
V	Volume
c	Velocidade do som no fluido
d	Densidade
f	Freqüência em ciclos por segundo
λ	Comprimento de onda
α	Coefficiente de absorção sonora
α_m	Coefficiente de absorção sonora médio
m_1	Coefficiente de absorção do ar
A_1	Área de absorção sonora equivalente para câmara vazia
A_2	Área de absorção sonora equivalente da câmara com amostra de teste
A	Área de absorção sonora equivalente
T_1	Tempo de reverberação médio da sala vazia
T_2	Tempo de reverberação médio da sala com amostra
TR	Tempo de reverberação
t	temperatura °C
$TR_{médio}$	Tempo de reverberação médio
S	Área total da superfície da sala
L_x	Largura
L_y	Comprimento
L_z	Altura
θ_i	Ângulo de incidência
P	Pressão sonora em RMS
NR	Número de raios
R	Ordem de reflexão
F	Fonte
R	Receptor

NOMECLATURAS

GVA	Grupo de Vibrações e Acústica (UFPa)
ISO	Internatonal Standard Organization
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEC	Método de elementos de contorno
MISM	Método da Fonte Imagem Especular (Mirror Image Source Method)
RTM	Método de Traçado de Raios (Ray Tracing Method)
CBM	Método dos Raios Cônicos (Conical Beam Method)
SNX1	Sonex Placa Flexonic 20x35
SNX2	Sonex Placa Flexonic 35x35
FC1	Manta de Fibra de Coco com densidade de 18Kg/m^3 e espessura de 50mm
FC2	Manta de Fibra de Coco com densidade de 60Kg/m^3 e espessura de 50mm
FC3	Manta de Fibra de Coco com densidade de 130Kg/m^3 e espessura de 50mm
FC4	Manta de Fibra de Coco com densidade de 18Kg/m^3 e espessura de 100mm
FC5	Manta de Fibra de Coco com densidade de 18Kg/m^3 e espessura de 100mm
FC6	Manta de Fibra de Coco com densidade de 130Kg/m^3 e espessura de 100mm

CAPITULO I - INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas tem crescido substancialmente a demanda por informações sobre a capacidade de materiais ou dispositivos de absorção sonora. Os estudos dos desempenhos acústicos desses materiais são realizados em câmaras reverberantes, atualmente não disponíveis na região norte do Brasil, devido à construção de uma câmara reverberante exigir um grande investimento financeiro, e não se ter na referida região condições de implementar um laboratório nessas circunstâncias. A idéia, então, é a de se projetar e construir uma câmara reverberante em escala reduzida, para suprir temporariamente essas necessidades, de uma maneira prática e econômica se comparado ao investimento que seria necessário para construir uma Câmara em Escala Real.

Assim, além de capacitar o GVA (Grupo de Vibrações e Acústica da UFPA) a realizar ensaios laboratoriais, que antes eram somente realizados em outras regiões, possibilitará também a realização de pesquisas sobre as características de absorção sonora de materiais tipicamente regionais, bem como o desenvolvimento de aulas práticas no âmbito da acústica, tanto no curso de graduação quanto na pós-graduação. A vantagem de se usar modelos em escala reduzida é que sua configuração pode ser alterada com facilidade e economia.

Portanto, este trabalho apresenta todas as informações pertinentes ao projeto e construção de uma mini-câmara, bem como o procedimento desenvolvido na realização de ensaios acústicos voltados para a determinação do coeficiente de absorção sonora de materiais acústicos, os quais foram usados para a determinação do coeficiente de absorção de materiais que já haviam sido ensaiados em câmara reverberante de tamanho normal, com o propósito de comparar os resultados e validar o projeto desenvolvido. Deve-se enfatizar que as medições realizadas foram feitas com frequências normais, pois se sabe que quando se trabalha com modelo reduzido a frequência é n vezes superior às frequências normais onde $1/n$ é o fator de escala do modelo. Conseqüentemente, no modelo, o campo sonoro similar é

executado com n vezes a frequência da sala original Nascimento (2005), o que não é o caso em questão no trabalho.

Os procedimentos de construção e medições foram desenvolvidos tendo por base as normas ISO-354 (1999), relativa à Medição da Absorção Sonora em Câmara Reverberante, e ISO-3741(1999), relativa à Determinação de Níveis de Potência Sonora em Câmaras Reverberantes. A norma ISO-354 especifica um método para medição de coeficiente de absorção sonora de materiais usados para tratamento de parede ou forros, ou da área de absorção sonora equivalente de objetos, tais como móveis, pessoas ou absorvedores suspensos, em uma câmara reverberante. Esta norma também está em revisão e é o documento principal utilizado pela comissão técnica da ABNT na elaboração de uma norma nacional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Construir uma Câmara Reverberante em escala reduzida e medir o coeficiente de absorção sonora de materiais comerciais e regionais, assim como, subsidiar o desenvolvimento de aulas práticas na área de acústica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1 – Dimensionar a Câmara Reverberante em Escala Reduzida de acordo com as recomendações técnicas normalizadas;
- 2 – Construir a Câmara Reverberante em Escala Reduzida;
- 3 – Caracterizar a mini-câmara, adequando, se for o caso, a difusividade do campo acústico;
- 4 – Medir o Tempo de Reverberação para o cálculo do coeficiente de absorção sonora de diversos materiais, objetivando estabelecer comparação com os valores

de coeficiente de absorção dos mesmos obtidos em câmaras reverberantes em tamanho normal, validando o modelo projetado e construído;

5 – Realizar testes de medição na câmara fazendo comparação de resultados obtidos no ensaio de fibras regionais, para amostras com espessura e densidades distintas;

6 – Usar a câmara em escala reduzida para ajuste de modelo numérico a partir de simulações de acústica de raios, permitindo a previsão do campo de pressão acústica e o cálculo de tempo de reverberação, comparando os resultados obtidos com o resultados das medições;

1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A construção de uma câmara reverberante em escala reduzida se faz importante devido ainda não se ter, na região norte do Brasil, condições de implementar um laboratório de medições em escala real.

Este tipo de câmara reverberante, além de exigir um investimento financeiro muito menor, capacitará o GVA a realizar ensaios laboratoriais, que antes eram somente realizados em outras regiões, além de permitir o desenvolvimento de aulas práticas no âmbito da acústica, tanto na graduação quanto na pós-graduação, qualificando recursos humanos para o desenvolvimento de atividades ligadas à caracterização de materiais acústicos.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento desta dissertação iniciou-se com destaque para a Revisão Bibliográfica, com a finalidade de buscar em outros trabalhos informações que tenham relação com o tema proposto. Além da revisão bibliográfica, focada em trabalhos científicos desenvolvidos na área da acústica, foi preciso verificar as legislações e normas existentes referentes ao tema da Dissertação.

Em seguida, foram realizados estudos que permitiram a consolidação de alguns conceitos que são de fundamental importância para o desenvolvimento do trabalho, com destaque para Absorção Sonora, Tempo de Reverberação e Acústica de Raios.

Tendo por base a fundamentação teórica adequada, foi elaborado o projeto da câmara reverberante em escala reduzida, construída em uma escala de 1:6 do tamanho de uma câmara real que tem 200 m³, o item 4.2 destaca a escala selecionada, bem como foram selecionados os materiais e realizada a construção da mesma. Então, testes foram executados, objetivando a qualificação da câmara construída, tendo por base as normas técnicas pertinentes.

Na fase experimental, foram ensaiadas algumas amostras de material acústico comercial, para as quais se dispunha dos valores do coeficiente de absorção em bandas de oitavas e, então, com os resultados obtidos nos testes realizados na câmara reduzida foram feitas comparações com aqueles fornecidos pelos fabricantes dos materiais, validando, assim, o projeto desenvolvido. Estas comparações foram possíveis, pois se trabalhou com frequências normais, ou seja, não foram multiplicadas pelo fator de escala.

Finalmente, objetivando estabelecer um procedimento de ajuste de modelo, a câmara reduzida foi modelada numericamente em computador através do software comercial RAYNOISE (Raios Acústicos) para a obtenção dos parâmetros de interesse. Todas estas simulações, bem como os ensaios experimentais, foram feitas utilizando as instalações e equipamentos do Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal do Pará (LVA/UFPA).

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação está dividida em sete capítulos, os quais são apresentados de forma resumida a seguir:

CAPÍTULO 1 – Introdução

Neste capítulo, além do tema do trabalho estão relacionadas as atividades desenvolvidas e a estrutura da dissertação. São apresentados os objetivos, justificativa, contribuições da pesquisa e definições dos procedimentos metodológicos utilizados.

CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica

Apresenta-se neste capítulo um histórico sobre trabalhos realizados com modelos em escala reduzida, simulações por acústica de raios e técnicas para cálculo de coeficiente de absorção sonora de materiais, além de comentários sobre algumas normalizações que são imprescindíveis para o andamento do trabalho.

CAPÍTULO 3 - Fundamentação Teórica

A partir de considerações históricas e atuais, mostra uma síntese dos métodos abordados neste trabalho, seus parâmetros, hipóteses básicas e aspectos específicos para a sua aplicação em edificações, além de apresentar, ao final, um resumo sobre o método utilizado para simulação numérica.

CAPÍTULO 4 - Dimensionamento e Construção da Mini-câmara.

Este capítulo contém informações sobre escala, dimensionamento e construção da Mini-câmara reverberante, além dos materiais que foram utilizados para a confecção da mesma e a difusividade do campo sonoro.

CAPÍTULO 5 - Procedimentos Experimentais

Apresentam-se os procedimentos para determinação do tempo de reverberação e cálculo de coeficiente de absorção sonora de materiais, bem como a qualificação da mini-câmara e as condições ambientais durante as medições. Particularizam-se as propriedades das amostras, os princípios de medição, juntamente com os métodos de cálculo na câmara.

CAPÍTULO 6 - Modelagem Numérica

Apresenta-se aqui o método utilizado nas simulações numéricas, nas quais foi utilizado o Software comercial RAYNOISE 3.1 (Acústica de Raios e Fontes Imagem), bem como os resultados obtidos nas simulações.

CAPÍTULO 7 - Considerações Finais e Conclusões

Apresentam-se neste capítulo todas as conclusões do trabalho, oferecendo sugestões sobre o desenvolvimento de novos trabalhos na área de modelagem em acústica de raios e alterações para a câmara em escala reduzida.

CAPITULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve Histórico

Esta etapa do trabalho tem como finalidade reunir informações que possam ajudar no desenvolvimento deste projeto. Na literatura abordada foi possível encontrar artigos, livros, dissertações, teses e outros projetos que já utilizaram modelos reduzidos para o cálculo da absorção sonora e simulação numérica por raios acústicos que são os assuntos de maior relevância para este trabalho. Constataram-se também, os assuntos relatados nas normas que servirão de apoio para este projeto.

A compreensão de como o som é criado e propagado envolve principalmente o conhecimento do processo termodinâmico a que está sujeito. Assim, é necessário entender as premissas básicas referentes ao meio fluido e à correlação entre as variáveis acústicas e termodinâmicas. Este é um aspecto bastante importante nos ensaios acústicos experimentais, uma vez que é imprescindível confrontar as condições de teste àquelas definidas no desenvolvimento do modelo acústico.

2.2 Revisão Bibliográfica

No trabalho realizado por Nunes (2001) foi confeccionada uma bancada de acrílico em escala reduzida 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, o que alcançou uma satisfatória

concordância. No segundo momento, foi avaliada a alteração do campo sonoro da cavidade com a inclusão de barreiras (bancos rígidos) e absorção (bancos com feltro). Foram avaliadas no total quatro configurações diferentes. São discutidas ainda as dificuldades de medição para campos acústicos com absorção.

Massarani (2002) desenvolveu uma investigação experimental para determinar as características de absorção sonora de placas planas pequenas pelo método *in Situ* de dois conjuntos de amostras selecionadas (espuma de poliuretano e lã de rocha) antes das instalações de difusores em câmara reverberante, onde observou-se uma clara influencia das dimensões da amostra nos resultados obtidos e no caso das placas serem instaladas separadas umas das outras observou-se ganhos significativos de absorção sonora para este tipo de instalação.

Greco (2002) estudou problemas bidimensionais de propagação de ondas acústicas e estáticas, no domínio da frequência, formulado através do Método de Elementos de Contorno (MEC) onde é utilizada a iteração fluido-estrutura. Apresentam-se ainda exemplos numéricos, com o objetivo de possibilitar a modelagem numérica de problemas de acoplamento fluido-estrutura e de radiação e difusão acústica.

Araújo (2002) (A) apresentou um trabalho onde cita alguns métodos de medição de tempo de reverberação e cálculo do coeficiente de absorção sonora de certos materiais. Concluiu que os métodos de medição do tubo de Kundt (ou de impedância, ou de ondas estacionárias) são os de menor custo e mais fácil implementação. No entanto, os resultados se aplicam exclusivamente ao caso de ondas sonoras incidindo perpendicularmente à superfície da amostra de teste, condição que, na prática, é muito difícil de acontecer exclusivamente. O autor ressalta que as dimensões reduzidas da amostra ensaiada no tubo também nem sempre representam a situação em que o material vai ser utilizado. Cita também que o método *in situ*, método conhecido da reflexão, permite ensaiar amostras com dimensões mais representativas, mas também, por enquanto, só fornece informações para incidência normal do som sobre o material, além de exigir recursos digitais nem sempre disponíveis entre os fabricantes de equipamentos para medições acústicas. Afirma ainda que os ensaios de materiais em

câmaras reverberantes são considerados aqueles que fornecem resultados mais próximos da realidade, na qual o material absorvente vai ser instalado, tanto quanto as suas dimensões como também no que diz respeito ao campo sonoro incidente sobre o mesmo.

Araújo (2002) (B) relatou os resultados obtidos durante uma investigação experimental que procurou identificar e quantificar o efeito que a área da amostra e sua geometria exerciam sobre os resultados do coeficiente de absorção sonora medido. A norma ISO 354 que regula este tipo de medição está em processo de revisão e uma das sugestões em discussão é a permissão para utilização de câmaras reverberantes com volumes menores, com conseqüente diminuição da área mínima da amostra em teste.

No projeto *Acoustic Scaling General Outline* do departamento de pesquisa e engenharia da *British Broadcasting Corporation* (BBC, 1970), foi construída uma câmara reverberante em modelo reduzido na escala de 1:8, para suprir a necessidade de medir as propriedades de absorção sonora dos materiais a serem usados nos modelos reduzidos de estúdios e salas de concerto.

Barron e Colleman (2000) estudaram a absorção sonora de assentos de auditórios em escala de 1:25 testados em uma câmara reduzida na escala de 1:8. A câmara (semelhante à desenvolvida pela BBC) foi feita com um tanque de aço e uma tampa de acrílico transparente. Neste trabalho percebe-se a importância da utilização dos modelos em escala, pois somente um pequeno número de assentos poderia ser testado em uma câmara real (em média 24 no máximo) enquanto que um teatro grande teria aproximadamente 300 assentos. Portanto, justifica-se a utilização da escala dos assentos diferente da escala da mini-câmara, de modo que o volume da câmara fosse 30 vezes maior do que uma câmara real, tornando necessário realizar medições com um número maior de assentos. Utilizaram-se dois métodos para se chegar aos resultados obtidos: 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 é o método alternativo da barreira para

medidas da câmara reverberante. Posteriormente, foram feitas comparações entre os dois métodos e, ainda, a investigação da absorção do afastamento das fileiras, bem como a absorção de um número pequeno de fileiras.

Em seu trabalho sobre a validação e utilidades de uma câmara reverberante em escala reduzida, Nascimento (2005) 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, o qual está de acordo com padrões e normas internacionais. Esta câmara, construída em madeira e acrílico, pode ser usada para desenvolvimento de pesquisas sobre acústica, assim como para testar materiais absorvedores de som.

No trabalho realizado por Tadeu A. e Mateus D. (2001) sobre a isolamento sonora de vidros simples, duplos e triplos, as experiências laboratoriais foram executadas colocando as amostras de teste entre duas salas pequenas, onde o número dos painéis de vidro, sua espessura, a espessura da abertura de ar entre os painéis e o tipo de moldura 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 aplicada às janelas de vidro múltiplas, exibe diferenças significativas quando comparada com os dados experimentais. Os resultados experimentais demonstraram que os modelos teóricos previstos, descritos neste trabalho, não são próximos dos resultados experimentais para muitas soluções de vidro simples e duplo. A menor diferença entre a isolamento prevista 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 da abertura vitrificada que será usada na câmara.

Schroeder (1965) apresenta um método para medir o tempo de reverberação usando ruídos impulsivos (tiros filtrados de pistola) para excitar um enclausuramento. Uma integral simples acima da resposta do enclausuramento ao estouro produz, em

uma única medição, a média de um conjunto das curvas de decaimento que seriam obtidas com ruído de filtro passa-banda como sinal de excitação. As curvas de decaimento uniforme resultantes do novo método melhoram a exatidão das medições do tempo de reverberação e facilitam a detecção do decaimento não-exponencial.

Os campos sonoros na caixa do microfone e na sala, respectivamente, foram calculados por uma solução analítica da equação de onda tridimensional no trabalho realizado por Xiaoxiang et al. (2004). Mostrou-se, teoricamente, que a resposta de amplitude em salas pequenas é afetada pelas seguintes posições: posição do excitador no painel frontal da caixa, posição da caixa na sala, posição do material de absorção na caixa e posição do material de absorção nas paredes interiores da sala. As predições computacionais e as experiências provam que as posições otimizadas são benéficas à resposta de amplitude.

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

No trabalho desenvolvido por Souza (1997), mostra-se como pode ser realizada a previsão de ruído em salas por raios acústicos, além de uma metodologia experimental para este processo. Devido à limitação dos métodos de cálculo e da determinação dos seus dados de entrada, o autor sugere a calibração dos modelos através de ensaios experimentais. Neste trabalho foi estudada uma sala retangular com móveis e duas fontes sonoras, através de três modelos que exemplificam os principais métodos de previsão: um baseado na teoria de equações do campo difuso, outro no método de fonte imagem especular e um último que utiliza o método híbrido de acústica de raios.

Pesquisas recentes realizadas com programas de raios acústicos indicaram a necessidade de se levar em conta o efeito das reflexões difusas nas simulações de salas. Nos programas utilizados atualmente este efeito é considerado através do coeficiente de espalhamento. Principalmente por este motivo, métodos de medição ou

de previsão do referido coeficiente vêm sendo desenvolvidos há alguns anos. Em 2002, uma câmara reverberante na escala de 1:5 foi usada na Universidade de Aachen por Gomes, para estudar o coeficiente de espalhamento.

Haan e Kwon (2001) propõem 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 (M2) para traseira da sala. Para fazer esta 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). Em seguida, 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 nas frequências acima de 500 Hz, mas os mesmos valores de “x” aumentam nas frequências 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 critério para avaliar a difusividade da superfície das salas.

Com o passar dos anos ocorreram avanços na psicoacústica, que tornaram possíveis avaliar a qualidade acústica de uma sala, baseada em diversos parâmetros numéricos que foram desenvolvidos. Mesmo que não haja um acordo total sobre os parâmetros que são verdadeiramente importantes, alguns deles são bem aceitos pela

maioria dos pesquisadores de acústica. Ao projetar uma sala de concerto, por exemplo, os *softwares* de acústica de raios podem ser usados para calcular alguns destes parâmetros. Entretanto, alguns dados de entrada carregam algumas incertezas. Os dados disponíveis para coeficientes de absorção têm que ser usados com cuidado e, além do que, não há uma recomendação padronizada para os coeficientes de difusão, nem uma base de dados para este parâmetro. O trabalho apresentado por Gomes e Gerges (2001) mostra uma comparação de uma sala simulada com um dos *softwares* comerciais disponíveis (RAYNOISE) e os parâmetros medidos nesta mesma sala, usando seqüências de comprimento máximo (MLS). As discrepâncias sobre os resultados são investigadas e analisadas.

Como ainda não há uma norma específica para construção e determinação de parâmetros acústicos de câmaras reverberantes em escala reduzida, foi indispensável a obtenção de normas orientadoras que viessem suprir estas necessidades. Dentre as normas utilizadas estão a ISO-3741 (1999), relativa à determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes e a ISO-354 (1999), referente à medição de absorção sonora em câmaras reverberante – métodos de ensaio, na qual todas as medições devem atender às exigências relatadas, inclusive no que se refere à qualificação da sala para os testes de absorção sonora. Esta norma especifica um método para medição do coeficiente de absorção sonora de materiais usados para tratamento de paredes ou forros, ou da área de absorção sonora equivalente de objetos em uma câmara reverberante. A exatidão do equipamento de medição de 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 de terço de oitava. Após obter-se os valores absolutos de níveis de pressão sonora, 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.

CAPITULO III – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esta etapa do trabalho descreve alguns dos conceitos básicos que irão servir de embasamento para o desenvolvimento desta dissertação, com atenção especial aos seguintes conceitos: Absorção Sonora, Tempo de Reverberação e Modelagem Numérica pelo Método de Acústica de Raios. Apresenta, ainda, uma revisão dos métodos mais utilizados para a previsão do nível sonoro em salas.

3.2 ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é a propriedade dos materiais em não permitir que o som seja refletido por uma superfície.

O grau de absorção do som de um material qualquer é representado pelo coeficiente de absorção sonora α , o qual é definido como a relação entre a energia absorvida pelo material e a energia incidente sobre ele, conforme a equação abaixo:

$$\alpha = \frac{\text{Energia Absorvida}}{\text{Energia Incidente}} \quad (3.1)$$

O valor de α está diretamente relacionado com as propriedades físicas do material e varia com a frequência, assumindo valores entre 0 (para material totalmente refletivo) e 1 (para material com absorção sonora total).

A área de absorção sonora equivalente de uma câmara é a área hipotética total de uma superfície de absorção, sem efeito de difração, que se fosse o único elemento absorvente presente na câmara, apresentaria o mesmo tempo de reverberação da câmara em questão. Para a câmara reverberante vazia este valor é representado por A_1 , e para a câmara reverberante contendo a amostra de ensaio é representado por A_2 . A área de absorção sonora equivalente de uma amostra de ensaio, representada pela letra A , é dada pela diferença entre a área de absorção

sonora equivalente de uma câmara com e sem amostra de ensaio. Estas áreas de absorção são expressas pelas seguintes equações:

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} \quad (3.2)$$

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} \quad (3.3)$$

$$A = 55,3 \frac{V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (3.4)$$

em que T_1 é o tempo de reverberação médio da câmara vazia, em segundos; T_2 é o tempo de reverberação médio após a introdução da amostra de ensaio na mesma câmara, em segundos; V é o volume da câmara reverberante vazia, em m^3 ; e c é a velocidade de propagação do som no ar, em m/s .

Para temperaturas na faixa de 15 a 30 °C, a velocidade do som pode ser calculada pela expressão:

$$c = 331 + 0,6t \quad (3.5)$$

sendo t a temperatura do ar, em °C.

Pode-se dizer, de forma geral, que o som absorvido por uma superfície é a quantidade de energia dissipada (transformada em calor) mais a quantidade de energia transmitida.

3.3 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Quando um som é gerado dentro de um ambiente, escuta-se, primeiramente, o som direto e, em seguida, o som refletido. No caso em que essas sensações se sobrepõem, confundindo o som direto e o refletido, tem-se a impressão de uma audição mais prolongada. A esse fenômeno se dá o nome de reverberação.

Define-se como Tempo de Reverberação (TR) o tempo necessário para a intensidade de um som decair de um fator de 10^{-6} (-60 dB) do seu valor inicial, depois de cessada a fonte. É o parâmetro mais importante para determinar a qualidade acústica de um ambiente. O mesmo depende da frequência e pode ser controlado através da utilização de materiais de absorção. Se as paredes do ambiente forem muito absorventes (pouco reflexivas), o tempo de reverberação será muito pequeno, caso contrário ocorrerão muitas reflexões e o tempo de reverberação será grande. Esta definição está baseada na suposição de que, no caso ideal, existe uma relação linear entre o nível de pressão sonora e o tempo. E que o nível de ruído de fundo seja suficientemente baixo.

A Fig. 3.1 mostra o nível de pressão sonora provocado por uma fonte sonora que, após ter atingido a sua condição operacional de regime, é desligada e a energia sonora da fonte é absorvida pelo ambiente ao longo do tempo. Na figura, é dado destaque para duas condições de absorção, sendo uma alta e outra baixa.

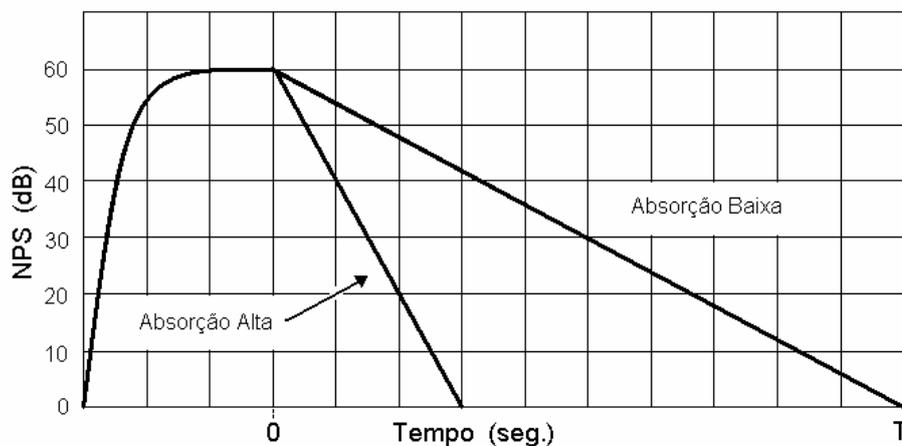


Fig. 3.1 - Crescimento e Decaimento do Nível de Pressão Sonora com o Tempo

Fonte: Adaptada de (Gerges, 2000).

O tempo de reverberação é uma importante característica de ambientes fechados, usado para determinar quão rapidamente o som decai numa sala. Para determinar o tempo ótimo de reverberação tem-se a Norma NBR 12179 – Tratamento Acústico em Recintos Fechados – que indica o valor ideal de acordo com o volume dos ambientes e as atividades desenvolvidas neles.

3.3.1 Valores Recomendados de Tempo de Reverberação

Habitualmente, quando se estabelece um único valor recomendado de TR para um recinto dado, se costuma fazer referência ao obtido como média aritmética dos valores correspondentes às bandas de 500 Hz e 1 kHz, o qual é denominado como Tempo de Reverberação Médio ($TR_{médio}$).

Em geral, o valor mais adequado de TR depende tanto do volume do recinto como da atividade a realizar nesse ambiente. Por exemplo, quando se trata de salas destinadas à palavra, é conveniente que os valores de TR sejam baixos, com o objetivo de se conseguir uma boa inteligibilidade, entretanto, no caso de salas de concertos são recomendáveis valores apreciavelmente mais elevados, a fim de que a audição musical resulte ótima. A Fig. 3.2 mostra os valores de TR indicados para ambientes distintos.

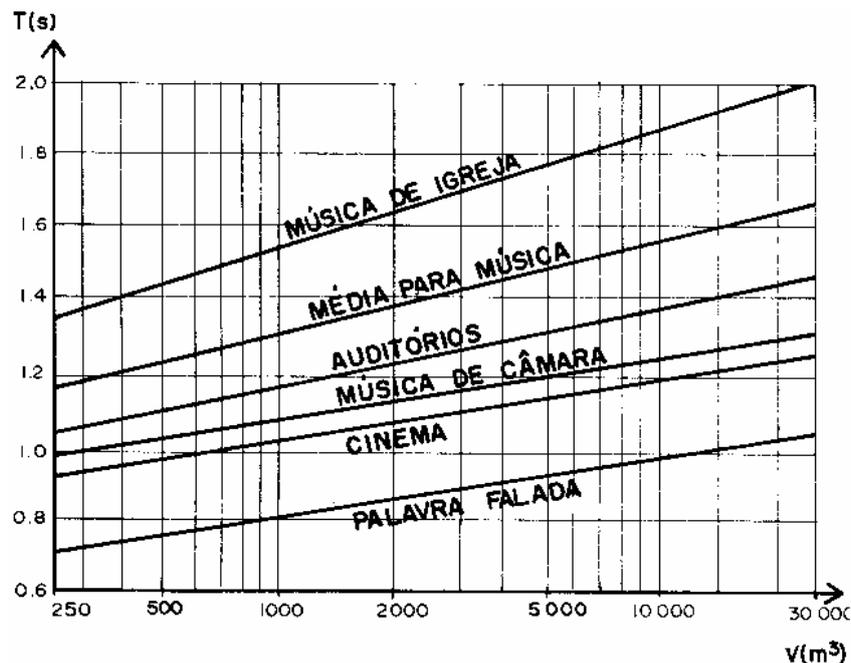


Figura 3.2 – Tempos de Reverberação Recomendados.

Fonte: Adaptada de (Gerges, 2000).

3.3.2 Cálculo do Tempo de Reverberação

Existem fórmulas distintas para o cálculo teórico do TR . Entretanto, a fórmula clássica por excelência e aceita, como de referência a nível internacional por sua facilidade de cálculo, é a fórmula de Sabine. Tem-se ainda a formulação de Eyring que foi desenvolvida a partir da fórmula de Sabine, após se ter constatado uma falha na equação de Sabine como mostrado no item (b).

a) Fórmula de Sabine

De forma resumida, o método de medição recomendado pela norma ISO-354 se fundamenta na expressão da reverberação desenvolvida e apresentada por Sabine em 1895, aplicada aos tempos de reverberação da câmara reverberante, medidos sem e com a presença da amostra de teste, para diferentes combinações entre posição da fonte sonora e microfone. A fórmula proposta por Sabine, descrita pela Eq. (3.6), relaciona o tempo de reverberação ao volume, às áreas das superfícies da sala e seus coeficientes de absorção sonora.

$$TR = 0,161 \frac{V}{A} \quad (3.6)$$

em que V é o volume do recinto (m^3) e A é a absorção total do recinto (sabines).

O parâmetro A (absorção) de um material qualquer é obtido como resultado de se multiplicar o coeficiente de absorção α pela superfície S . A unidade de absorção é o sabine (1 sabine corresponde à absorção de $1 m^2$ de janela aberta).

Finalmente, uma vez que um recinto é constituído por distintas superfícies recobertas de materiais diversos, se define a absorção total (A_{Total}) como a soma de todas as absorções individuais, ou seja:

$$A_{Total} = \alpha_1.S_1 + \alpha_2.S_2 + \dots + \alpha_n.S_n \quad (3.7)$$

A partir de A_{Total} é possível calcular o coeficiente médio de absorção α_m dividindo a absorção total pela superfície total do recinto S_{Total} :

$$\alpha_m = \frac{A_{Total}}{S_{Total}} \quad (3.8)$$

O TR calculado a cada frequência de interesse, mediante a fórmula de Sabine, não leva em conta a localização do receptor, uma vez que a mesma surge exclusivamente da aplicação da acústica estatística.

“Por outro lado, é preciso comentar que, apesar da utilização universal desta fórmula, sua validade se circunscreve ao caso de recintos com as seguintes características” (Carrion, 2001):

- Decaimento energético exponencial associado a um campo sonoro perfeitamente difuso (a energia se propaga com a mesma probabilidade em todas as direções);
- Geometria regular da sala;
- Coeficiente médio de absorção (α_m) inferior a, aproximadamente, 0,4.

b) Fórmula de Eyring

Segundo Bistafa e Bradley (2000), Eyring verificou uma falha na fórmula de Sabine, que consiste no fato de que, quando o $\alpha_{Sab} = 1$, ou seja, quando a absorção do ambiente é total, o TR não é nulo. Assim, para levar em conta este efeito, Eyring propôs a seguinte expressão modificada para o TR :

$$TR = \frac{-0,16V}{S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad (3.9)$$

em que S é a área total das paredes do ambiente e α_m é dado por:

$$a_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i a_i}{S} \quad (3.10)$$

Segundo Uria (2005), (Fernandez, 2002) realizando estudo sobre as duas formulações para a determinação do TR , estabeleceu os seguintes critérios para utilização das Eq. (3.6) e (3.9):

A fórmula de Sabine deve ser usada quando:

- O coeficiente médio de absorção for alto (acima de 0,25);
- Os materiais absorventes estejam distribuídos uniformemente;
- Os coeficientes de absorção não são precisos;
- Não se exige grande precisão nos cálculos.

Por outro lado, a fórmula de Eyring deve ser usada quando:

- Os materiais absorventes estejam distribuídos uniformemente;
- Conhecem-se com exatidão os coeficientes de absorção;
- Exige-se cálculo preciso do tempo de reverberação.

Embora o TR seja um parâmetro fundamental no projeto acústico de recintos, na prática se utiliza uma série de parâmetros complementares, fundamentados na acústica geométrica e que dependem da situação do receptor. A otimização de todos eles na fase de projeto permite garantir com um elevado grau de confiabilidade a obtenção de uma acústica adequada, uma vez construído o recinto.

Além das medições dos tempos de reverberação propriamente ditas, as dimensões da amostra de teste, bem como sua configuração de montagem no piso

da sala podem exercer forte influência sobre os resultados do coeficiente de absorção sonora (Araújo, 2002) (B).

Apesar de se utilizarem às fórmulas de Sabine e de Eyring para a determinação do TR , para este estudo utilizou-se somente a fórmula de Sabine, pois este trabalho obedece aos critérios descritos na página anterior para a equação de Sabine que é a equação em que se baseia a norma ISO – 354 que é a norma utilizada neste projeto.

3.4 ACÚSTICA DE SALAS

3.4.1 Acústica Geométrica

A Acústica Geométrica apresenta-se como a teoria mais utilizada para a simulação por computador em Acústica de Salas, inclusive por ser a mais intuitiva em função da analogia com a óptica geométrica. Os métodos da fonte imagem especular e dos raios acústicos, com diversas derivações, servem de base para a criação de algoritmos e programas de computador.

O método mais utilizado, ainda hoje, para se calcular o campo sonoro em salas de forma simples é através das equações do campo difuso, ainda que na maioria das vezes de forma incorreta. Ao longo do tempo foram desenvolvidas por vários pesquisadores algumas equações sem caráter científico para a previsão de tais campos sonoros. Entretanto, a exatidão destas equações diminui conforme aumentam as diferenças entre o ambiente em estudo e as restrições impostas no desenvolvimento dessas equações. Vários pesquisadores e projetistas também utilizam simulações por meio de modelos físicos em escala reduzida. Algumas dificuldades diminuem o uso do método, como custo, tempo na construção e alteração do modelo, caracterização precisa das propriedades acústicas dos materiais entre outras. Uma das ferramentas mais poderosas utilizadas atualmente para previsão do campo acústico de salas são os métodos de simulação computacional, com atenção especial para os métodos fundamentados em raios acústicos e fonte imagem.

Recentemente, vários programas baseados na teoria de raios acústicos vêm sendo desenvolvidos, pois esta teoria se aplica à teoria de ondas acústicas no projeto de ambientes fechados, para a região de médias e altas frequências.

A teoria de raios acústicos considera que o som se propaga em forma de um raio com propriedades semelhantes à óptica geométrica (Gerges, 2000). Um dos parâmetros mais importantes desta teoria é o fenômeno da reflexão.

Um estudo mais completo sobre Acústica de Raios é apresentado no sexto capítulo, referente à modelagem numérica por Raios Acústicos.

CAPÍTULO IV – CONSTRUÇÃO DA CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo apresenta o procedimento de dimensionamento e construção da Câmara Reverberante em Escala Reduzida e a qualificação da mesma.

Antes da construção de um modelo reduzido deve-se tentar encontrar materiais que sigam os parâmetros de similaridade e o mesmo coeficiente de absorção da Câmara Reverberante Real. Como na prática isso é muito difícil de conseguir, deve-se buscar uma forma de aproximar ao máximo esses valores.

Segundo Gerges (2000), todas as superfícies de uma câmara reverberante devem ser feitas tão duras e refletivas quanto possível, com coeficiente de absorção médio das paredes de 6% no máximo, exceto abaixo da frequência $f_w = 2000/V^{1/3}$ (frequência de Waterhouse) em que é recomendável aumentar o coeficiente para até 16% no máximo, a fim de aumentar a largura dos modos acústicos, devido à baixa densidade modal em baixas frequências.

A construção da mini-câmara foi realizada de acordo com os padrões e normas internacionais, especificamente, segundo a norma ISO 354 (*Acoustics – Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms*, 1999) e a norma ISO 3741 (*Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure Levels – Precision Method for Reverberation Rooms*, 1999) com um fator de escala de 1:6.

A norma ISO 354 recomenda que a câmara atenda à condição de que o comprimento da maior linha reta que se pode obter no interior da câmara seja menor do que $1,9.V^{1/3}$ (ver Tab. 4.3), sendo V o volume da câmara. Já a norma ISO 3741, relativa à determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes,

relata que a relação entre quaisquer duas dimensões da câmara não deve igualar ou aproximar um inteiro, (ver Tab. 4.1), ou seja, $L_x : L_y : L_z$ equivalente a $1 : 2^{1/3} : 4^{1/3}$ para evitar concentração de ressonâncias acústicas em faixas estreitas de frequência.

A Fig. 4.1 apresenta um desenho esquemático da mini-câmara construída, com destaque para a simbologia usada para designar as dimensões principais da mesma e a Tab. 4.1 mostra algumas relações entre largura/comprimento (L_x / L_z) e altura/comprimento (L_y / L_z).

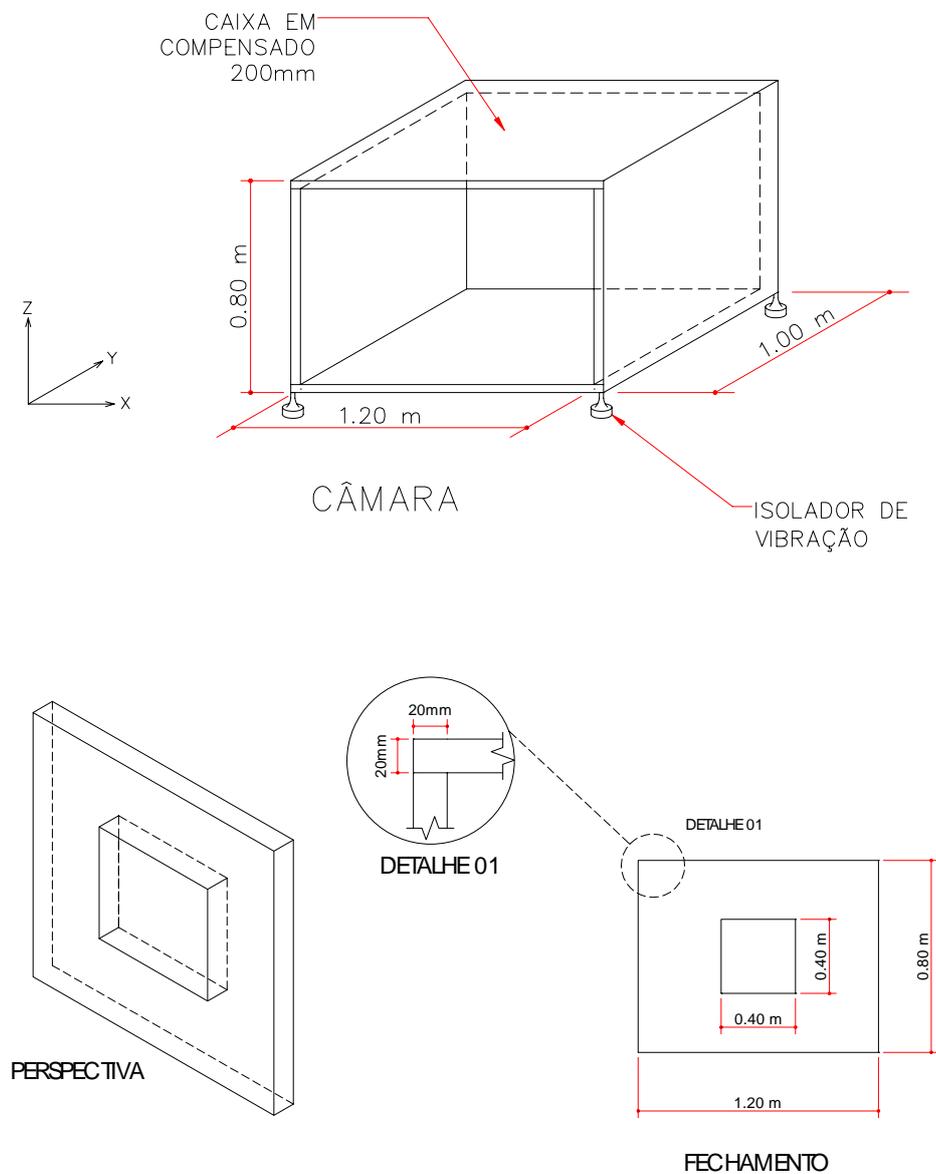


Figura 4.1 – Desenho Esquemático da Mini-Câmara.

Tabela 4.1 – Relações de dimensões recomendadas para câmaras reverberantes.

L_x / L_z	0,83	0,83	0,79	0,68	0,70
L_y / L_z	0,47	0,65	0,63	0,42	0,59

Fonte: Adaptada de (ISO-3741, 1999)

4.2 ESCALA SELECIONADA PARA A MINI-CÂMARA

Após vários estudos sobre modelos reduzidos, decidiu-se trabalhar na escala de 1:6. Sabe-se que quanto maior a escala, maior a frequência do campo sonoro a ser simulado. Nascimento (2005) relata que o campo sonoro deve ser simulado com n vezes a frequência da sala original. Entretanto, neste trabalho as medições não levaram em consideração o fator de escala para as frequências analisadas, ou seja, as medições foram realizadas com frequências nas bandas de oitava entre 125 Hz e 4 kHz.

Tomando por base uma Câmara Reverberante real, de volume igual a 207,36 m³, as recomendações descritas anteriormente e o fator de escala 1:6, as dimensões da mini-câmara e da câmara real são apresentadas no conjunto de tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, juntamente com as relações entre as dimensões e também o comprimento da maior linha reta no interior da mini-câmara.

Tabela 4.2 – Dimensões Principais em m da Câmara Real e da Mini-Câmara.

Dimensões de uma Câmara real		Dimensões da Câmara Reverberante em Escala Reduzida	
Escala Real		Escala (1:6)	
Altura	4,80	Altura	0,80
Comprimento	7,20	Comprimento	1,20
Largura	6,00	Largura	1,00
Área Total (m ²)	213,12	Área Total (m ²)	5,92
Volume (m ³)	207,36	Volume (m ³)	0,96

Tabela 4.3 – Relação entre duas dimensões na mini-câmara.

Relação entre duas dimensões na mini-câmara	
Altura/Comprimento	0,67
Largura/Comprimento	0,83

Tabela 4.4 – Comprimento da maior linha reta interna da mini-Câmara.

Comprimento da maior linha reta interna da mini-Câmara	
$L_{max} <$	0,61

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DA MINI-CÂMARA

O material a ser utilizado na confecção de uma mini-câmara reverberante deve ser tão duro e reflexivo quanto possível. Por outro lado, tendo por base a disponibilidade e acessibilidade na região, optou-se por usar o compensado de 20 mm de espessura, para o piso, paredes e teto, uma vez que este material apresenta baixo custo, é fácil de ser trabalhado e, como foi constatado na pesquisa bibliográfica realizada, foi utilizado com êxito em vários outros trabalhos.

Uma das características investigadas do compensado foi o isolamento que se mostrou razoável para esta utilização, como mostra a Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Isolamento sonoro fornecido pelo compensado.

MATERIAL	DENSIDADE (kg/m ³)	ISOLAMENTO (dB)					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2 kHz	4 kHz
Compensado (19 mm)	11	17	18	25	30	26	32

Fonte: López (1992)

A densidade superficial do compensado, para espessura em mm, é em média de 0,6 kg/m³. Assim, como está se trabalhando com placas de 20 mm de espessura,

essa densidade é de 12 kg/m^3 . Com essa espessura, alcança-se uma perda de transmissão média de 25 dB, aproximadamente, variando com a faixa de frequência.

Para a construção, outros elementos foram necessários para fixação das partes, acesso visual e físico ao interior da mini-câmara, isolamento de vibração, etc., os quais são relacionados a seguir:

- Folhas de Compensado de 20 mm (2 folhas);
- Folhas de Vidro de 5 mm com dimensões de 40 mm x 40 mm (2 folhas);
- Cola Branca para Madeira e Cola para Borracha;
- Silicone;
- Pregos Finos;
- Parafusos (Tipo Francês de 1/4");
- Lixa nº 80;
- Borracha isolante;
- Isoladores de Vibração (Linha Micro II);
- Tiras de Madeira (Cedro);
- Porcas e arruelas;
- Conexões tipo Speakon e BNC;

4.4 MONTAGEM DA MINI-CÂMARA

O processo de construção da mini-câmara foi desenvolvido em várias etapas, as quais são descritas resumidamente a seguir.

4.4.1 Primeira Etapa - Dimensionamento e Corte do Compensado

Depois de definidas todas as dimensões da mini-câmara, as folhas de compensado adquiridas necessitaram ser cortadas para a obtenção das paredes, teto e piso, dando origem aos seguintes cortes:

Corte A: refere-se ao corte de 0,8 m x 1,2 m, totalizando duas folhas desta dimensão (uma para a parede do fundo e outra para a parede da frente da mini-câmara).

Corte B: refere-se ao corte de 0,8 m x 1 m, totalizando duas folhas desta dimensão (uma para a parede lateral esquerda e outra para a parede lateral direita da mini-câmara).

Corte C: refere-se ao corte de 1 m x 1,2 m, totalizando duas folhas desta dimensão (uma para o teto e outra para o piso da mini-câmara).

Na parede da frente da mini-câmara foi introduzida uma pequena janela para permitir a visualização do interior da câmara, gerando o **Corte A'**, que diz respeito ao quadrado de lado igual a 0,40 m, a fim de alojar as folhas de vidro.

4.4.2 Segunda Etapa – Montagem da Mini-Câmara

Com as partes de compensado já cortadas, deu-se início ao processo de montagem da câmara. Primeiramente, os pedaços de compensado foram unidos através do uso de cola de madeira ('cola branca') e de silicone (para vedação das junções dos compensados). Em seguida, a junção de cada parte foi consolidada com a fixação de pregos finos, aumentando a confiabilidade da fixação e a

estabilidade das paredes. A Fig. 4.2 mostra a mini-câmara ainda em fase de montagem.



Figura 4.2 – Mini-Câmara em Fase de Montagem.

4.4.3 Terceira Etapa – Instalação de Tiras de Cedro

Nesta etapa foram utilizadas tiras de madeira com dimensões de 0,03 m x 0,04 m x 1,26 m e 0,03 m x 0,04 m x 0,86 m para o acoplamento da tampa (frente da câmara) e para a instalação dos isoladores de vibração. Essas tiras de madeira foram fixadas com parafusos de ¼” de diâmetro, com porcas e arruelas, de modo a ficar no mesmo nível do compensado, a fim de facilitar a montagem e desmontagem da tampa. A Fig. 4.3 mostra o quadro montado com as tiras de madeira.



Figura 4.3 – Quadro de Madeira de Cedro Montado.

4.4.4 Quarta Etapa – Instalação das Folhas de Vidro na Parede Frontal

Foram instaladas duas folhas de vidro separadas por um espaço de ar, permitindo alcançar uma perda de transmissão entre 25 e 50 dB, aproximadamente. Esses valores estão sujeitos ao tipo de vidro que será utilizado.

A Tab. 4.6 fornece valores do isolamento sonoro de alguns tipos de vidro com uma única chapa.

Tabela 4.6 – Isolamento sonoro fornecido pelo vidro.

MATERIAL	DENSIDADE (kg/m ²)	ISOLAMENTO (dB)					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
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 (1992)

A densidade superficial do vidro é em média 2,5 kg/m² por mm de espessura. A placa de 5 mm que foi utilizada neste trabalho tem, portanto, densidade de 12,5 kg/m³.

No corte quadrado realizado na parede frontal da mini-câmara (janela de visualização) foram instaladas duas folhas de vidro de espessura igual a 5 mm, distantes uma da outra de 10 mm, criando uma cavidade acústica preenchida de ar entre as mesmas, objetivando, assim, aumentar a perda de transmissão sonora, de modo a não permitir vazamento acústico. A Fig. 4.4 mostra a parte frontal da mini-câmara já com os vidros montados.



Figura 4.4 – Parede Frontal com a Janela de Visualização Montada.

4.4.5 Quinta Etapa – Instalação das Borrachas de Vedação

De modo a não permitir vazamento acústico do interior da câmara pela parte frontal da mini-câmara (porta de acesso), foi fixada, ao longo de todo o perímetro do retângulo de acoplamento da tampa, uma tira de borracha isolante utilizando cola PVC, uma vez que esta não agride quimicamente a borracha. Detalhes desta fixação podem ser visualizados através da Fig. 4.5.



Figura 4.5 – Câmara em Fase de Montagem com a Borracha Instalada.

4.4.6 Sexta Etapa – Instalação dos Isoladores de Vibração

De forma ideal, não deve haver transmissão de vibrações para as paredes da mini-câmara através da estrutura de suporte, uma vez que estas vibrações irão fazer com que haja irradiação sonora pelas paredes da mini-câmara, contaminando as

medições realizadas no seu interior. Assim, foram instalados quatro isoladores de vibração, confeccionados de borracha natural macia, de acordo com o catálogo do fabricante (Isolador de vibração da linha Micro, tipo Micro II). Esses isoladores foram primeiramente fixados em tiras de madeira com 0,03 m x 0,04 m x 1,26 m e esta tira foi posteriormente fixada no piso da mini-câmara, tal que a superfície do piso ficasse perfeitamente paralela à estrutura de suporte. A Fig. 4.6 mostra uma foto dos quatro isoladores usados e a Fig. 4.7 mostra a mini-câmara apoiada nos isoladores.



Figura 4.6 – Isoladores de Vibração Linha Micro, tipo Micro II.



Figura 4.7 – Mini-Câmara com os Isoladores Instalados.

A seguir, tem-se uma verificação dos dados característicos fornecidos pelo fabricante, referentes ao isolador utilizado, conforme a Tab. 4.7.

Tabela 4.7 – Dados característicos do isolador.

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

O amortecimento do isolador utilizado, em condições normais de uso na ausência de produtos químicos, pode atingir valores de 50 a 85%.

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

4.4.7 Sétima Etapa – Instalação da Fonte Sonora

A fonte sonora instalada no interior da câmara é representada pelo alto-falante modelo MD BASS 6MB1, de 15” de diâmetro, do fabricante Selenium, fixado em um triângulo de madeira de modo a ficar fixo em um dos cantos do interior da câmara. A Fig. 4.8 mostra com mais detalhes a fonte sonora.



Figura 4.8 – Fonte sonora instalada.

CAPÍTULO V – MEDIÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido à não existência de uma norma específica para medição de absorção sonora em câmaras reverberantes em escala reduzida, a fase experimental deste trabalho foi realizada seguindo exigências da norma ISO 354 que é o documento internacional disponível para medição de absorção sonora em câmaras reverberantes.

5.2 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

O equipamento de recepção para medição do TR segundo a norma ISO 354, deve consistir de um ou mais microfones não direcionais tanto quanto possível, os amplificadores necessários, filtros e um sistema de medição para o TR .

As medições foram feitas em bandas de oitava. O campo sonoro na câmara deve ser permanente e apresentar um espectro contínuo em toda faixa de frequência analisada. Desta forma, utilizou-se ruído rosa como sinal de excitação, o qual possui energia constante por unidade de largura da banda, independentemente da frequência.

O tempo de reverberação T_1 (sem amostra) e T_2 (com amostra) depende da difusividade do campo sonoro e da localização da amostra na câmara. Deste modo, é possível a ocorrência de resultados diferentes, obtidos de ensaios da mesma amostra em câmaras diferentes. Também é possível obter o coeficiente de absorção sonora maior que um ($\alpha > 1$) devido às variações estatísticas dos seguintes parâmetros: campo sonoro na câmara, posição da amostra, posição dos microfones e fontes. Neste caso, o coeficiente de absorção é considerado unitário.

Dentre os parâmetros a serem medidos, o TR é um dos mais importantes, pois medido este parâmetro é possível calcular a absorção sonora da sala com e sem a

amostra de teste e, por fim, adquirir o coeficiente de absorção das amostras testadas.

De uma forma geral, os tempos de reverberação da câmara sem e com amostra de teste e o nível de pressão sonora (*NPS*), são os parâmetros a serem medidos.

5.2.1 Equipamentos Utilizados

O sistema de gravação deve ser um gravador de nível ou qualquer outro equipamento adequado para determinar a inclinação média da curva de decaimento do *TR* correspondente. Dessa forma, foi utilizado um microcomputador, um analisador dinâmico de sinais (Ruído e Vibração) da Bruel and Kjaer tipo 3560C, com dois canais de saída e quatro canais de entrada, um microfone de campo difuso da Bruel and Kjaer tipo 4942A, uma fonte sonora sendo representada pelo alto-falante modelo MD BASS 6MB1 de 6" de diâmetro do fabricante Selenium e um amplificador modelo TP500, do fabricante 1hc Punch.

5.2.2 Apresentação dos Resultados

Os valores encontrados para o *TR* e *NPS* da sala e o coeficiente de absorção sonora de uma amostra de teste devem ser apresentados em forma de tabela e na forma gráfica.

5.2.3 Medição do *TR*

O tempo de reverberação *TR* é o principal mensurando na medição de absorção sonora de materiais em câmaras reverberantes. De uma forma geral, a norma ISO 354 descreve dois métodos de medição do *TR*: o método do ruído e o método da resposta impulsiva integrada.

No primeiro método (o mais utilizado pelos laboratórios de acústica no Brasil) como lembra o texto da norma ISO 354, o *TR* é fruto de um processo estatístico. Muitas médias são necessárias para se manter a repetitividade dentro de uma faixa

aceitável. Já o método da resposta impulsiva integrada é um método essencialmente determinístico: não exige médias das curvas de decaimento, mas em contrapartida exige equipamentos normalmente mais sofisticados, embora hoje em dia possam ser substituídos por microcomputadores e *softwares*.

Os procedimentos para medição deste parâmetro foram baseados na ISO 354, cujo princípio é fundamentado no registro do tempo de decaimento referente a 60 dB quando a fonte sonora em regime permanente é cessada. A Fig. 5.1 fornece um exemplo do registro do decaimento da amostra de Fibra de Coco de 100 mm de espessura com densidade de 130 kg/m³, para a frequência de 1 kHz. A medição do *TR* foi realizada através do *software* Pulse Labshop 9.0.

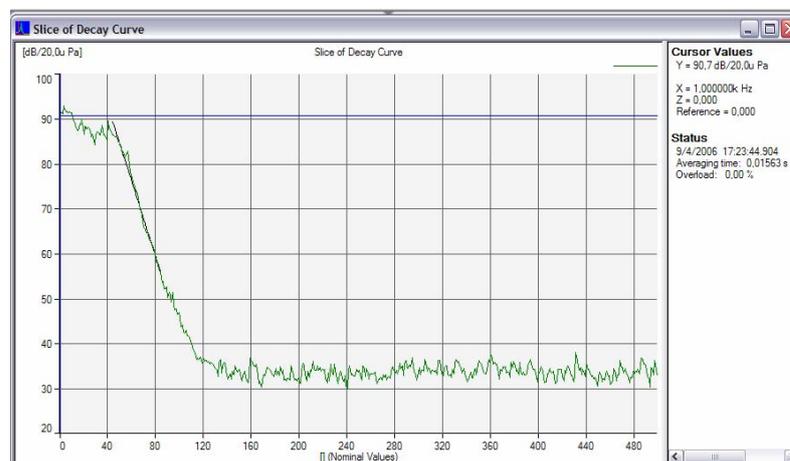


Figura 5.1 Curva de decaimento da pressão sonora para a banda de 1 kHz na determinação do tempo de reverberação.

5.2.4 Posições do Microfone e da Fonte Sonora na Câmara e Número de Curvas de Decaimento

Segundo o texto atual da norma ISO 354, as posições do microfone devem estar separadas por pelo menos 1,5 m, distantes 2,0 m das posições da fonte e 1,0 m afastadas de quaisquer superfícies da câmara. Pelo menos duas posições de fonte devem ser utilizadas. Embora nenhuma sugestão para localização da fonte sonora esteja disponível na ISO 354, é muito comum se instalar a fonte sonora nos cantos da sala, uma vez que nessa posição a probabilidade de inúmeros modos acústicos da sala serem excitados é maior que nas demais. Para a câmara

reverberante em escala reduzida esses valores de distância também deverão estar em escala. Em virtude disso, as posições do microfone devem estar separadas por pelo menos 0,25 m, distantes 0,33 m das posições da fonte e 0,17 m afastadas de quaisquer superfícies da câmara. A Fig 5.2 mostra a localização exata da fonte e as posições do microfone dentro da câmara e a Tab. 5.1 mostra as coordenadas dos pontos de medições.

Foi utilizada apenas 1 (uma) posição de fonte e 12 (doze) posições de microfone para as medições do planejamento experimental da câmara.

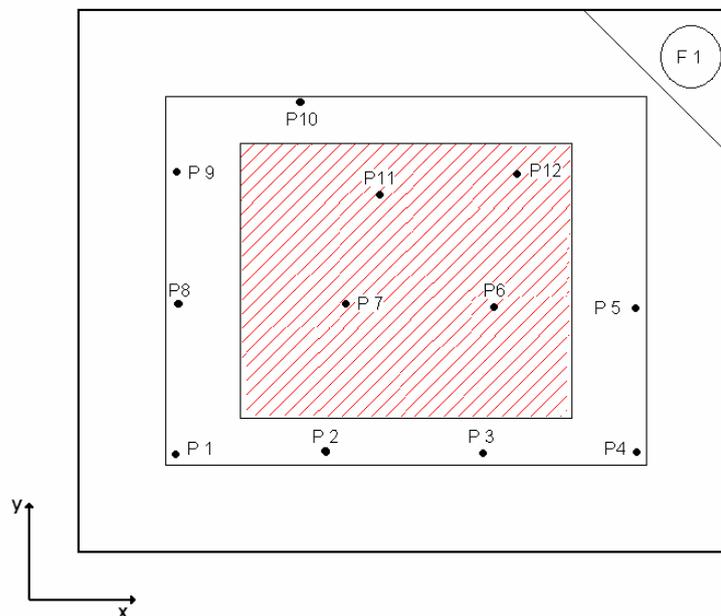


Figura 5.2 – Pontos de medição no interior da câmara

Tabela 5.1 – Coordenadas dos pontos de medições.

PONTO	Dimensão x (m)	Dimensão y (m)	Dimensão z (m)
1	0,17	0,17	0,30
2	0,46	0,17	0,45
3	0,74	0,17	0,30
4	1,02	0,17	0,45
5	1,02	0,42	0,35
6	0,74	0,42	0,40
7	0,46	0,42	0,30
8	0,17	0,42	0,45
9	0,17	0,66	0,35
10	0,39	0,83	0,40
11	0,60	0,66	0,45
12	0,81	0,66	0,30

5.2.5 Determinação das Condições Ambientais na Câmara

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 o coeficiente de absorção sonora do ar. Sabe-se também que, normalmente, a absorção sonora do ar deve ser considerada. Entretanto, para salas pequenas, como no caso da câmara reverberante em escala reduzida, a absorção do ar é negligenciada, especialmente em baixas frequências.

5.2.6 Geração do Campo Sonoro na Câmara

O campo sonoro na câmara deve ser permanente e apresentar um espectro contínuo em toda faixa de frequência analisada. Sendo assim, foi utilizado ruído rosa como excitação do tipo banda larga.

É recomendável, ao se utilizar uma fonte sonora simples, o uso de no mínimo duas posições de fonte distintas, o que não foi possível devido à utilização de uma fonte fixa num dos cantos da câmara.

5.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Antes de se começar o procedimento de medição, faz-se necessário um planejamento experimental das medições que serão realizadas, pois através deste é possível representar um conjunto de ensaios estabelecidos de acordo com as determinações das normas e com critérios científicos.

Este planejamento tem como objetivo determinar a influência de determinados fatores nos resultados dos processos experimentais, como por exemplo, o número de posições de um microfone durante um ensaio.

Para este projeto, o objetivo maior está relacionado à influência do número de posições da fonte sonora assim como o número de posições dos microfones nos resultados experimentais. Através do estudo da influência do número de posições destes instrumentos pretende-se fazer, quando for possível, uma redução do número de ensaios e, conseqüentemente, do tempo de análise sem prejudicar a qualidade da informação adquirida.

Considerando o volume recomendado de 200 m³ para novas câmaras reverberantes e a necessidade da instalação de pelo menos 15 m² de difusores estáticos, o número de posições possíveis de microfone é bastante limitado.

A norma ISO 354 estabelece que sejam obtidos doze decaimentos para cada uma das seis combinações de fonte/microfone. Como se utilizou apenas uma posição de fonte, determinou-se então 12 (doze) posições de microfone, ou seja, doze combinações de fonte/microfone. Assim, para cada uma dessas doze combinações foram medidos dois decaimentos, ou seja, obteve-se um total de 24 (vinte e quatro) decaimentos, dois para cada ponto de medição.

De posse desses resultados, calculou-se a média dos 2 (dois) decaimentos para cada ponto e em seguida obteve-se a média para todos os 12 (doze) pontos, a média para 10 (dez) pontos, 8 (oito) pontos e 6 (seis) pontos. Dessa forma, foi constatado que os valores dos *TR* médios tanto para doze quanto para seis pontos não apresentaram diferenças significativas. Logo, optou-se por usar apenas 6 (seis) para a média do *TR*, reduzindo assim o tempo de ensaio de cada amostra.

A Tab. 5.2 mostra os tempos de reverberação medidos e seus valores médios por banda de oitava.

Tabela 5.2 – Média do TR no Planejamento Experimental.

PONTO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
1	0,879	1,069	0,958	0,635	0,702	0,764	0,600
2	0,859	1,180	0,804	0,621	0,707	0,773	0,687
3	0,846	1,215	0,798	0,624	0,666	0,701	0,584
4	0,843	0,852	0,858	0,633	0,695	0,748	0,569
5	0,842	1,084	0,804	0,848	0,728	0,714	0,614
6	0,869	1,358	0,844	0,654	0,684	0,757	0,616
7	0,842	1,206	0,831	0,739	0,667	0,696	0,700
8	0,844	1,068	0,845	0,766	0,697	0,753	0,591
9	0,843	1,031	0,864	0,739	0,669	0,720	0,606
10	0,852	0,882	0,814	0,669	0,675	0,728	0,597
11	0,839	1,381	0,815	0,652	0,655	0,695	0,615
12	0,827	1,033	0,856	0,631	0,673	0,710	0,635
TR Médio 12 Pontos	0,85	1,11	0,84	0,68	0,69	0,73	0,62
TR Médio 10 Pontos	0,85	1,11	0,84	0,69	0,69	0,73	0,62
TR Médio 8 Pontos	0,85	1,09	0,84	0,69	0,69	0,73	0,63
TR Médio 6 Pontos	0,85	1,11	0,85	0,70	0,68	0,72	0,62

5.4 QUALIFICAÇÃO DA MINI-CÂMARA

Utilizou-se o procedimento descrito no anexo A da ISO 354 – Difusão do Campo Sonoro em Sala Reverberante, para localização e quantidade dos difusores. O procedimento de qualificação da câmara reverberante em escala reduzida iniciou-se com a confecção de painéis difusores feitos a partir de tubos de PVC de 200 mm e 100 mm de diâmetro externo cortados em 4 (quatro) partes iguais, como mostrado na Fig. 5.3, assim têm-se placas já curvadas que seriam os painéis difusores.



Figura 5.3 – Difusores estáticos.

No caso dos difusores, existe a necessidade da instalação de pelo menos $0,134 \text{ m}^2$ (já em escala) de difusores estáticos, tal como recomendado pela ISO 354. Nesta câmara, utilizou-se $0,218 \text{ m}^2$ de difusores para a qualificação da câmara. Esses painéis foram instalados de forma aleatória no teto da mini-câmara como pode ser visto na Fig. 5.4.



Figura 5.4 – Difusores estáticos instalados.

A Fig. 5.5 mostra como os pontos foram indicados no interior da câmara após ser feito o planejamento experimental e a Tab. 5.3 mostra as coordenadas desses pontos.

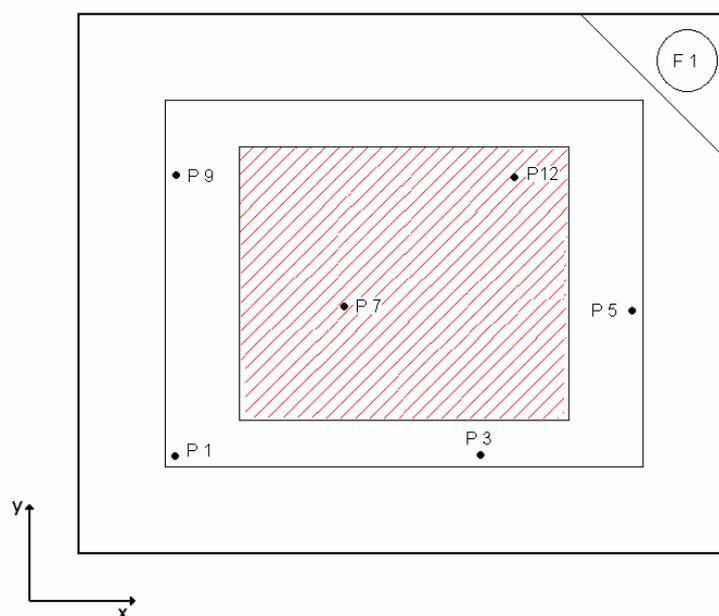


Figura 5.5 – Pontos de medição após o Planejamento Experimental.

Tabela 5.3 – Coordenadas dos pontos de localização do microfone.

PONTO	Dimensão x (m)	Dimensão y (m)	Dimensão z (m)
1	0,17	0,17	0,30
3	0,74	0,17	0,30
5	1,02	0,42	0,35
7	0,46	0,42	0,30
9	0,17	0,66	0,35
12	0,81	0,66	0,30

Utilizou-se uma amostra de espuma comercial (SONEX – Placa Flexonic 35x35) para os testes de qualificação. Foram feitas medições de *TR* sem difusores e após cada instalação de um novo grupo de difusores, calculou-se o coeficiente de absorção sonora por banda de frequência dessa amostra como mostrado na Fig. 5.6. Por fim, calculou-se a média dos coeficientes de absorção sonora das faixas entre 500 e 4000 Hz e representou-se graficamente esses valores em função dos números de difusores usados em cada caso, como recomenda o anexo A da norma ISO 354.

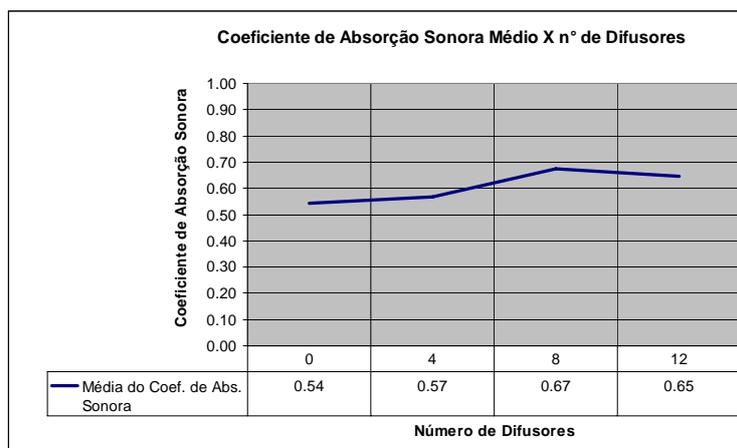


Figura 5.6 Gráfico da média do Coeficiente de Absorção Sonora nas faixas de 500 Hz a 4 kHz pelo número de difusores.

No gráfico da Fig. 5.6 percebe-se que houve um aumento no coeficiente de absorção sonora médio após a instalação do primeiro e do segundo grupo difusores, mas após a instalação do terceiro grupo de difusores esses valores não apresentam mais tendência de crescimento. Portanto, optou-se por 12 (doze) placas difusoras, conforme especificações da norma ISO 354.

5.4.1 Área de Absorção Sonora Equivalente da Câmara Reverberante em Escala Reduzida

A área de absorção sonora equivalente da câmara sem a amostra de teste não deve ultrapassar os valores da Tab. 5.4 para volumes de 200 m³. Caso a câmara tenha um volume diferente de 200 m³, os valores da tabela devem ser multiplicados pelo fator $(V/200)^{1/3}$. Para a câmara reverberante em escala reduzida, esse fator já calculado é de 0,17.

Tabela 5.4 – Valores máximos da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante sem amostra.

Freqüência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m ²)
125	6,5
250	6,5
500	6,5
1000	7,0
2000	9,5
4000	13,0

Fonte: Adaptada de (ISO-354, 1999)

Os valores encontrados para a mini-câmara já multiplicados pelo fator 0,17 estão descritos na Tab. 5.5 abaixo.

Tabela 5.5 – Valores máximos da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante em escala reduzida sem amostra.

Freqüência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m ²)
125	1,105
250	1,105
500	1,105
1000	1,19
2000	1,615
4000	2,21

Após os resultados medidos, calculou-se a média dos valores de TR para cada banda de frequência e com essa média calculou-se a área de absorção sonora equivalente da mini-câmara sem amostra, utilizando-se a formulação proposta por Sabine contida na norma ISO-354 que é dada por:

$$A_1 = \frac{0,161.V}{T_1} - 4Vm_1 \quad (5.1)$$

Onde V é o volume da câmara em m^3 , T_1 é o TR da câmara sem amostra de teste, m_1 é o coeficiente de absorção do ar em m^{-1} , calculado de acordo com a norma ISO 9613-1 (1993) e ISO 9613-2 (1996), para as condições ambientais da câmara sem amostra.

Os valores de área de absorção sonora equivalente de cada banda, são mostrados na Tab. 5.6 a seguir.

Tabela 5.6: Valores máximos calculados da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante em escala reduzida sem amostra.

Frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m^2)
125	0,182
250	0,182
500	0,182
1000	0,196
2000	0,266
4000	0,364

5.5 CÁLCULO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA DA FONTE (NWS)

O cálculo do NWS da fonte foi feito utilizando a formulação abaixo, descrita na norma ISO-3741.

$$NWS = NPS + 10 \log V - 10 \log T - 14 + 10 \log \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) \quad (5.2)$$

Onde, NPS é o nível de pressão sonora por banda de frequência, V é o volume da câmara, T é o tempo de reverberação para cada banda de frequência, S é a área da superfície interna da câmara e λ é o comprimento de onda para cada banda.

A partir dos valores de níveis de pressão sonora (NPS) obtidos experimentalmente (ver Tab. 5.7), juntamente com outros parâmetros de que já se dispunha, pôde-se obter o NWS da fonte sonora (ver Tab. 5.8).

Tabela 5.7 NPS experimental para o cálculo do NWS da fonte.

	125	250	500	1k	2k	4k	8k
P1	99,0	99,8	91,1	90,4	89,1	85,8	76,1
P2	94,9	96,0	88,6	90,7	88,7	87,0	75,7
P3	95,2	96,4	92,8	90,6	88,9	86,8	75,2
P4	99,9	99,9	88,8	91,7	89,4	86,5	75,6
P5	98,5	91,6	91,0	91,9	90,0	87,0	75,0
P6	92,0	91,5	90,7	90,7	89,7	86,8	76,4
P7	90,4	92,4	90,4	90,5	89,2	88,0	76,1
P8	98,2	93,7	91,8	90,3	89,4	87,6	75,7
P9	98,9	95,7	90,6	90,4	89,5	87,2	76,3
P10	96,6	94,8	90,0	89,8	88,8	86,7	75,2
P11	88,1	94,9	90,6	91,9	89,6	88,0	76,2
P12	94,9	92,8	91,5	92,1	90,6	88,0	77,7

Tabela 5.8 Valores de NWS da fonte.

125	250	500	1k	2k	4k	8k
88,7	85,0	79,2	79,9	78,1	75,5	64,7

5.6 MATERIAIS TESTADOS NA MINI-CÂMARA

5.6.1 – Comentários iniciais

Inicialmente, testaram-se materiais comerciais, os quais apresentam valores de coeficiente de absorção sonora, por banda de frequência, fornecidos por seus fabricantes. Em seguida, compararam-se esses valores com os medidos na mini-câmara. Após essas comparações verificou-se a validade da metodologia utilizada e o dimensionamento da mini-câmara.

As amostras escolhidas para estudo foram confeccionadas em forma de uma manta retangular de 0,60 m x 0,50 m que é o tamanho recomendado para as amostras, já em escala reduzida. Foram utilizados dois tipos de material: duas amostras de um material comercial e 6 amostras de fibra de coco, conforme mostrado na Tab. 5.9 abaixo:

Tabela 5.9 – Lista de materiais testados na câmara reverberante em escala reduzida.

SIGLA	Material
SNX1	Sonex Placa Flexonic 20x35
SNX2	Sonex Placa Flexonic 35x35
FC1	Manta de Fibra de Coco com densidade de 18 kg e espessura de 50 mm
FC2	Manta de Fibra de Coco com densidade de 60 kg e espessura de 50 mm
FC3	Manta de Fibra de Coco com densidade de 130 kg e espessura de 50 mm
FC4	Manta de Fibra de Coco com densidade de 18 kg e espessura de 100 mm
FC5	Manta de Fibra de Coco com densidade de 60 kg e espessura de 100 mm.
FC6	Manta de Fibra de Coco com densidade de 130 kg e espessura de 100 mm.

5.6.2 SONEX – Flexonic

O SONEX flexsonic é um material comercial que mantém as cunhas anecóicas para a adequação técnica de estúdios de som e voz, assim como de ambientes industriais. Pode ser aplicado em paredes e tetos, compondo com o visual técnico do ambiente. Contribui na adequação acústica de ambientes industriais para o cumprimento das legislações de conforto ambiental.

Esta amostra é composta de poliuretano expandido flexível, especialmente formulada na densidade 30 kg/m³, aditivado com agentes para redução da propagação de chama (norma FMVSS 302/1999 '*Determination of burning behaviour of interior materials*'), com superfície esculpida em cunhas anecóicas, com dimensões de 20 mm x 30 mm. Quanto à absorção acústica, o gráfico da Fig. 5.7 reproduz os valores alcançados em medições de absorção sonora em câmara reverberante, realizadas pelo método descrito na norma internacional ISO 354 em laboratório normalizado (dados do fabricante).

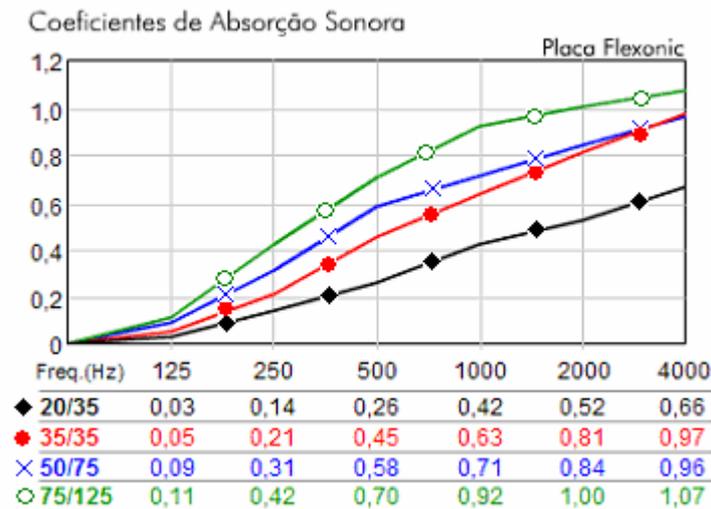


Fig. 5.7 – Coeficientes de Absorção Sonora dos materiais comerciais.

5.6.3 Coeficientes de Absorção Sonora das Amostras

Os gráficos mostrados nas Figs. 5.8 e 5.9 indicam os valores por banda de oitava dos coeficientes de absorção sonora da amostra SNX 1 e SNX 2 comparando-as com os valores fornecidos pelo fabricante desses materiais e a Fig. 5.10 apresenta a comparação entre esses coeficientes para as duas amostras.

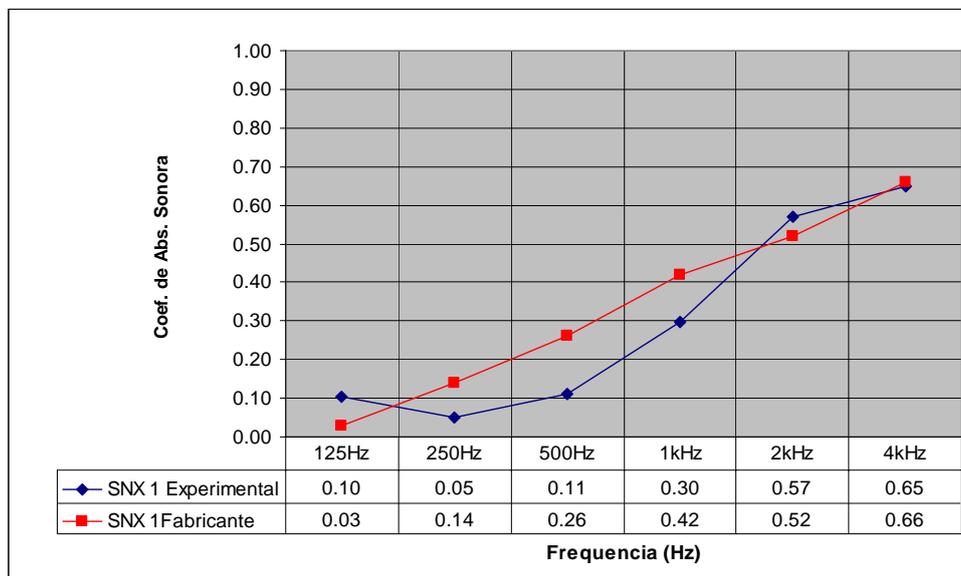


Figura 5.8 – Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora do SNX 1.

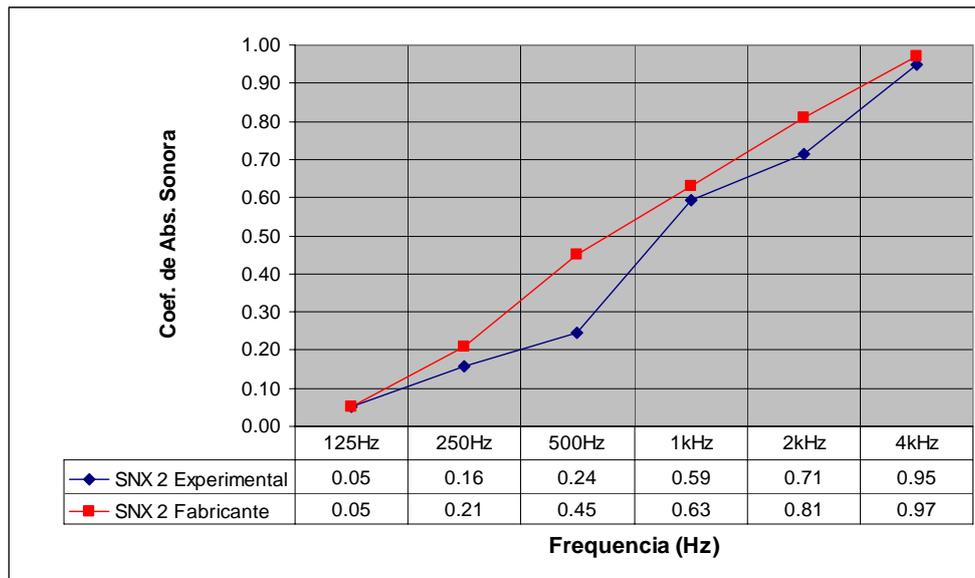


Figura 5.9 – Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora do SNX 2.

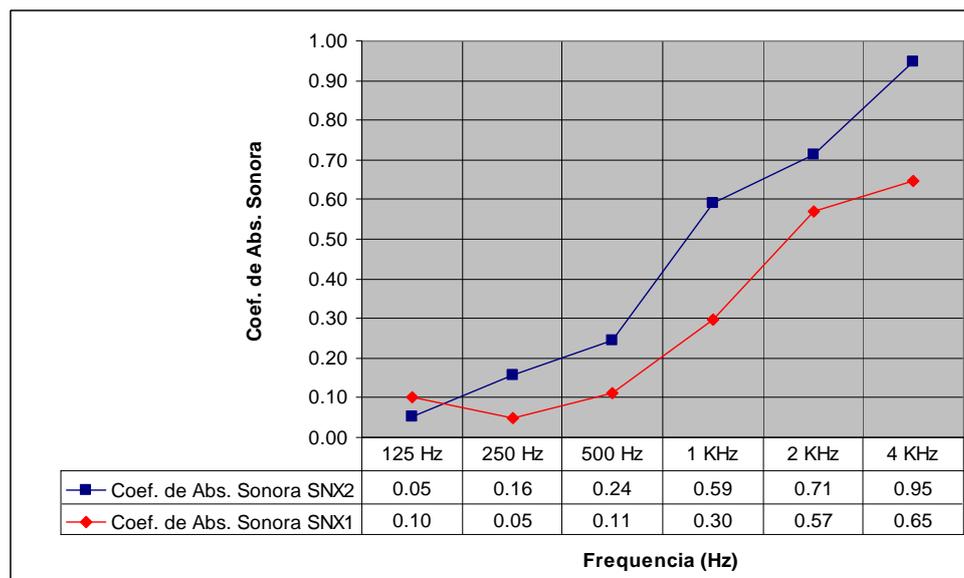


Figura 5.10 – Comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora do SNX 1 e SNX 2 medidos experimentalmente.

5.6.4 FIBRA DE COCO

Foram ensaiadas amostras de fibra de coco com duas espessuras: 50 mm e 100 mm e com três densidades diferentes (18 kg/m³, 60 kg/m³ e 130 kg/m³). Em seguida, foram calculados os valores de coeficiente de absorção sonora desses

materiais por banda de freqüência e plotados os gráficos comparando as três densidades usadas, como mostrado nas Figs. 5.12, 5.14 e 5.15 a seguir.



Figura 5.11 – Amostra de fibra de coco com espessura de 50 mm e com densidade 130 kg/m³.

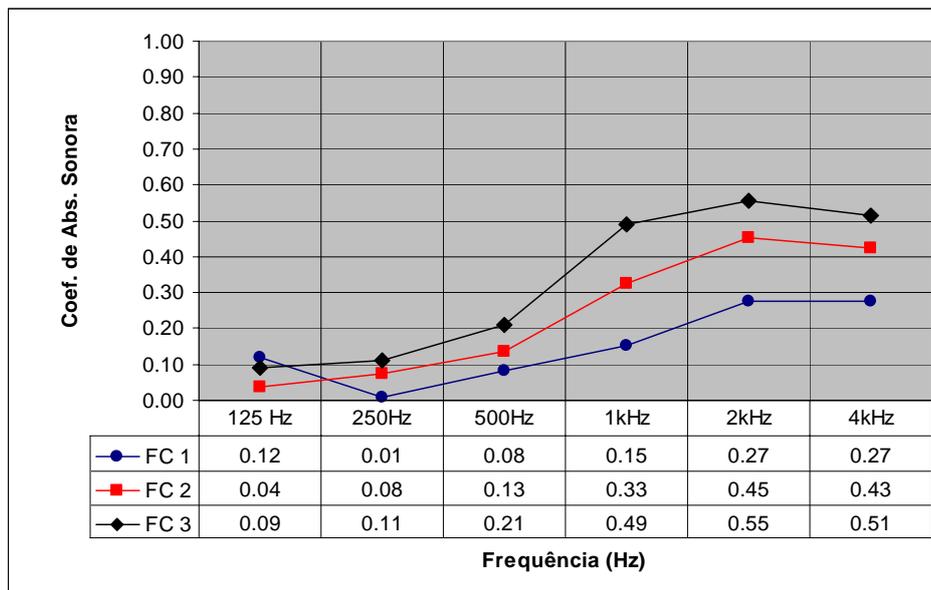


Figura 5.12 – Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora das mantas FC1, FC2 e FC3.



Figura 5.13 – Amostra de fibra de coco com espessura de 100 mm e com densidade 130 kg/m³.

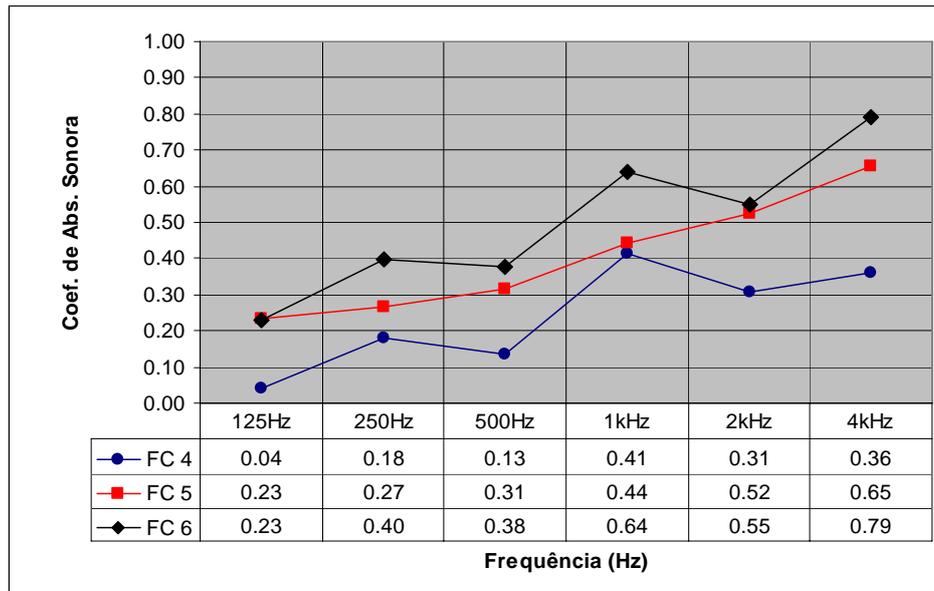


Figura 5.14 – Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora das mantas FC4, FC5 e FC6.

A Fig. 5.15 abaixo mostra os valores de coeficiente de absorção sonora de todas as amostras de fibra de coco testadas.

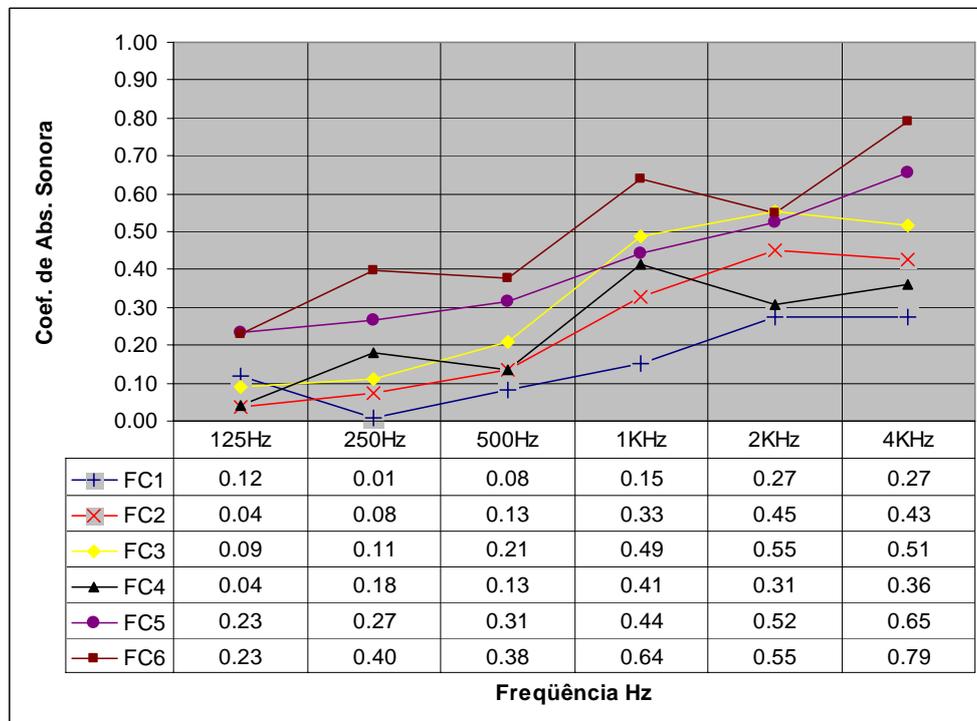


Figura 5.15 – Gráfico de comparação dos Coeficientes de Absorção Sonora das mantas FC1, FC2, FC3, FC4, FC5 e FC6.

5.6.5 Níveis de Pressão Sonora (NPS) da Câmara

Além das medições de TR que serviram para calcular os valores de coeficientes de absorção sonora desses materiais, foram medidos também os níveis de pressão sonora com dois tipos de materiais diferentes: o SNX2 e a FC6 para se ter uma idéia do comportamento acústico e o campo de pressão no interior da câmara.

5.6.6 Câmara sem Amostra

Primeiramente fizeram-se medições sem amostra de teste e os gráficos das Figs. 5.16 e 5.17 mostram, respectivamente, os valores de NPS e Coeficiente de Absorção Sonora da câmara sem amostra. Em seguida, utilizaram-se duas amostras distintas para os testes.

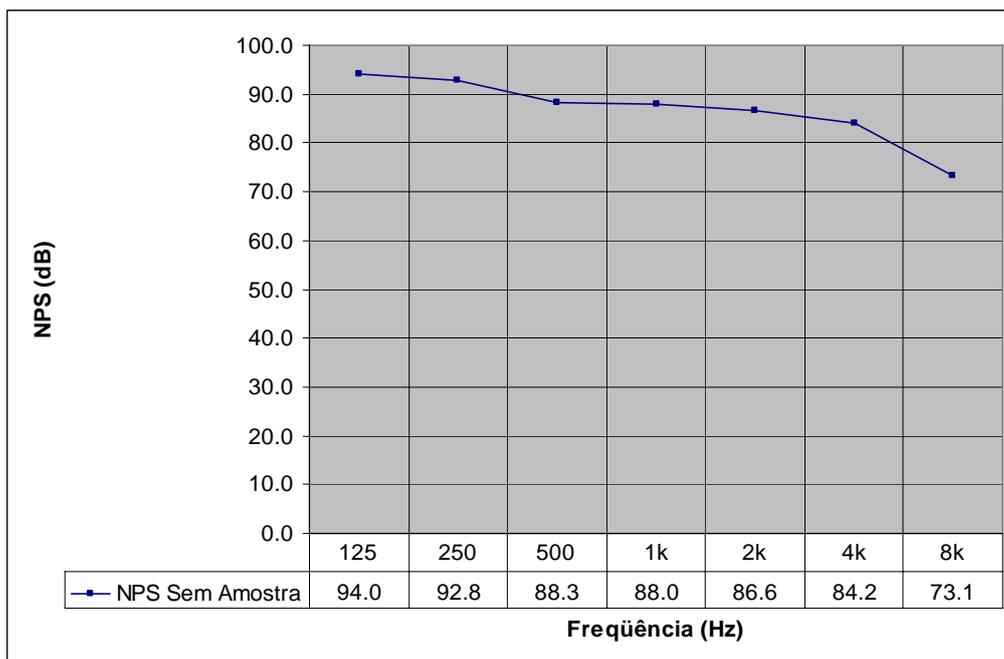


Figura 5.16 – Gráfico do NPS experimental da câmara sem amostra.

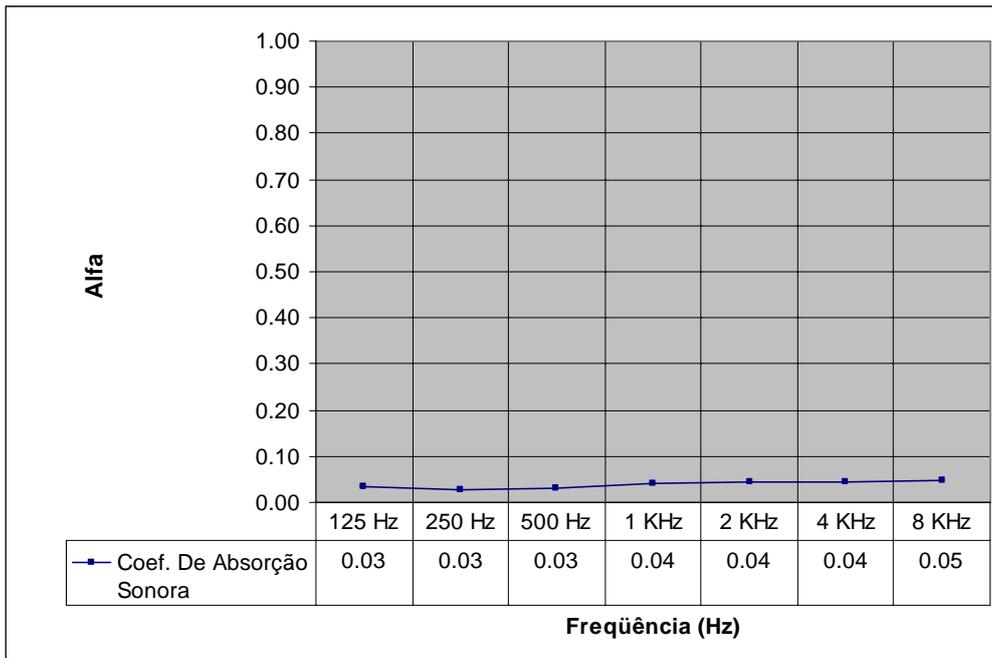


Figura 5.17 – Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora das paredes da câmara (sem amostra).

5.6.7 Câmara com amostra SNX2

Para essa amostra foram feitas medições com três posições diferentes da amostra no piso da câmara e ainda uma medição com a geometria diferente da amostra.

5.6.7.1 Amostra SNX2 na Posição 1

Amostra no centro da câmara (ver Fig. 5.18).

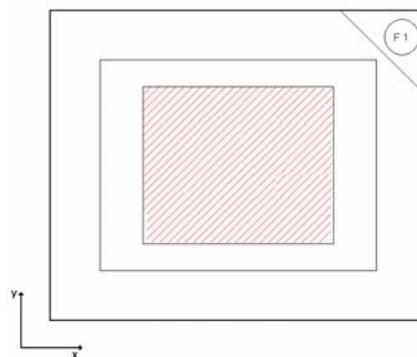


Figura – 5.18 Amostra na Posição 1.

O gráfico da Fig. 5.19 apresenta os valores de *NPS* obtidos experimentalmente para a amostra SNX2 na Posição 1 e o gráfico da Fig. 5.20 mostra os coeficientes de absorção sonora do mesmo material com a mesma posição da amostra.

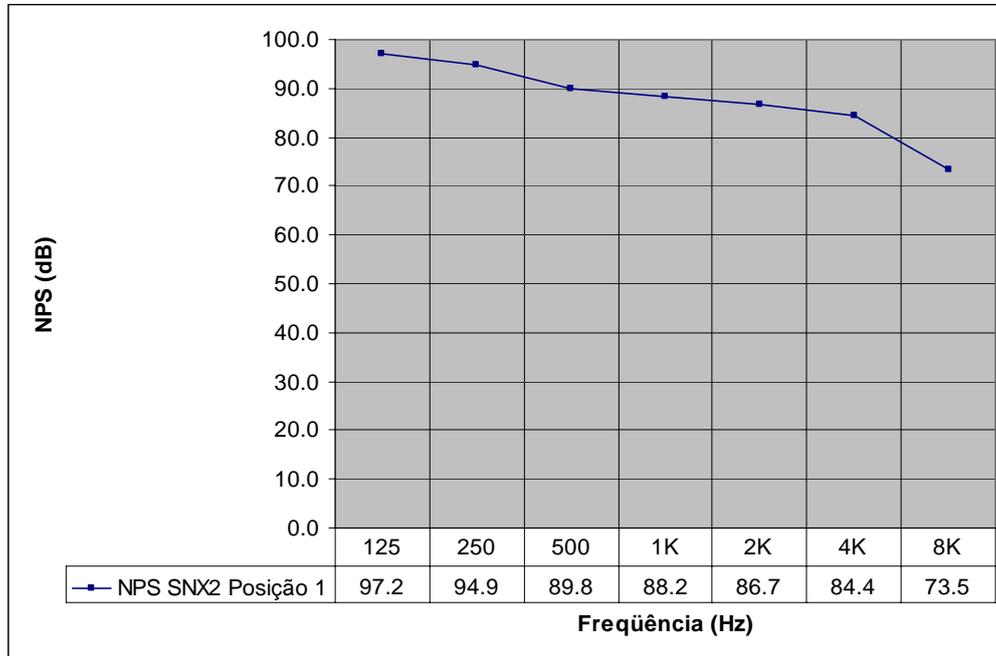


Figura 5.19 – Gráfico do NPS experimental do SNX2 na Posição 1.

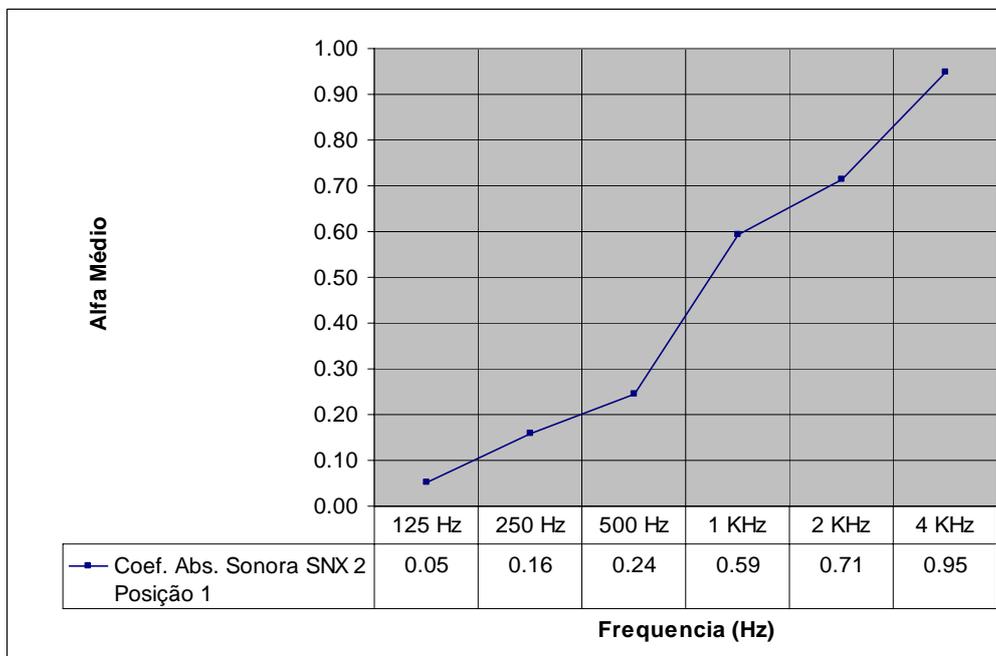


Figura 5.20 – Gráfico do Coeficiente de Absorção Sonora para amostra SNX2 na Posição 1.

5.6.7.2 Amostra SNX2 na Posição 2

Amostra no canto inferior direito da câmara (ver Fig. 5.21).

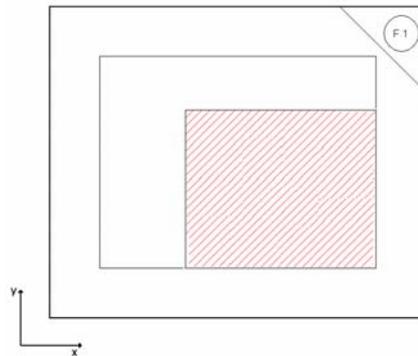


Figura – 5.21 Amostra na Posição 2.

O gráfico das Figs. 5.22 e 5.23 apresentam, respectivamente, os valores de NPS e os coeficientes de absorção sonora obtidos experimentalmente para a amostra SNX2 na Posição 2.

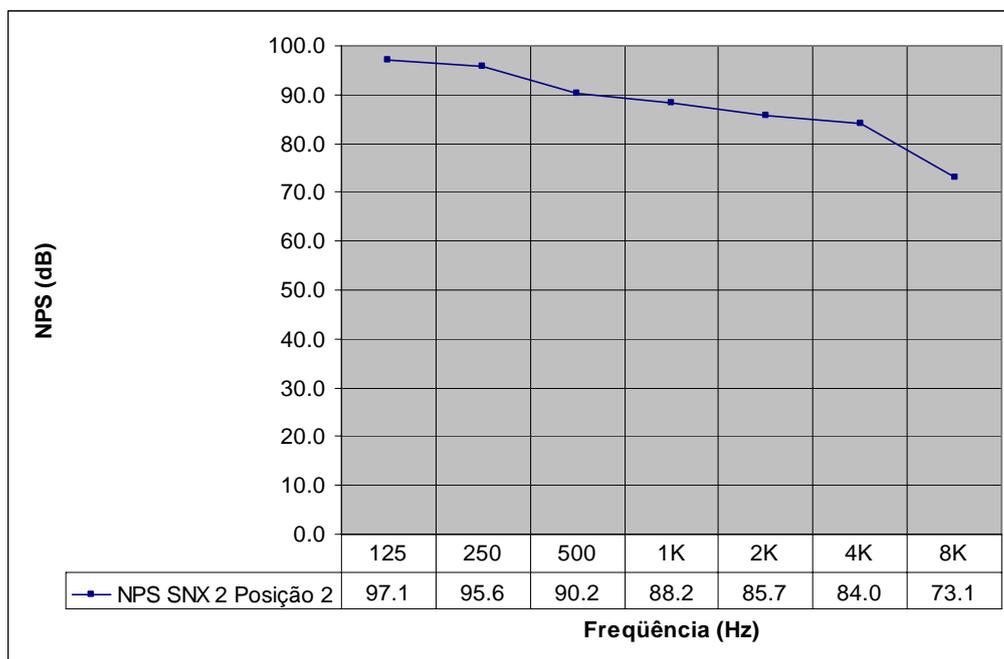


Figura 5.22 – Gráfico do NPS experimental do SNX2 na Posição 2.

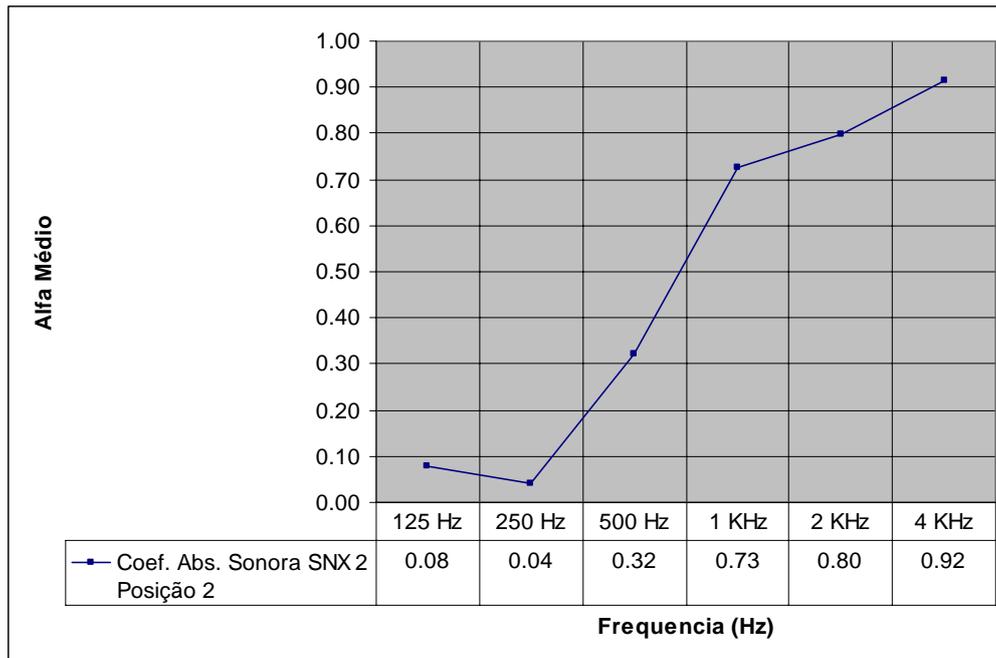


Figura 5.23 – Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora para amostra SNX2 na Posição 2.

5.6.7.3 Amostra SNX2 na Posição 3

Amostra no canto superior esquerdo da câmara (ver Fig. 5.24).

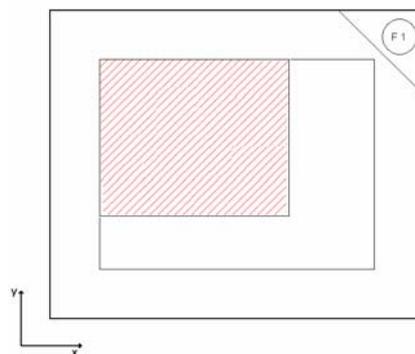


Figura – 5.24 Amostra na Posição 3.

Os gráficos das Figs. 5.25 e 5.26 mostram, respectivamente, os valores de *NPS* e os coeficientes de absorção sonora obtidos experimentalmente para a amostra SNX2 na Posição 3.

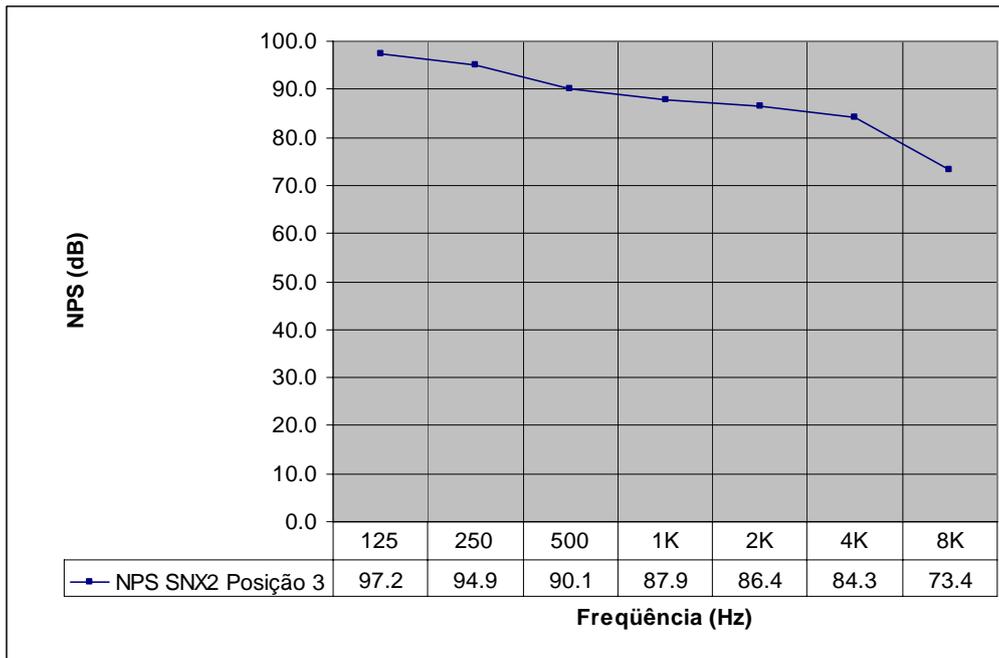


Figura 5.25 – Gráfico do NPS experimental do SNX2 na Posição 3.

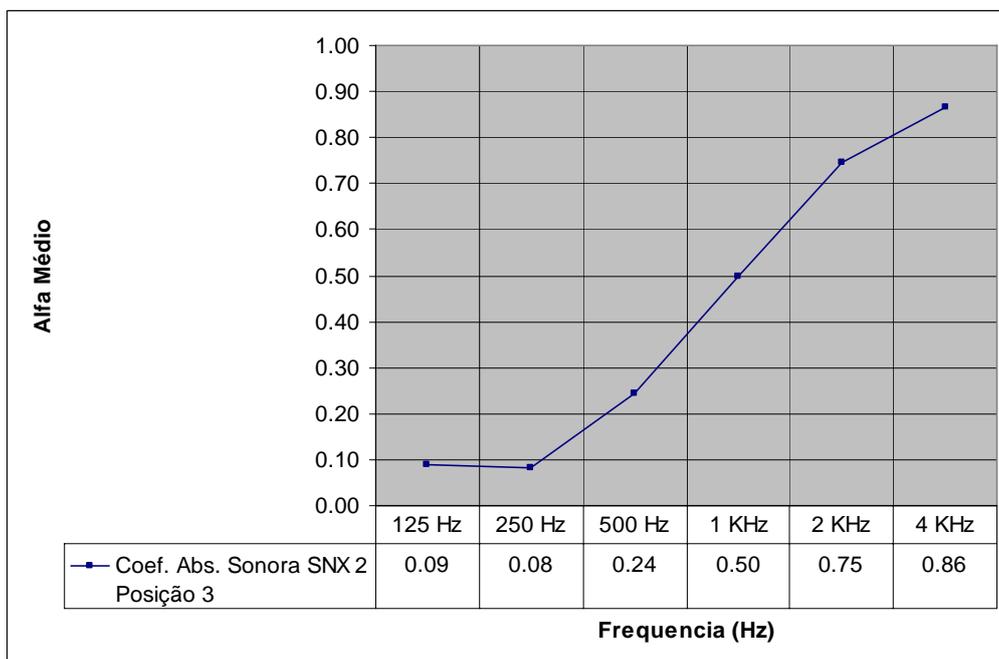


Figura 5.26 – Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora para amostra SNX2 na Posição 3.

5.6.7.4 Amostra SNX2 com Geometria diferente

Amostra SNX2 vazada (ver Fig. 5.27).

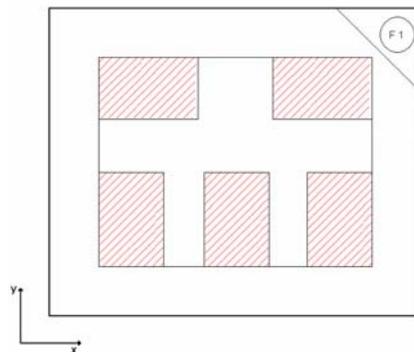


Figura – 5.27 Amostra com Geometria Diferente.

Para a amostra com geometria diferente, ou seja, com a amostra vazada, obtiveram-se os valores de coeficiente de absorção sonora e TR como mostram as Figs. 5.28 e 5.29, onde observa-se uma pequena diferença com relação aos valores obtidos para a mesma amostra de material ensaiada em área contínua, fato ocorrido também no trabalho realizado por Araújo (2002) (B), onde se testou também as amostras com geometrias diferentes.

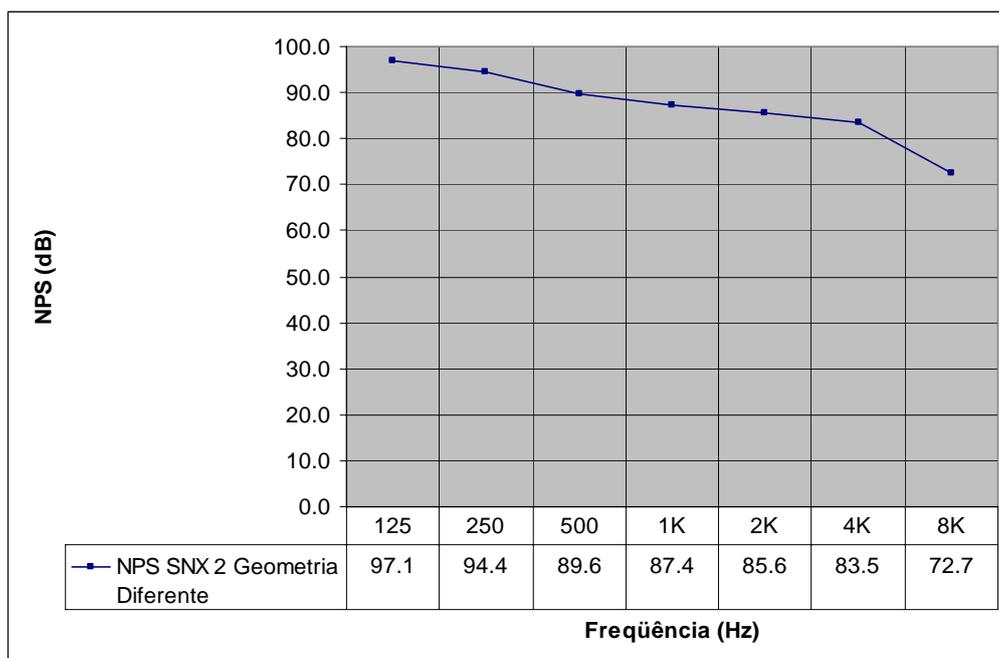


Figura 5.28 – Gráfico do NPS experimental do SNX2 com geometria diferente.

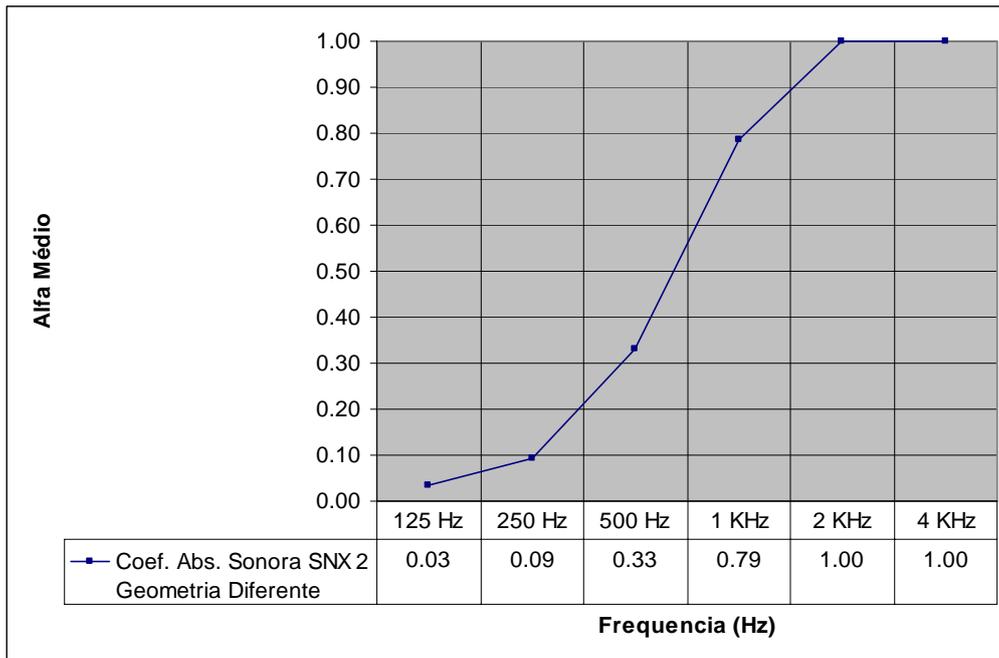


Figura 5.29 – Gráfico do Coeficiente de absorção Sonora para amostra SNX2 com Geometria Diferente.

No gráfico da Fig. 5.30 foi feita a comparação dos NPS obtidos entre as Posições 1, 2, 3 e a Geometria Diferente no interior da mini-câmara.

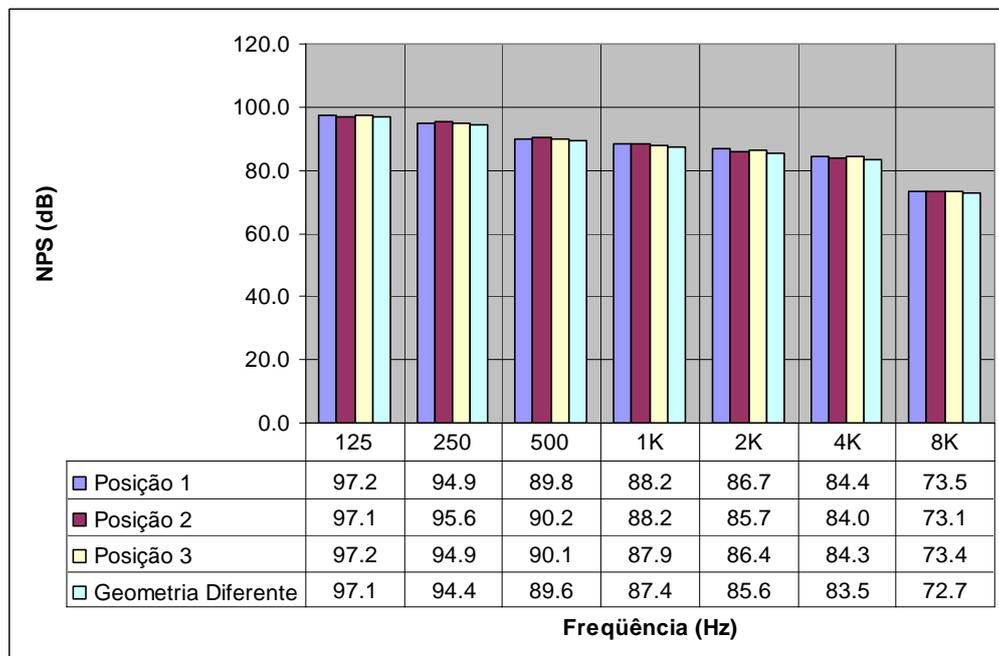


Figura 5.30 – Gráfico de comparação do NPS do SNX2 entre as três posições distintas da amostra e para a amostra com geometria diferente.

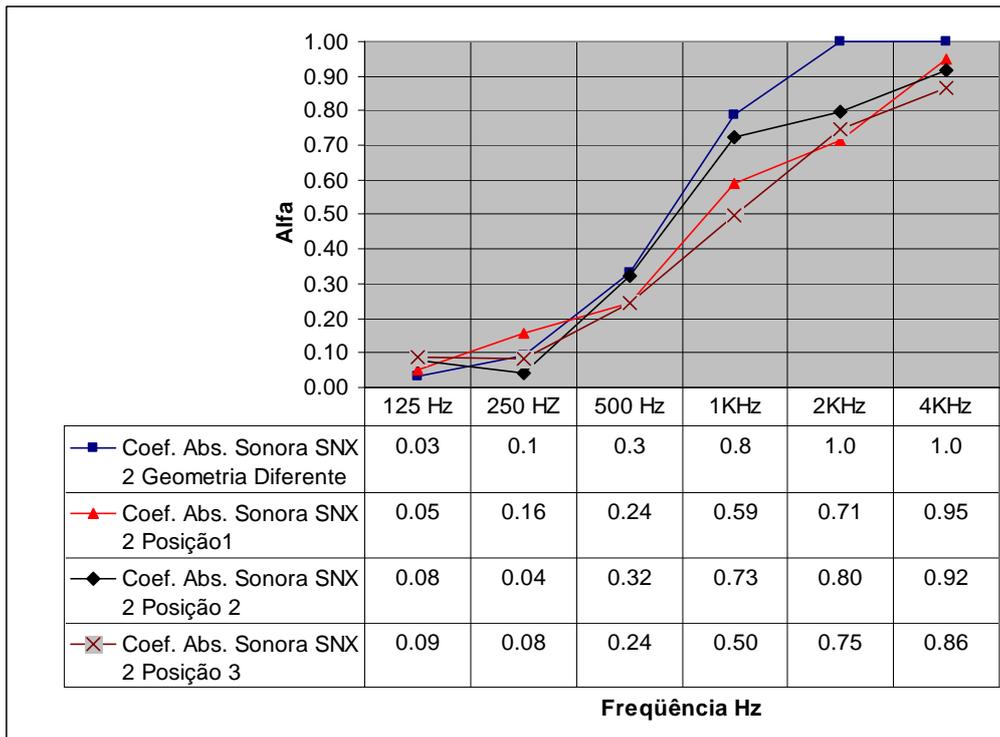


Figura 5.31 – Gráfico de comparação do Coeficiente de absorção Sonora do SNX2 entre as três posições distintas da amostra e para a amostra com geometria diferente.

5.7 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No gráfico da Fig. 5.8 (ver pág. 47), os resultados mostraram uma boa correlação entre os valores de coeficiente de absorção sonora medidos experimentalmente e os fornecidos pelo fabricante, para as bandas acima de 500 Hz. Já para as bandas de 125 a 500 Hz ocorreram diferenças significativas nesses valores.

Para os resultados mostrados no gráfico da Fig. 5.9 (ver pág. 48), observa-se uma correspondência adequada para todas as bandas, à exceção da banda de 500 Hz.

Nos resultados apresentados na Fig. 5.12 para a Fibra de Coco de menor espessura (50 mm), os valores de coeficiente de absorção sonora foram bons, mas um pouco abaixo dos valores do material comercial. Já na Fig. 5.14 são mostrados os valores dos coeficientes de absorção sonora para amostras de fibra de coco com

espessura de 100 mm, sendo que os resultados obtidos para o teste destas demonstram melhores propriedades de absorção sonora do que as amostras de Fibra de Coco mais finas.

A amostra FC6 superou o valor da amostra comercial SNX2 na frequência de 1 kHz e ultrapassou também os valores da amostra SNX1 em todas as faixas de frequências.

Desta forma conclui-se que as mantas regionais de fibra de coco apresentaram valores considerados bons nas faixas de frequências acima de 500 Hz e podem ser utilizados para tratamento acústico de salas, por apresentarem valores considerados bons.

CAPÍTULO VI – MODELAGEM NUMÉRICA

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os procedimentos usados para a realização da modelagem numérica da câmara em escala reduzida, com e sem amostras, tal que o método de acústica de raios seja testado, a partir do *software* comercial RAYNOISE 3.1, pela comparação com os resultados experimentais, buscando a compreensão do *software* e o domínio das variáveis envolvidas no método da acústica de raios, tornando possível a obtenção de resultados precisos na modelagem numérica.

6.2 O SOFTWARE RAYNOISE (ACÚSTICA DE RAIOS)

O RAYNOISE é um programa comercial que foi desenvolvido para simular o comportamento acústico de vários tipos de ambientes com volumes e geometria diversificadas, seja ele fechado, parcialmente fechado ou totalmente aberto. O *software* tem a sua estrutura teórica baseada no princípio da acústica geométrica, que assume que a energia sonora segue o caminho tracejado pelos raios sonoros, do mesmo modo que ocorre no caso da óptica geométrica e considera que a energia emitida pela fonte sonora é distribuída igualmente entre um número discreto de raios sonoros, os quais viajam à velocidade do som e colidem com as superfícies e obstáculos, onde são refletidos e/ou absorvidos.

Para essa teoria a reflexão é o fenômeno de maior importância. Para se chegar a esta simplificação, considera-se que o comprimento de onda é infinitamente pequeno, comparado às dimensões da Sala. Em geral, esta condição é verificada na prática, mas deve-se ficar atento ao fato de que, em baixas frequências, esta consideração pode não ser satisfatória (Gerges, 2000). A base teórica do programa admite que, propagando-se em linha reta, o raio vai sendo submetido aos efeitos dissipativos causados pela viscosidade do meio (ar) e pelas superfícies de contorno

da sala, que incluem os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa.

Existe a possibilidade de importação da geometria do modelo de outras plataformas computacionais, tais como Autocad, ANSYS, IDEAS, PATRAN, etc. A interface com o usuário é fácil e versátil. Em sua teoria existem alguns algoritmos que implementam os métodos da fonte imagem especular (MISM) e de traçado de raios (RTM), colocando à disposição dos usuários métodos híbridos que mesclam a natureza determinística, derivada do MISM, com algumas características estatísticas do RTM.

6.2.1 Método da Fonte Imagem Especular (*Mirror Image Source Method - MISM*)

O MISM assume que o som se propaga como um raio. Cada raio comporta-se como uma onda plana, embora seja considerada a atenuação devido à divergência esférica. Por outro lado, os efeitos ondulatórios são negligenciados, tais como difração e interferência, o que faz com que este comportamento se verifique apenas para frequências altas, onde o comprimento de onda é muito menor do que as dimensões da sala (Uría, 2005).

Fontes imagem especular virtuais são utilizadas para traçar os caminhos de reflexão sonora do receptor R para a fonte F, sendo determinadas fontes imagem de primeira ordem e de ordens superiores, como mostrado nas Figs. 6.1 e 6.2, respectivamente. A contribuição energética de cada fonte imagem é computada levando-se em conta a distância percorrida e as atenuações ocorridas em cada reflexão.

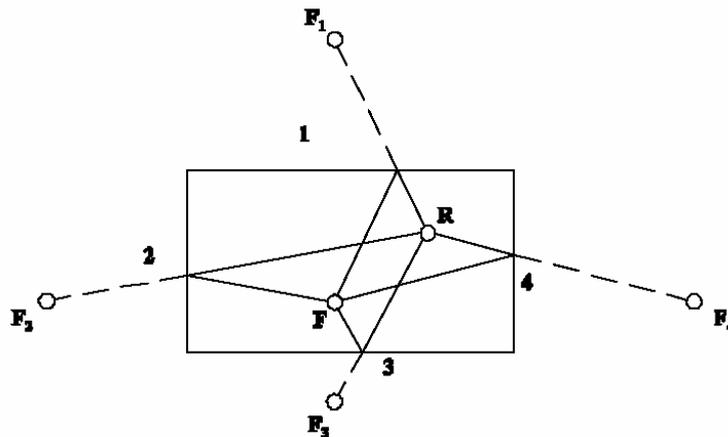


Figura 6.1 – Trajetos de reflexão de primeira ordem em salas retangulares.

Fonte: (Souza, 1997)

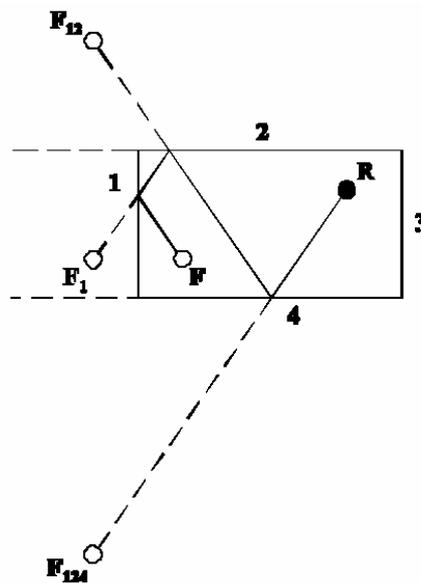


Figura 6.2 – Fonte imagem de terceira ordem (F_{124}).

Fonte: (Souza, 1997)

A principal limitação deste método é a necessidade de se realizar testes de visibilidade para modelos de salas não retangulares. Esses testes podem demandar longos tempos de processamento computacional, principalmente quando a geometria da sala é muito irregular, há a presença de muitos objetos no interior da sala e o número de reflexão por parte de cada raio é elevado. A Fig. 6.3 mostra um exemplo de um teste de visibilidade no qual o receptor R_1' não é visível à fonte F_1 .

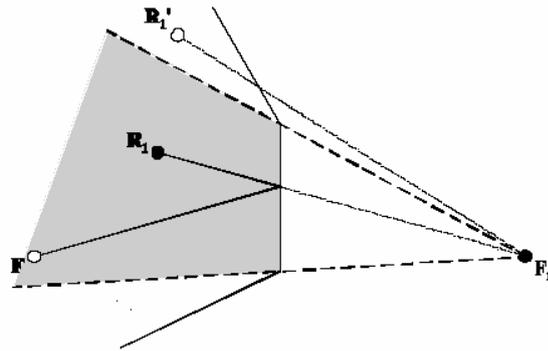


Figura 6.3 – Teste de visibilidade: receptor R_1 visível a F_1 e R_1' não visível a F_1 .

Fonte: (Souza, 1997)

6.2.2 Método de Traçado de Raios (Ray Tracing Method - RTM)

No método de Traçado de Raios (RTM), supõe-se que a energia emitida pela fonte sonora seja distribuída em um número discreto de raios sonoros. Cada raio tem uma energia inicial igual à energia total da fonte dividida pelo número dos raios e viaja à velocidade do som, colidindo com as paredes, piso e teto onde é refletido de acordo com a lei da reflexão especular. O nível de energia de cada raio diminui a cada vez que ocorre uma reflexão, através das propriedades de absorção dos materiais, e de forma progressiva pela absorção do ar presente no ambiente. Quando o nível de energia presente no raio não for mais significativo, sua propagação é interrompida e inicia-se o traçado do próximo raio, (Uría, 2005).

A fim de calcular a energia sonora em pontos diferentes de uma sala, uma malha receptora constituída de volumes finitos é definida e inicia-se um processo de verificação para identificar os raios que cruzam o volume receptor, como mostrado na Fig. 6.4. O número de raios que cruza o volume receptor e as contribuições de energia desses raios permite a determinação do nível de pressão sonora. As perdas devido à divergência esférica são incluídas, em consequência da separação crescente entre os raios, enquanto eles se afastam da fonte com o passar do tempo. A precisão dos resultados obtidos com este método apresenta limitações devido à emissão de um número limitado de raios, o que não garante que todos os percursos dos raios entre fonte e receptor sejam encontrados, e pelas dimensões finitas da célula receptora, o que cria a possibilidade de se coletarem falsos percursos ou coletar um mesmo percurso mais de uma vez. Fonte: (Souza, 1997)

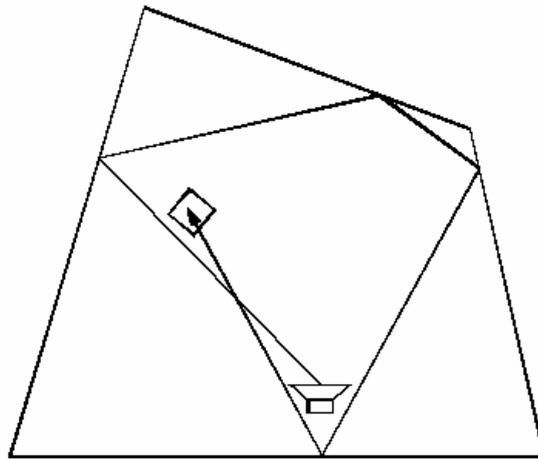


Figura 6.4 – Traço de um raio acústico da fonte ao volume receptor.

Fonte: (Souza, 1997)

6.2.3 Método Híbrido de Raios Acústicos

O método híbrido descrito a seguir utiliza uma combinação dos métodos descritos anteriormente, como uma abordagem para simular os três fenômenos mais importantes da propagação do som em salas, que são: a absorção, a reflexão especular e a reflexão difusa.

Vários pesquisadores têm desenvolvido novos métodos, mesclando a natureza determinística, derivada do Método da Fonte Imagem Especular (MISM), com algumas características estatísticas do Método dos Raios Acústicos (RTM).

Segundo Souza (1997), esses métodos aumentam bastante o desempenho do RTM, pois eliminam a maioria das incertezas devido à natureza estatística dos raios. Por outro lado, os métodos híbridos combinam as melhores características dos métodos de fonte imagem e raios acústicos, reduzindo significativamente os tempos de computação.

6.2.4 Método dos Raios Cônicos (Conical Beam Method - CBM)

O seguinte método admite que os raios são emitidos em forma de cone e seus vértices localizados na posição da fonte, conforme visualizado na Fig. 6.5, um algoritmo de raios acústicos assegura a propagação desses cones aos seus eixos. Uma fonte imagem visível é encontrada quando um ponto de recepção se encontra dentro do volume varrido e sua contribuição é calculada facilmente pela divergência esférica do cone e, ao contrário do método da fonte imagem especular nenhum teste de visibilidade é necessário.

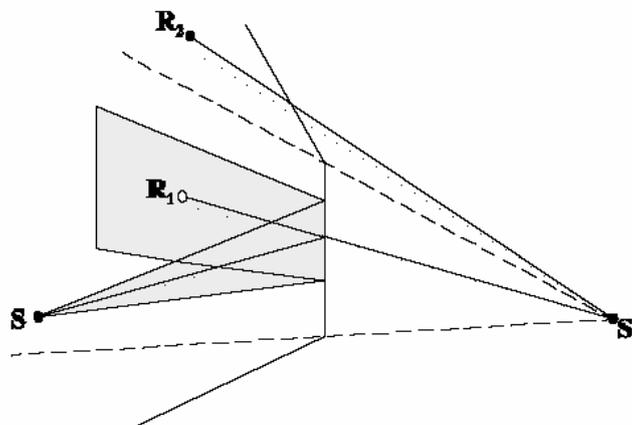


Figura 6.5 – Feixe de raios cônico ou triangular.

Fonte: (Souza, 1997)

Entretanto, pode ocorrer a múltipla detecção do mesmo caminho devido à sobreposição de cones adjacentes, uma vez que os cones não cobrem completamente a superfície esférica da fonte. Esse problema é minimizado pelo uso de um algoritmo de ponderação da energia recebida que faz com que as múltiplas contribuições produzam, a média, do nível sonoro correto (Fig 6.6).

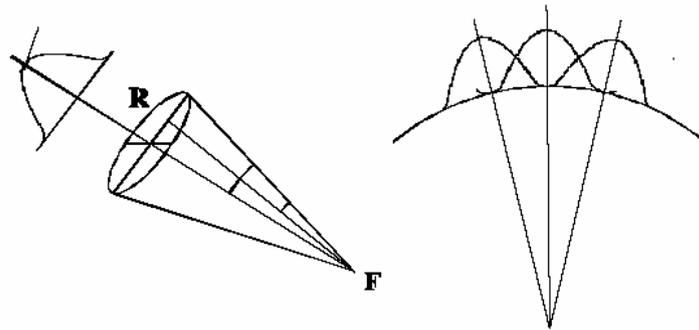


Figura 6.6 – Compensação dos raios cônicos: ponderação máxima no centro e mínima nas bordas.

Fonte: (Souza, 1997)

À medida que o cone se propaga, a frente de propagação cresce e aumenta a chance desta atingir uma aresta, fazendo com que haja o aparecimento do efeito de estreitamento do raio e, conseqüentemente, algumas das fontes imagem visíveis serão associadas a um caminho de reflexão errado e podem, por isso, não ser consideradas, como mostrado na Fig. 6.7. Por outro lado, alguma fonte imagem falsa pode ser considerada, principalmente, nas fontes imagens de ordem elevada, o que pode ser reduzido por um número maior de raios e, conseqüentemente, um ângulo sólido menor do cone, mas com um maior tempo de processamento computacional. Entretanto, as falsas fontes imagem tendem a compensar as fontes imagem perdidas pelo estreitamento dos raios. Na Fig. 6.8 visualiza-se o receptor 1, relativo a uma fonte imagem falsa, e o receptor 2, relativo a uma fonte imagem perdida (Uría, 2005).

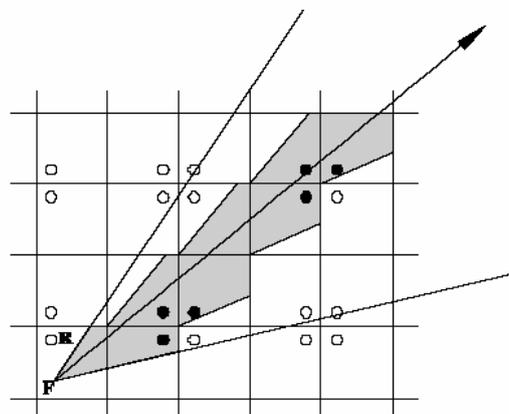


Figura 6.7 – Estreitamento de raio que ocorre em feixes cônicos e triangulares.

Fonte: (Souza, 1997)

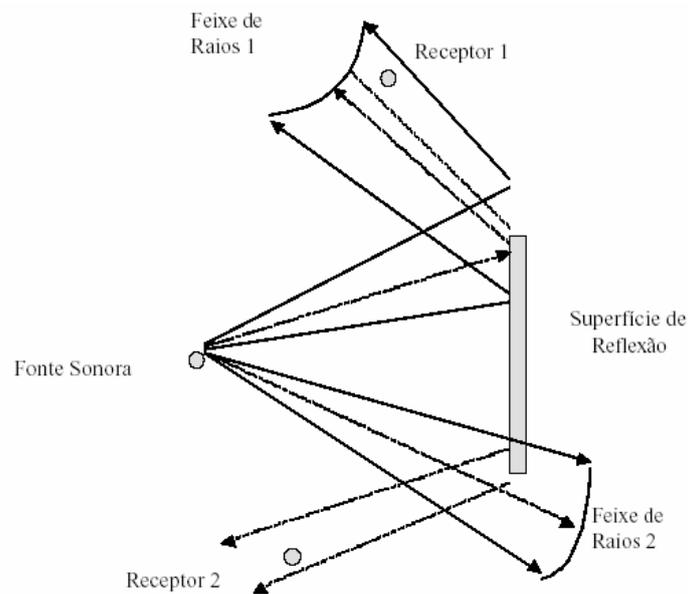


Figura 6.8 – Receptor 1, relativo a uma falsa imagem e receptor 2, relativo a uma imagem perdida.

Fonte: (Souza, 1997)

6.2.5 Método dos Raios Triangulares (*Triangular Beam Method - TBM*)

O TBM é muito similar ao CBM, só que este utiliza pirâmides de base triangular para repartir a frente de ondas. Assim, não apresenta o problema de superposição de feixes apresentado pelo CBM, uma vez que as pirâmides adjacentes cobrem perfeitamente a fonte esférica. Entretanto, o problema de estreitamento de feixes permanece.

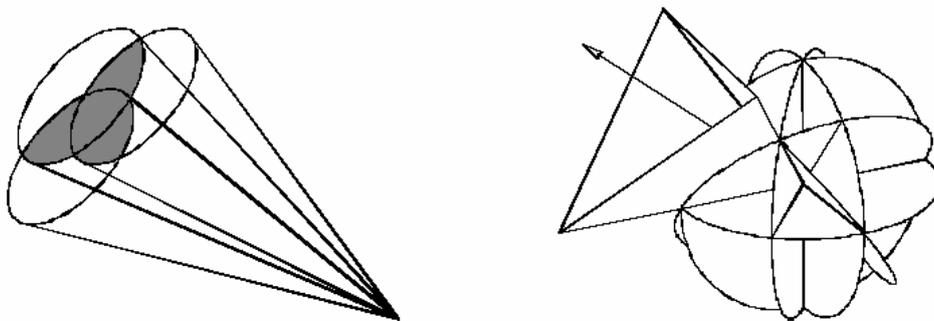


Figura 6.9 – Feixe de raios acústicos na forma de cone e de pirâmide triangular.

Fonte: (Souza, 1997)

6.3 MODELO RAYNOISE

Utilizou-se o *software* RAYNOISE 3.1 para simular o campo acústico da câmara reverberante em escala reduzida pertencente ao GVA.

A Fig. 6.10 mostra a geometria desta sala que foi realizada na plataforma Autocad, com formato de arquivo “dxf”. Mostra também a fonte sonora onidirecional colocada no canto da sala.

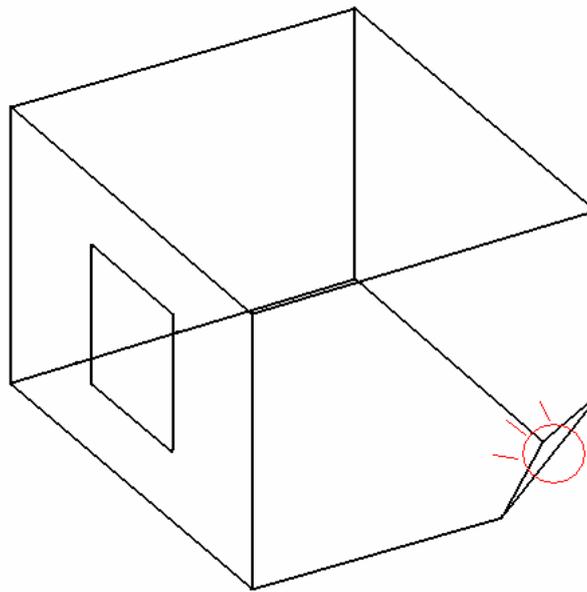


Figura 6.10 – Vista em perspectiva da sala.

6.3.1 Dados de Entrada da Simulação Numérica da Sala

A simulação numérica foi realizada utilizando o método híbrido de análise, selecionando a opção de feixes de raios cônicos, combinado com a opção *MAPPING*, que abandona o feixe de raios conforme o parâmetro Ordem de Reflexão, ao mesmo tempo em que estabelece que a computação da energia sonora seja feita a partir da definição das superfícies de recepção dos raios.

Foram informados ao programa RAYNOISE alguns parâmetros que são imprescindíveis para a simulação, tais como:

- Número de Raios (NR);
- Ordem de Reflexão;
- Absorção Sonora do Ar, de acordo com valores constantes da biblioteca do programa RAYNOISE;
- Níveis de Potência Sonora (NWS) da fonte em dB para todas as faixas de frequências, conforme Tab. 5.8 da pág. 45, disposta no Capítulo V deste trabalho;
- Valores de Coeficiente de Absorção Sonora dos materiais que constituem a sala, tais como: paredes, teto, piso e o Coeficiente de Absorção dos materiais testados na mini-câmara para os casos onde foram simuladas as amostras no interior da sala, de acordo com a Tab. 6.1.

Tabela 6.1 – Valores de coeficiente de absorção sonora dos materiais que constituem a sala.

Materiais	FREQUÊNCIA (Hz)							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Paredes	0,015	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
Teto e Piso								
Flexonic 35x35	0,005	0,01	0,18	0,36	0,59	0,71	0,95	0,74

O algoritmo do programa RAYNOISE permite coletar a energia contida nos feixes de raios e não computada, por exemplo, por cessar-se a simulação na ordem de reflexão R . Então, essa energia é distribuída por todos os receptores baseando-se em equações emprestadas da acústica estatística. Obtêm-se, assim, resultados mais precisos consumindo menos tempo de processamento, ou seja, convergência mais rápida (Souza, 1997).

6.3.2 Definição dos Parâmetros, Número de Raios e Ordem de Reflexão

O número de raios e a ordem de reflexão foram definidos a partir de várias simulações, onde se observou que após aumentar-se o número de raios e a ordem de reflexão, os valores de tempo de reverberação e níveis de pressão sonora

obtidos convergiam para um valor e se estabilizavam. Daí para frente se trabalhou com um valor exato para o número de raios e também para a ordem de reflexão. A seguir nos itens a) e b) é descrito esse método de convergência e logo em seguida os casos simulados no programa RAYNOISE.

6.3.3 Método de Convergência

a) Simulação do campo acústico da câmara alterando-se o número de raios e mantendo-se a ordem de reflexão.

Neste primeiro caso foram utilizados os valores da tabela abaixo para os parâmetros em questão:

Tabela 6.2 – Número de raios utilizados nas tentativas de convergência.

Parâmetros	1ª Tentativa	2ª Tentativa	3ª Tentativa	4ª Tentativa	5ª Tentativa
Número de raios	500	1000	5000	10000	50000
Ordem de reflexão	10	10	10	10	10

Durante as simulações, foi observado que os valores de *TR* e *NPS* convergem para certo valor, à medida que se aumenta o número de raios, mantendo-se fixo o valor da ordem de reflexão, como pode ser visto na Tab. 6.3 e 6.4 e nas Figs. 6.11 e 6.12. Assim, como os valores de *TR* e *NPS*, tanto para 10 mil quanto para 50 mil raios, não tiveram diferenças significativas, optou-se por definir o número de raios em 10.000.

Tabela 6.3 – Resultados de TR obtidos na convergência do número de raios.

Tentativas	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1ª Tentativa	0,80	0,70	0,51	0,39	0,36	0,28
2ª Tentativa	0,80	0,69	0,50	0,38	0,35	0,27
3ª Tentativa	0,80	0,69	0,51	0,39	0,36	0,27
4ª Tentativa	0,80	0,69	0,51	0,39	0,35	0,27
5ª Tentativa	0,80	0,69	0,51	0,39	0,35	0,27
6ª Tentativa	0,80	0,69	0,51	0,39	0,35	0,27

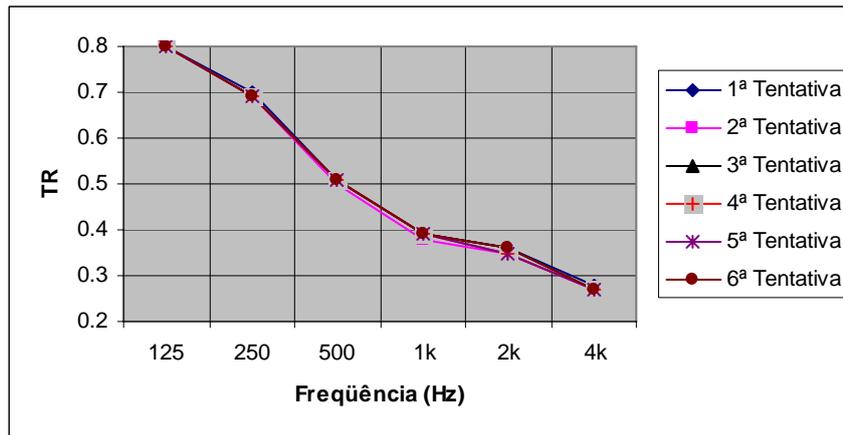


Figura 6.11 – Gráfico do TR para o 1º caso de convergência.

Tabela 6.4 – Resultados de NPS obtidos na convergência dos números de raios.

Tentativas	125	250	500	1k	2k	4k
1ª Tentativa	114.10	110.82	112.86	111.80	109.60	98.61
2ª Tentativa	114.42	111.14	113.17	112.12	109.92	98.93
3ª Tentativa	114.78	111.52	113.55	112.55	110.38	99.41
4ª Tentativa	114.83	111.56	113.59	112.59	110.42	99.44
5ª Tentativa	114.92	111.66	113.70	112.72	110.55	99.59
6ª Tentativa	114.96	111.70	113.74	112.77	110.61	99.66

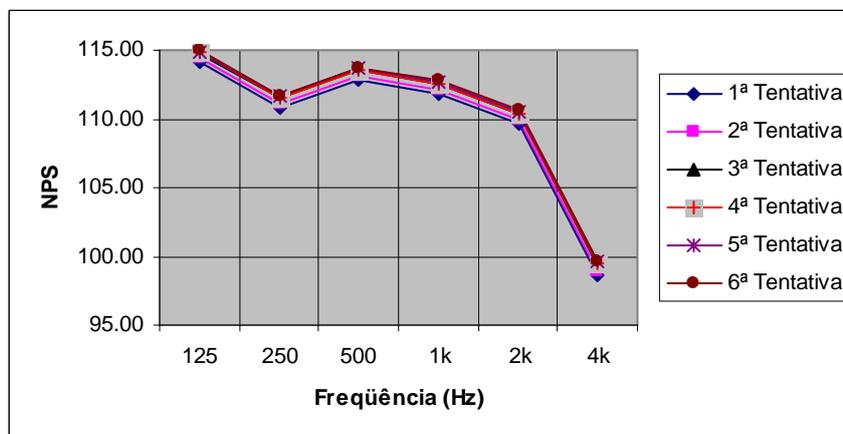


Figura 6.12 – Gráfico do NPS para o 1º caso de convergência.

b) Simulação do campo acústico da câmara alterando-se a ordem de reflexão e mantendo-se o número de raios.

O mesmo procedimento descrito no caso anterior foi implementado, mas, agora, mantendo constante o número de raios e variando somente a ordem de reflexão, como mostrado na Tab. 6.5. As Tabs. 6.6 e 6.7 mostram, respectivamente,

os valores de *TR* e *NPS* para as simulações realizadas, os quais podem ser visualizados nas Figs. 6.13 e 6.14, respectivamente. A análise destas figuras permite concluir que a utilização de uma ordem de reflexão igual a 50 produz resultados satisfatórios para ambos os parâmetros.

Tabela 6.5 – Valores distintos para a Ordem de Reflexão, utilizados nas tentativas de convergência.

Parâmetros	1ª Tentativa	2ª Tentativa	3ª Tentativa	4ª Tentativa	5ª Tentativa
Número de raios	10000	10000	10000	10000	10000
Ordem de reflexão	20	30	40	50	100

Tabela 6.6 – Resultados de TR obtidos na convergência da Ordem de Reflexão.

Tentativas	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1ª Tentativa	0,82	0,70	0,51	0,38	0,35	0,27
2ª Tentativa	0,82	0,70	0,51	0,38	0,35	0,26
3ª Tentativa	0,83	0,70	0,51	0,38	0,35	0,26
4ª Tentativa	0,83	0,70	0,51	0,38	0,34	0,26
5ª Tentativa	0,83	0,70	0,51	0,37	0,34	0,26

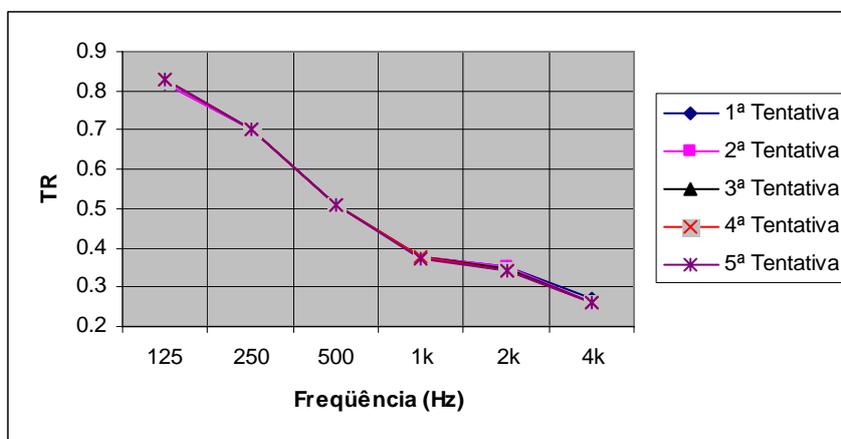


Figura 6.13 – Gráfico do TR para o 2º caso de convergência.

Tabela 6.7 – Resultados de NPS obtidos na convergência da Ordem de Reflexão.

Tentativas	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1ª Tentativa	117,06	113,70	115,49	114,22	111,95	100,68
2ª Tentativa	118,07	114,62	116,23	114,76	112,44	101,02
3ª Tentativa	118,60	115,08	116,57	114,98	112,63	101,13
4ª Tentativa	118,90	115,33	116,73	115,07	112,70	101,16
5ª Tentativa	119,31	115,63	116,88	115,14	112,76	101,19

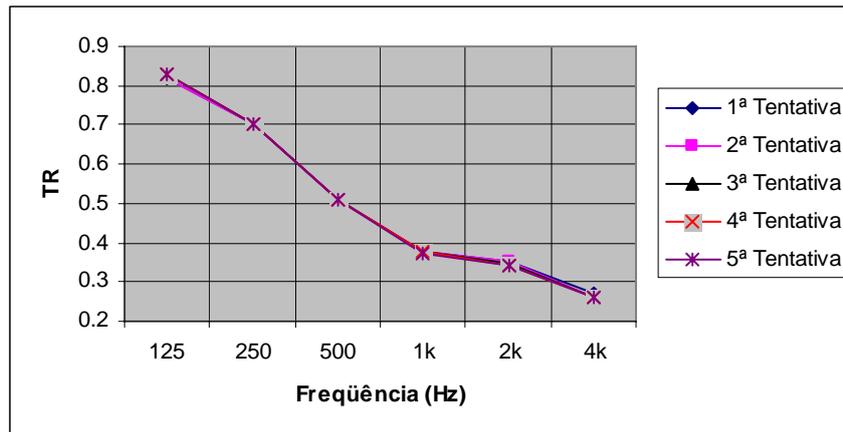


Figura 6.14 – Gráfico do NPS para o 2º caso de convergência.

6.4 Casos Simulados

Nesta etapa foram simulados quatro casos, onde o objetivo foi verificar primeiramente o comportamento acústico da sala vazia. Em seguida, levou-se em consideração a posição da amostra no interior da câmara e, posteriormente, a geometria da amostra dentro da mesma. Construíram-se tabelas e gráficos para se fazer uma comparação dos resultados obtidos e avaliar a eficácia da câmara reverberante em escala reduzida.

6.4.1 Sala simulada sem amostra de teste(1º Caso).

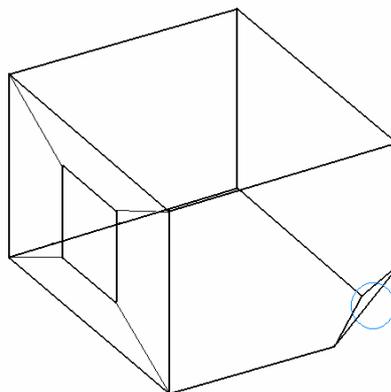


Figura 6.15 – Câmara sem Amostra de Teste.

O gráfico da Fig. 6.16 mostra os tempos de reverberação medidos experimentalmente e simulados numericamente no programa RAYNOISE, onde se percebe que nas bandas de 500 Hz até 4 kHz os valores deste parâmetro estão bem próximos dos valores medidos experimentalmente. Por outro lado, os resultados para as bandas de 125 e 250 Hz apresentam uma pequena diferença.

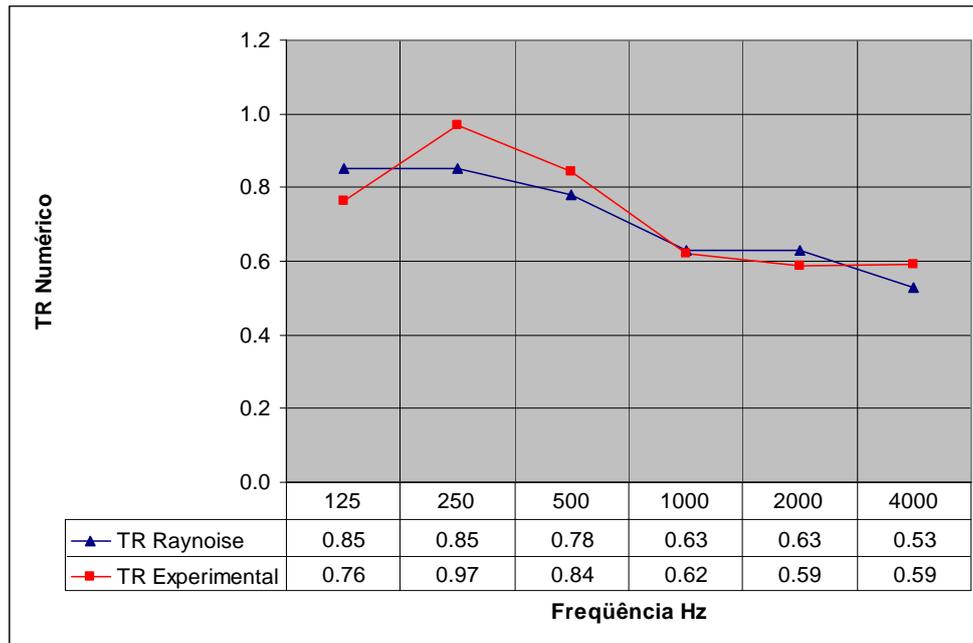


Figura 6.16 – Comparação dos TR's numérico e experimental da sala sem Amostra de Teste.

No gráfico da Fig. 6.17 estão dispostos, por banda de frequência, os valores de NPS obtidos numericamente e experimentalmente, podendo-se observar uma boa concordância dos valores em todo o intervalo apresentado.

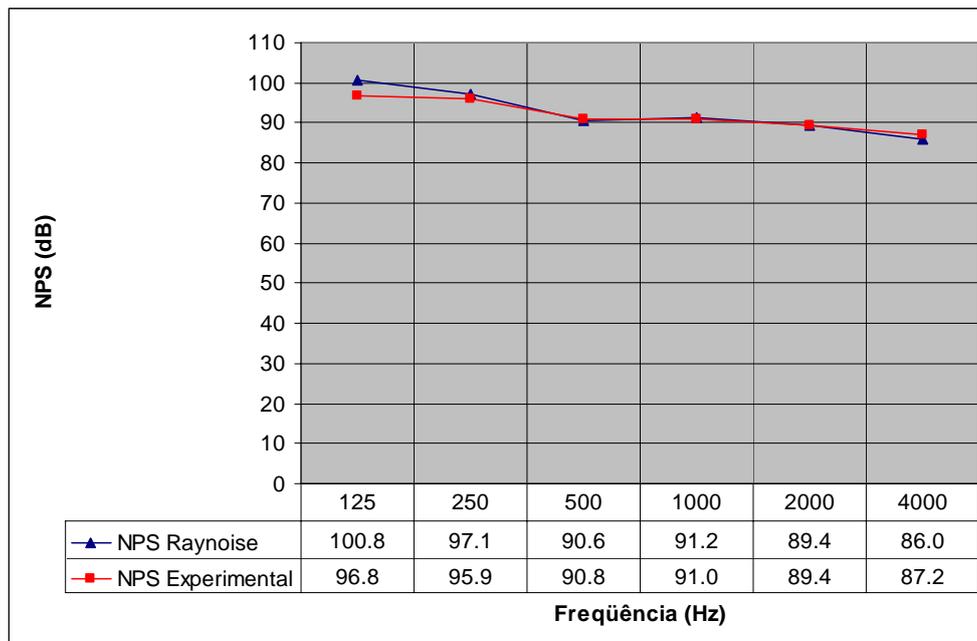


Figura 6.17 – Comparação dos NPS's numérico e experimental da sala sem Amostra.

A seguir, apresentam-se alguns gráficos da distribuição de pressão sonora no interior da câmara, para se ter uma idéia do comportamento acústico da sala.

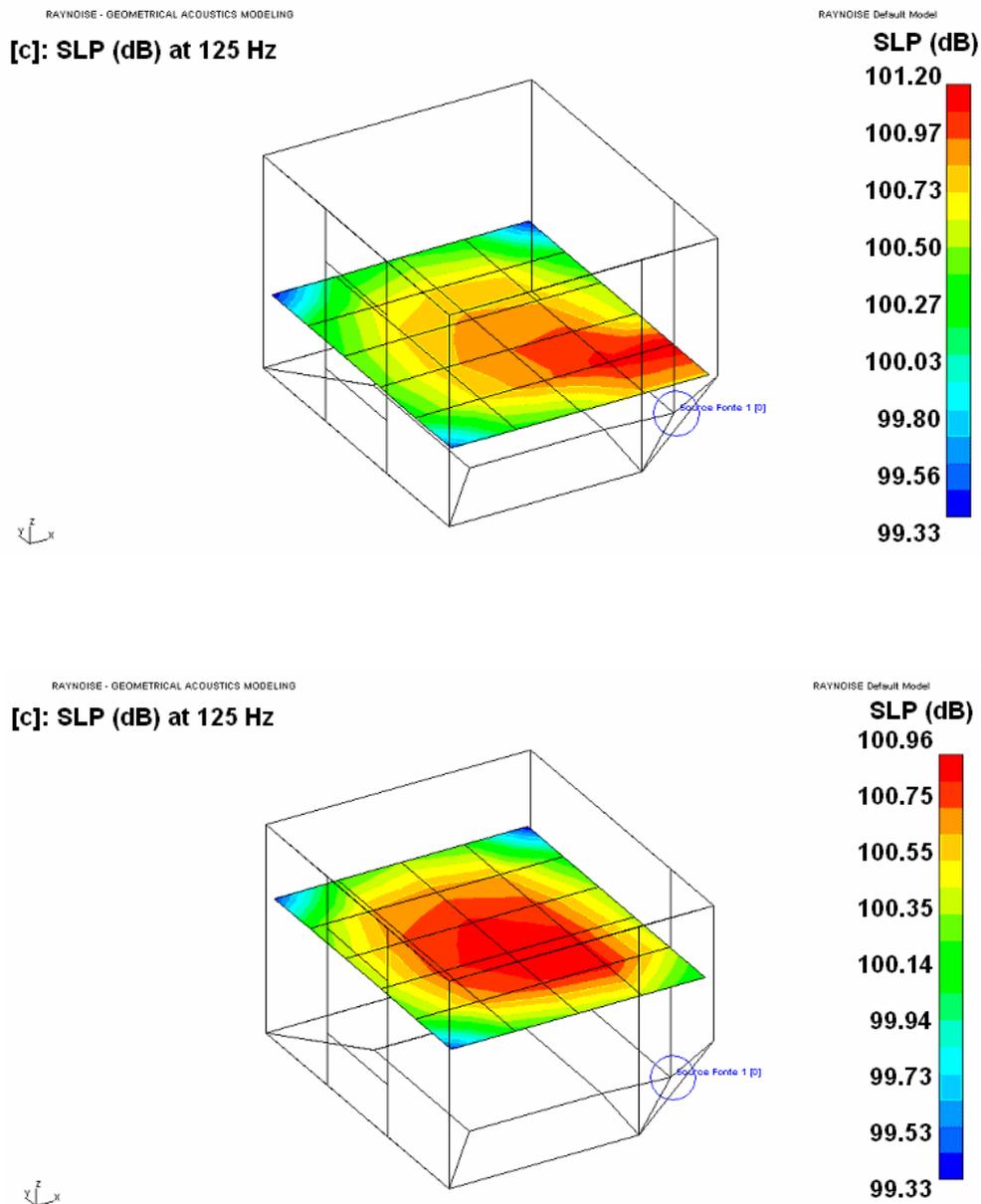


Figura 6.18 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 125 Hz nos planos horizontais 1 e 2.

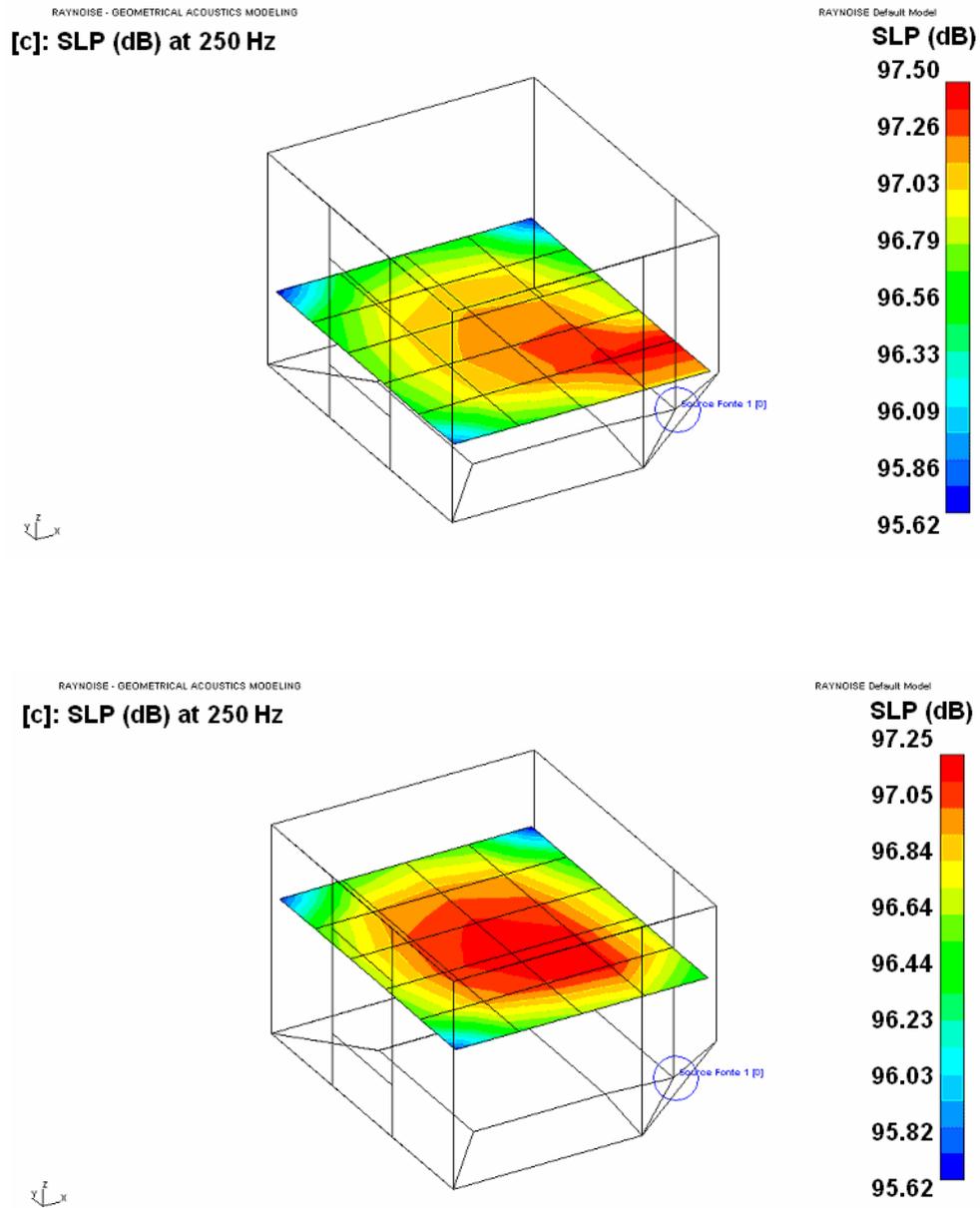


Figura 6.19 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 250 Hz nos planos horizontais 1 e 2.

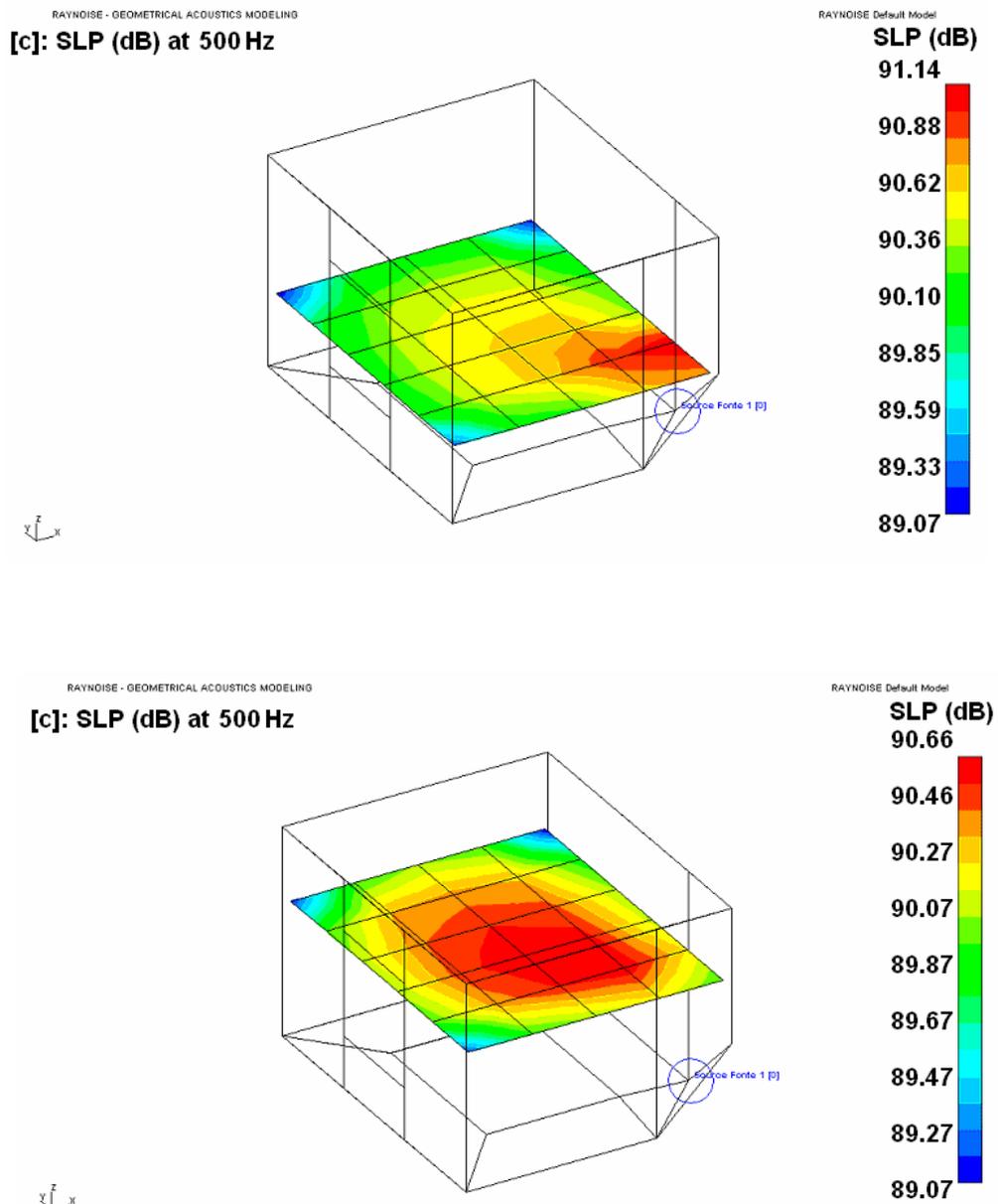


Figura 6.20 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 500 Hz nos planos horizontais 1 e 2.

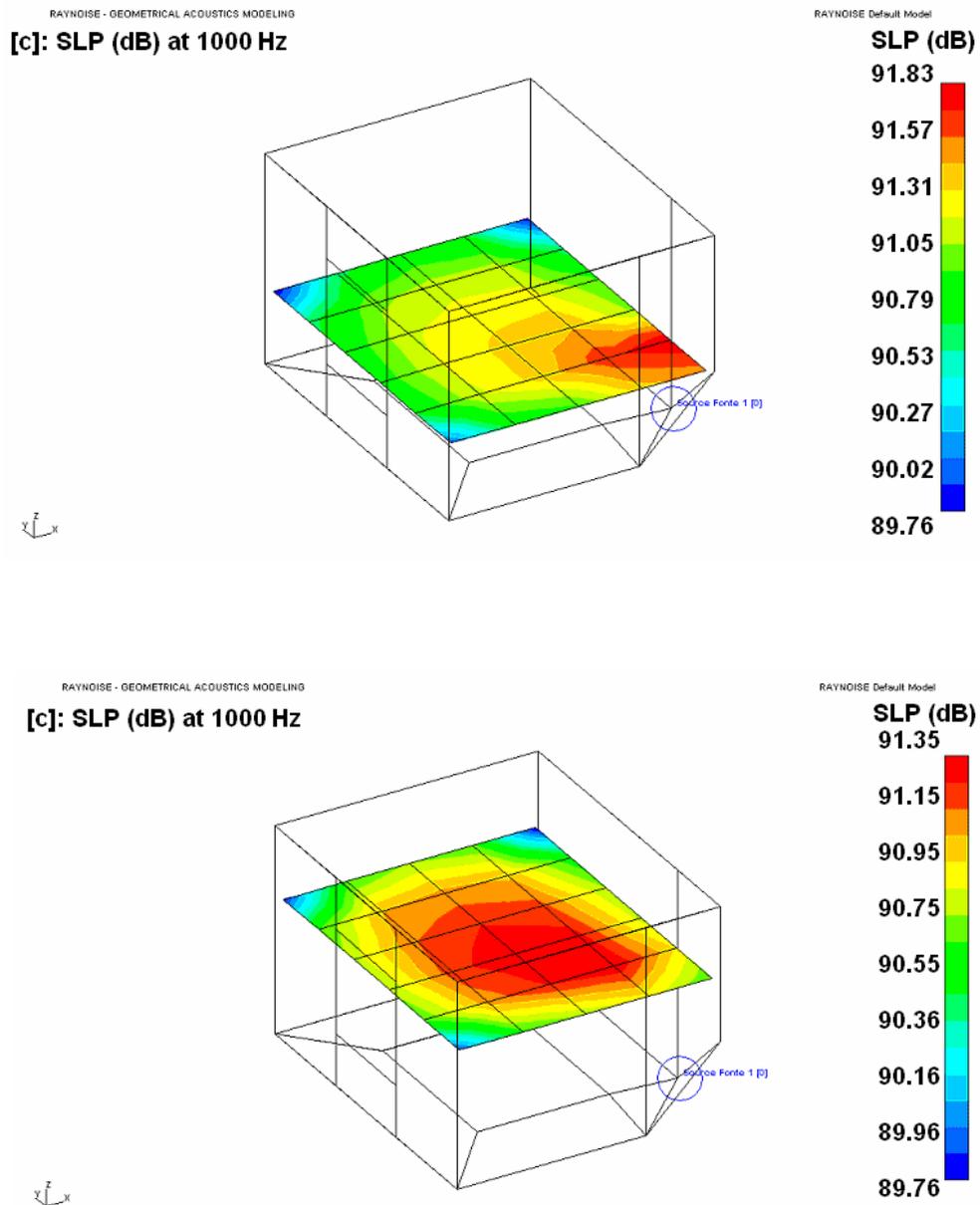


Figura 6.21 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 1000 Hz nos planos horizontais 1 e 2.

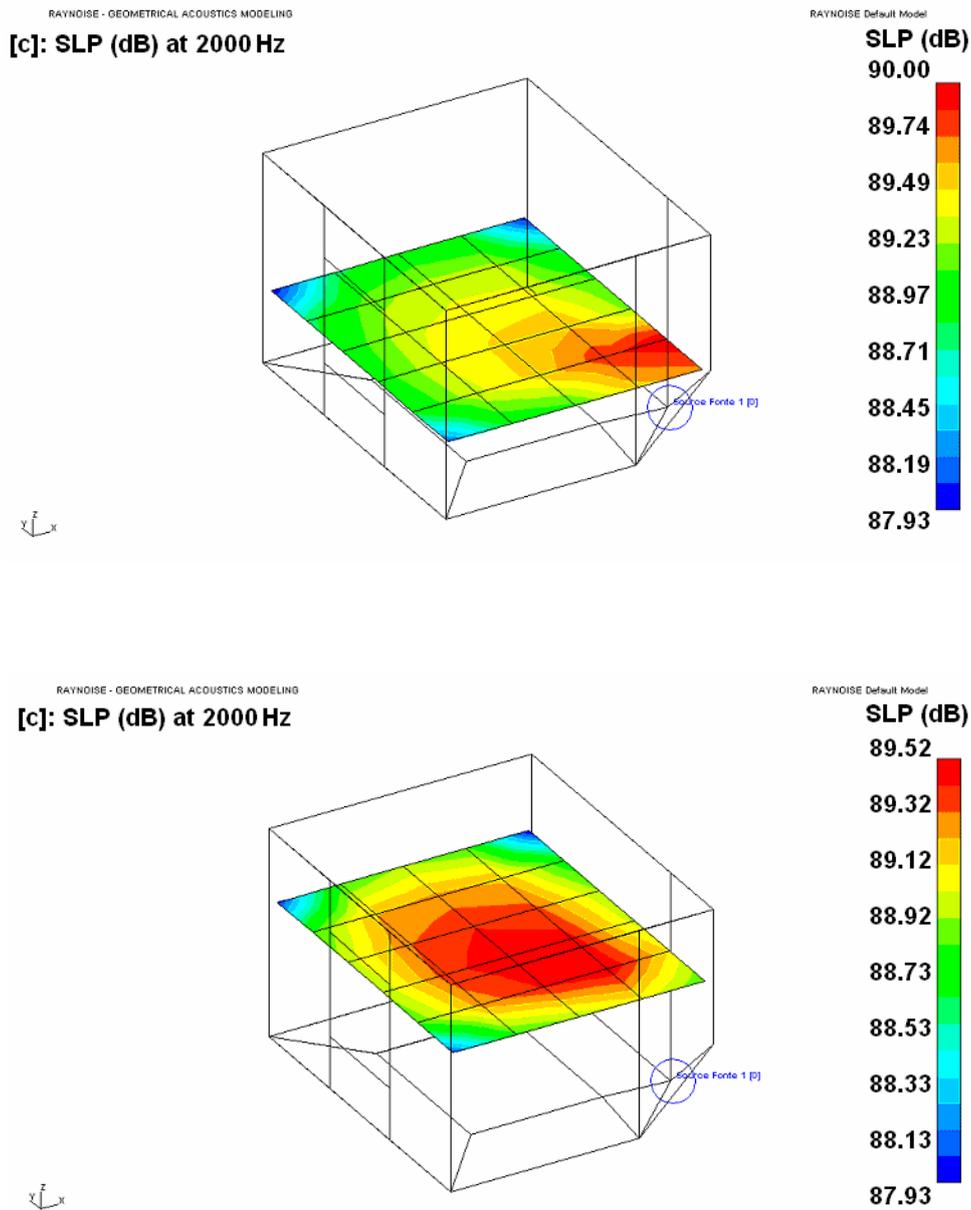


Figura 6.22 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 2000 Hz nos planos horizontais 1 e 2.

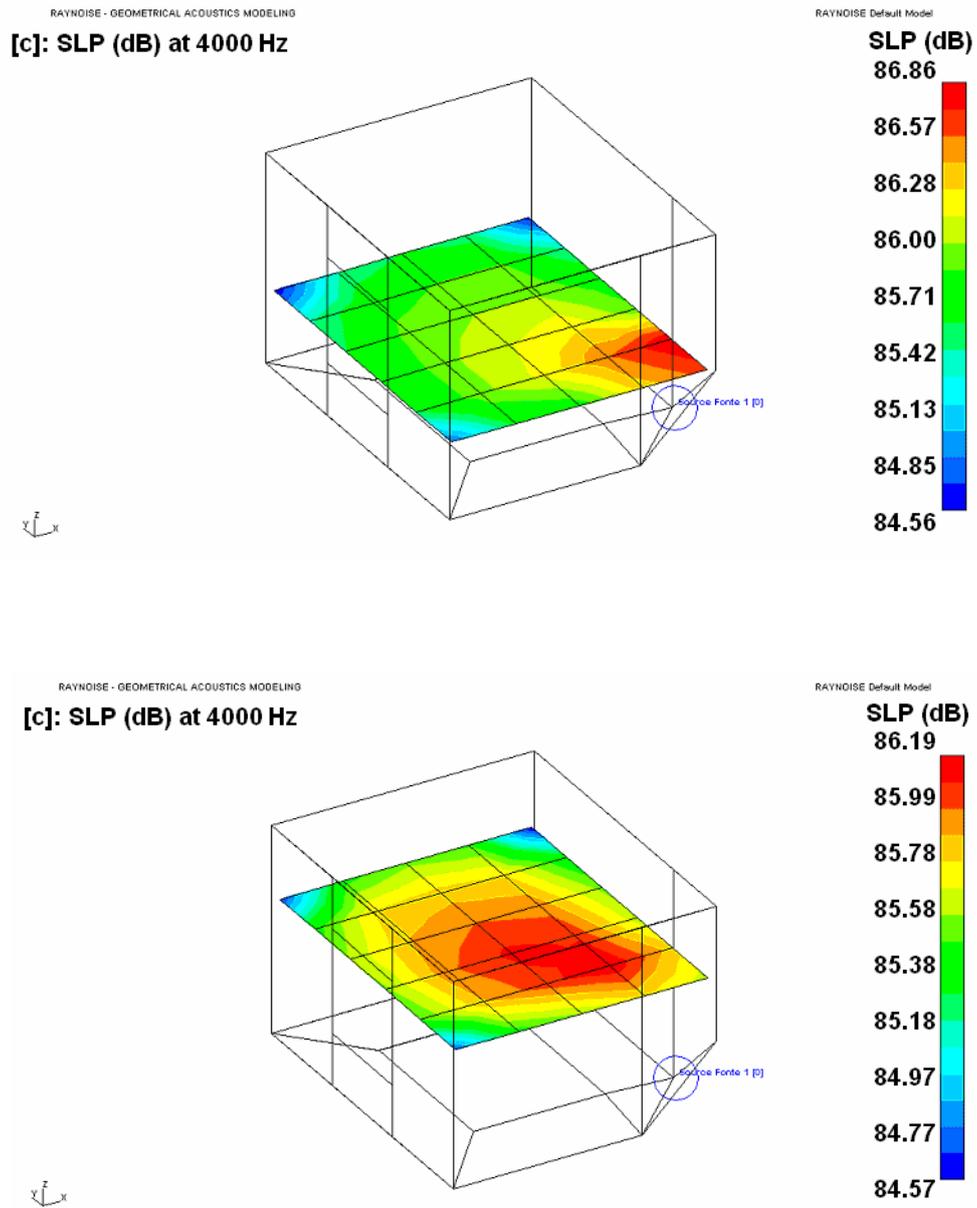


Figura 6.23 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 4000 Hz nos planos horizontais 1 e 2.

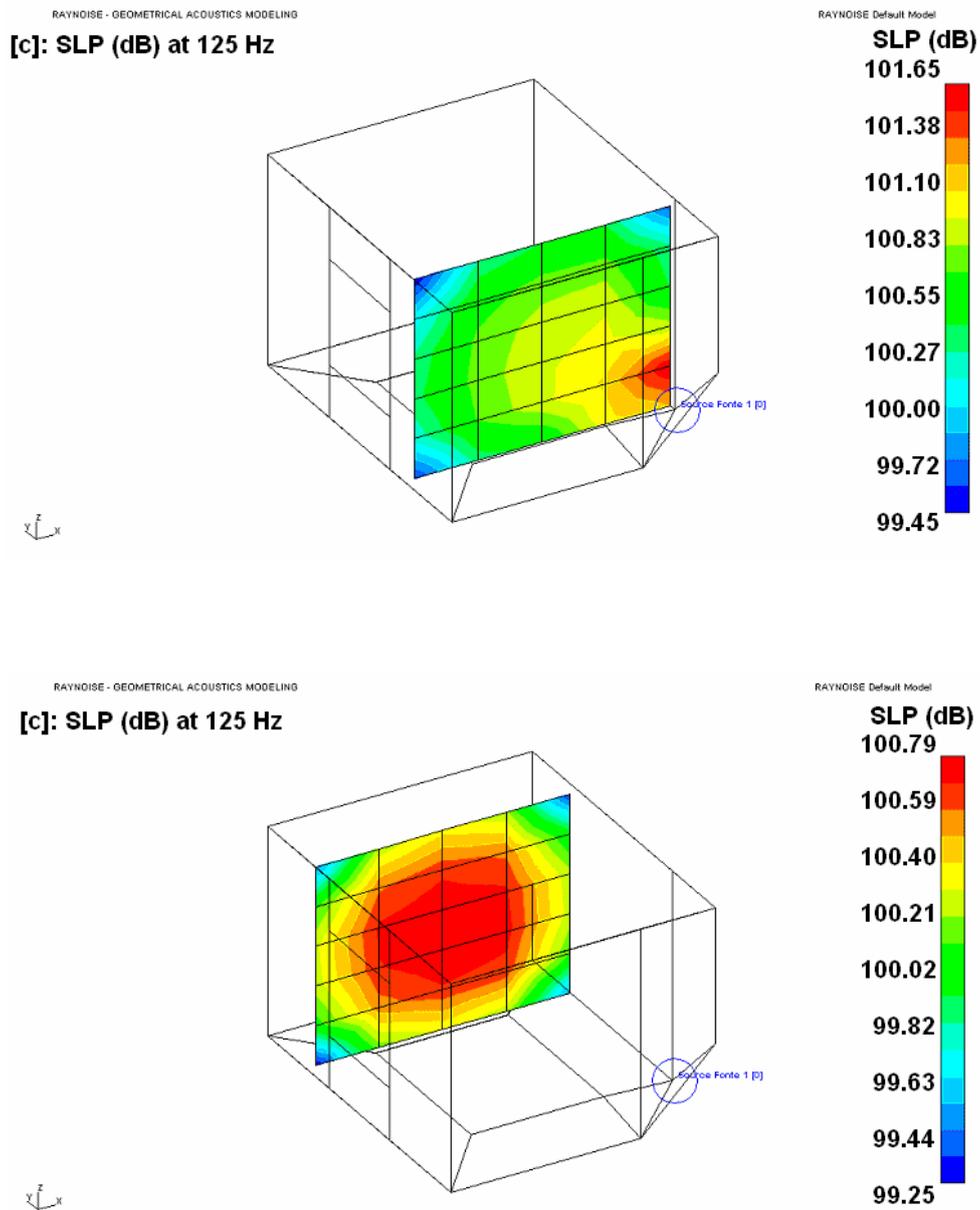


Figura 6.24 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 125 Hz nos planos verticais 1 e 2.

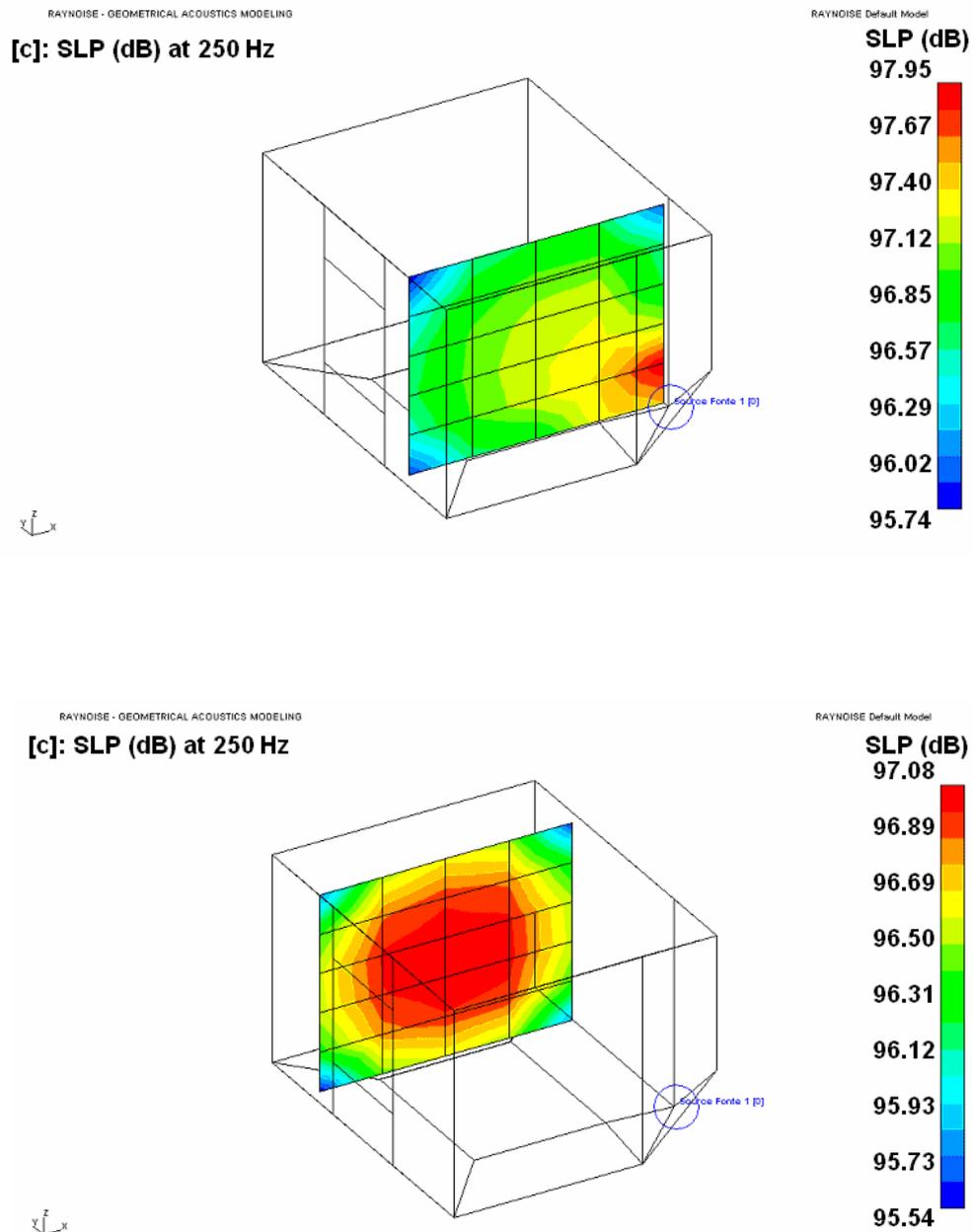


Figura 6.25 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 250 Hz nos planos verticais 1 e 2.

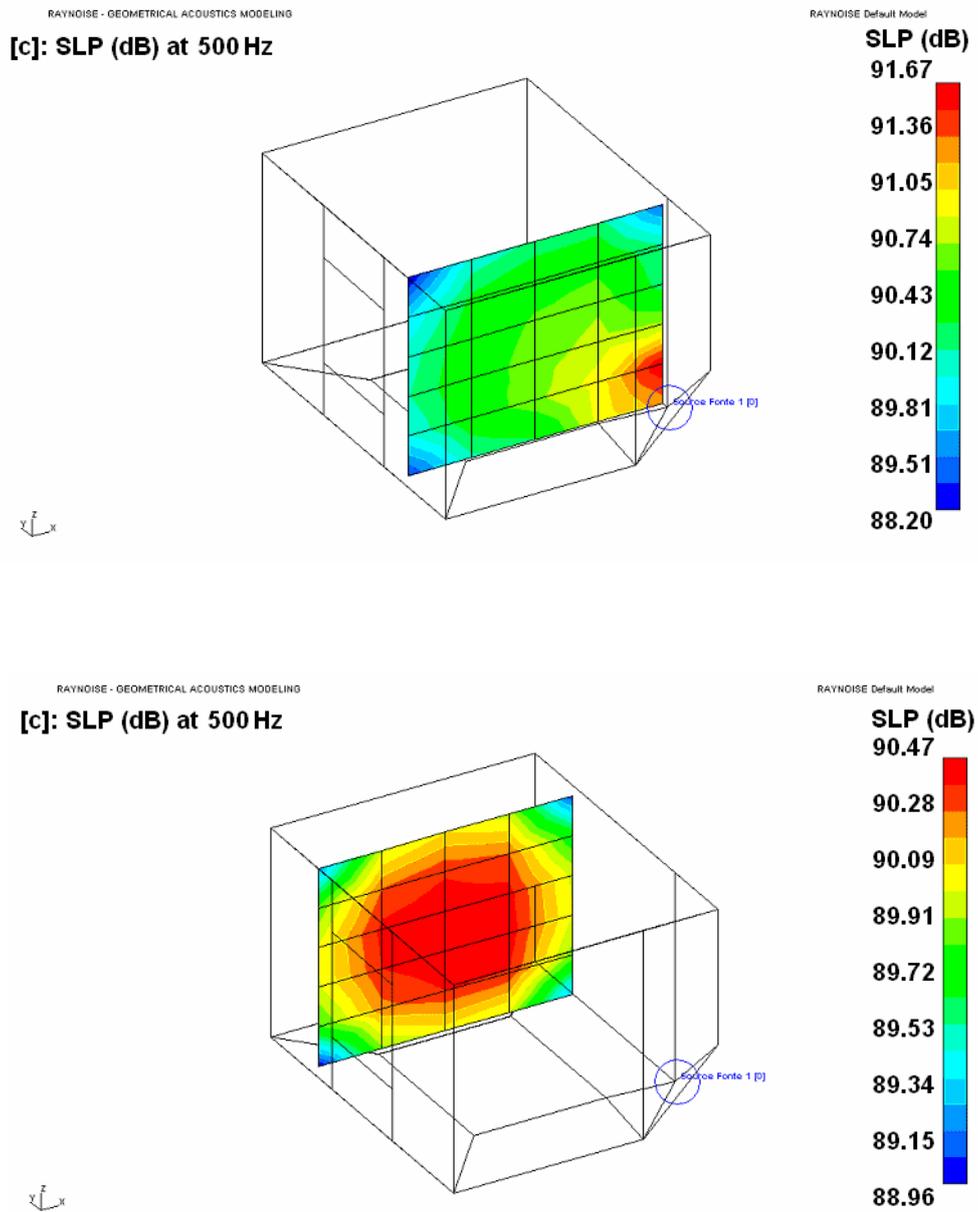


Figura 6.26 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 500 Hz nos planos verticais 1 e 2.

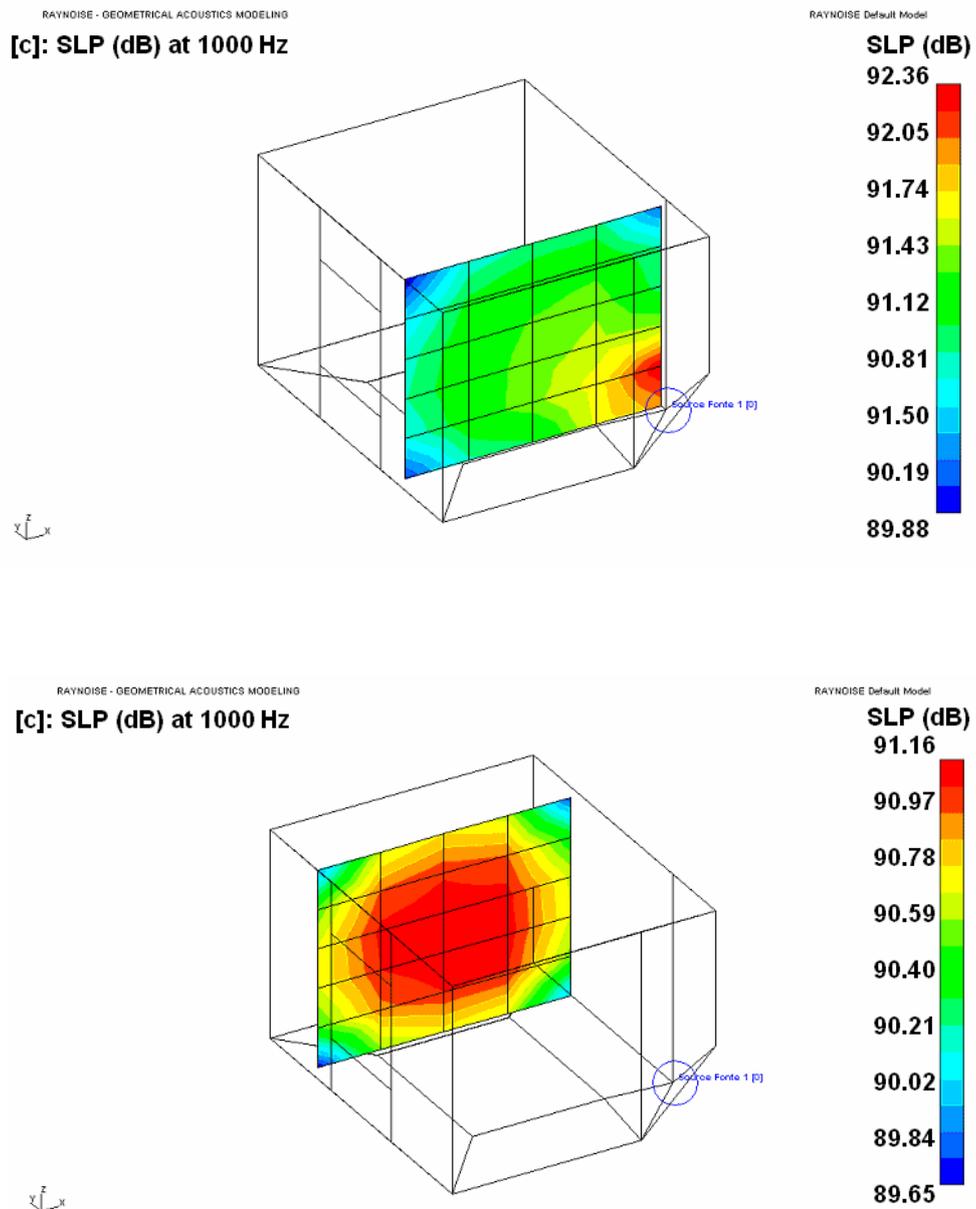


Figura 6.27 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 1000 Hz nos planos verticais 1 e 2.

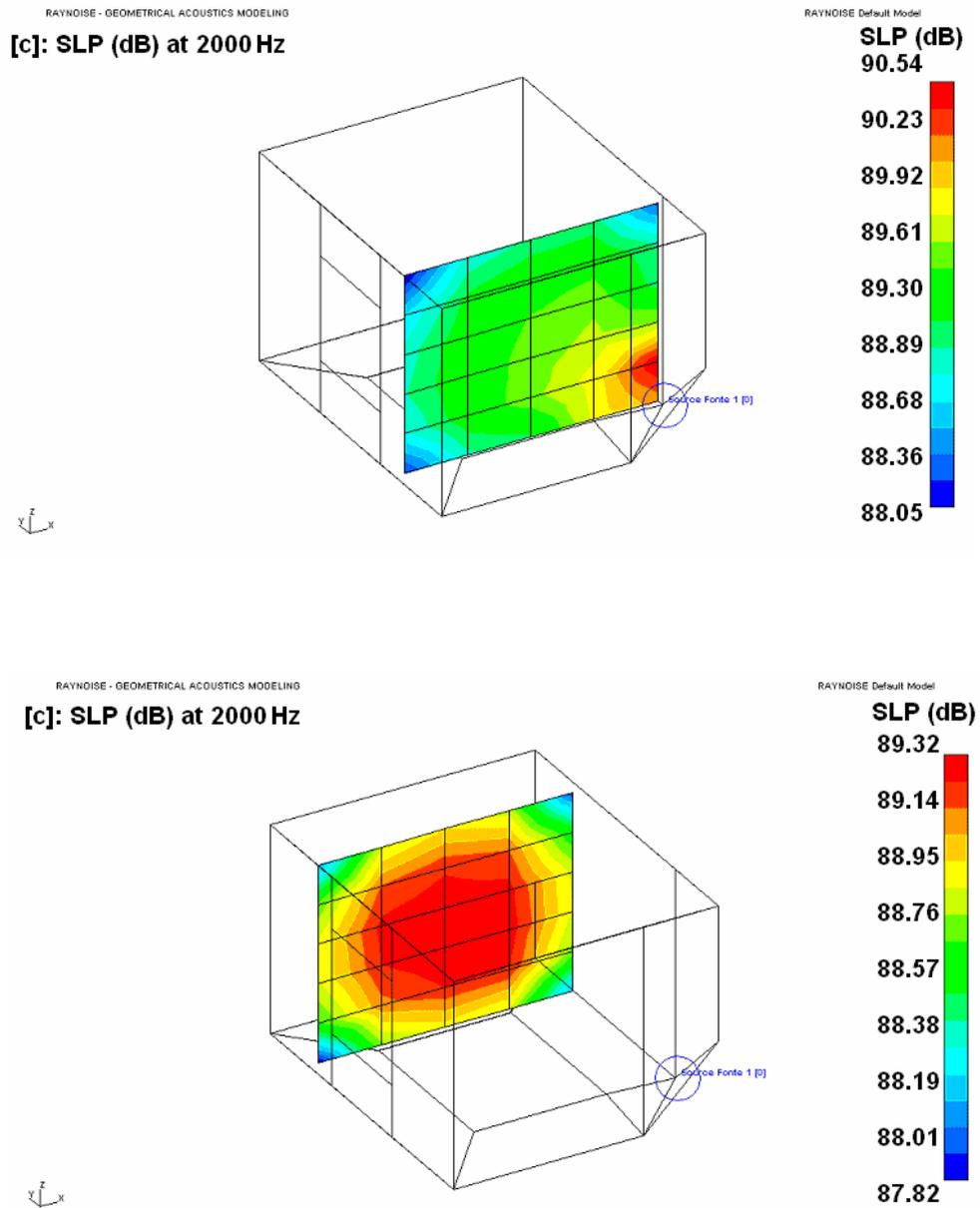


Figura 6.28 – Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 2000 Hz nos planos verticais 1 e 2.

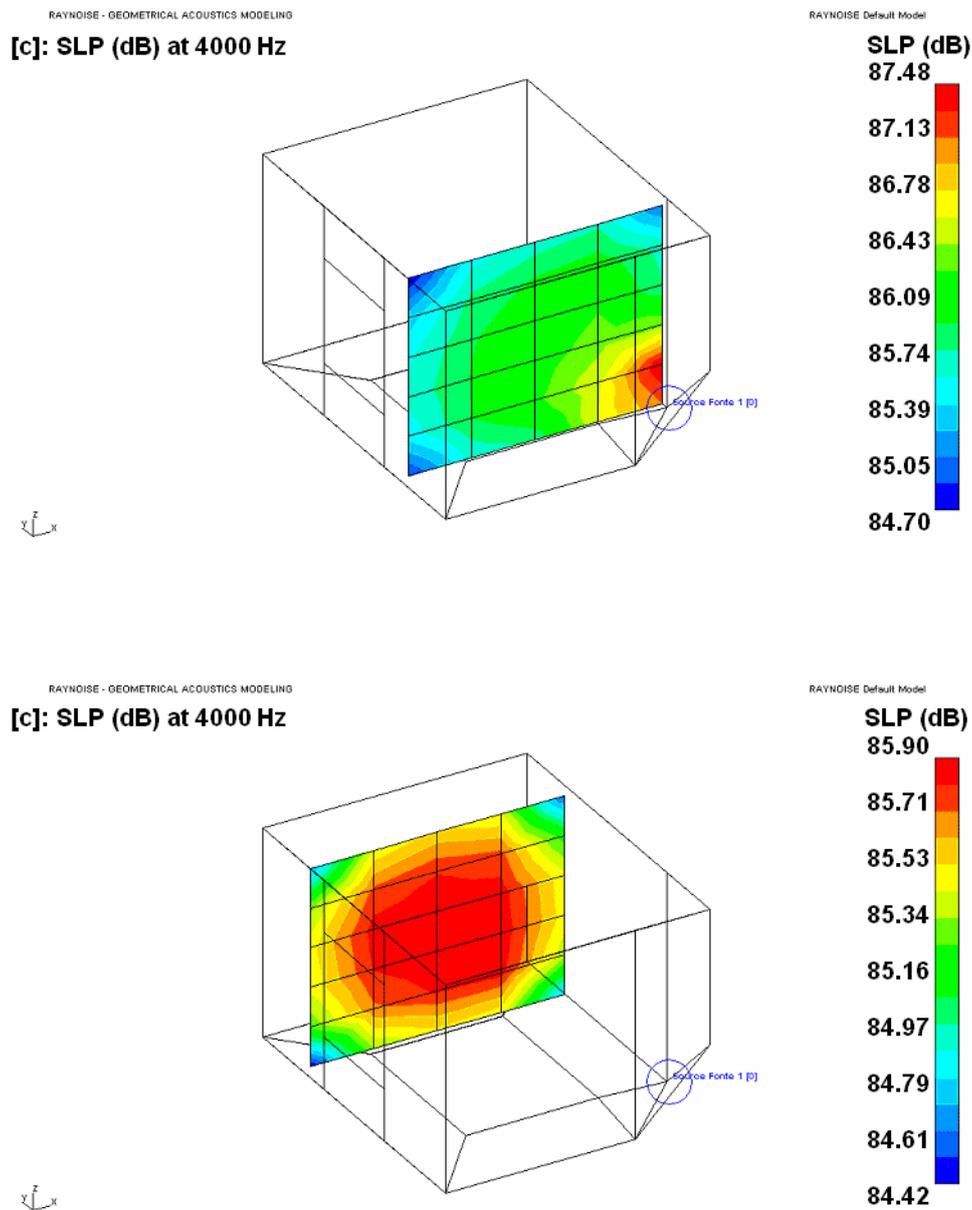


Figura 6.29 - Campo de pressão sonora para a banda de frequência de 4000 Hz nos planos verticais 1 e 2.

O conjunto de Figs. 6.18 a 6.29 permite concluir que o campo de pressão sonora no interior da câmara apresenta uma boa difusibilidade, uma vez que os valores de *NPS*, por banda de frequência, estão bem próximos uns dos outros. Portanto, isso indica que a distribuição de pressão na sala é aproximadamente uniforme, condição essa necessária para a realização dos testes de absorção sonora em câmaras reverberantes.

6.4.2 Sala simulada com amostra SNX2 na posição 1(2º Caso).

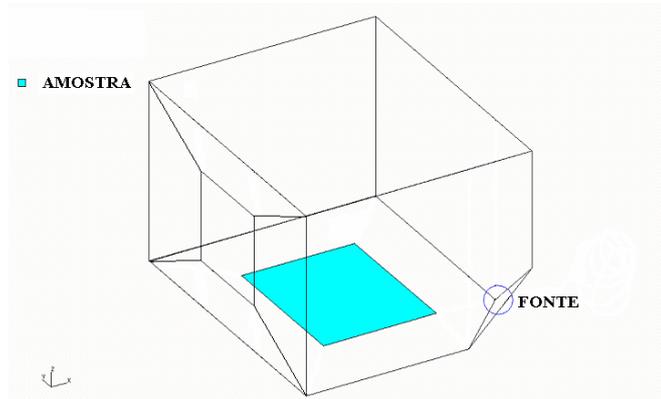


Figura 6.30 – Amostra SNX2 na Posição 1.

O gráfico da Fig. 6.31 mostra os tempos de reverberação medidos e simulados numericamente no programa RAYNOISE, onde se percebe que nas bandas de 1 a 4 kHz os valores de tempo de reverberação mostraram-se bem próximos dos valores obtidos experimentalmente, mas para as bandas de 125 e 500 Hz esses valores apresentaram uma pequena diferença, tendo sido observada para a banda de 250 Hz uma diferença maior.

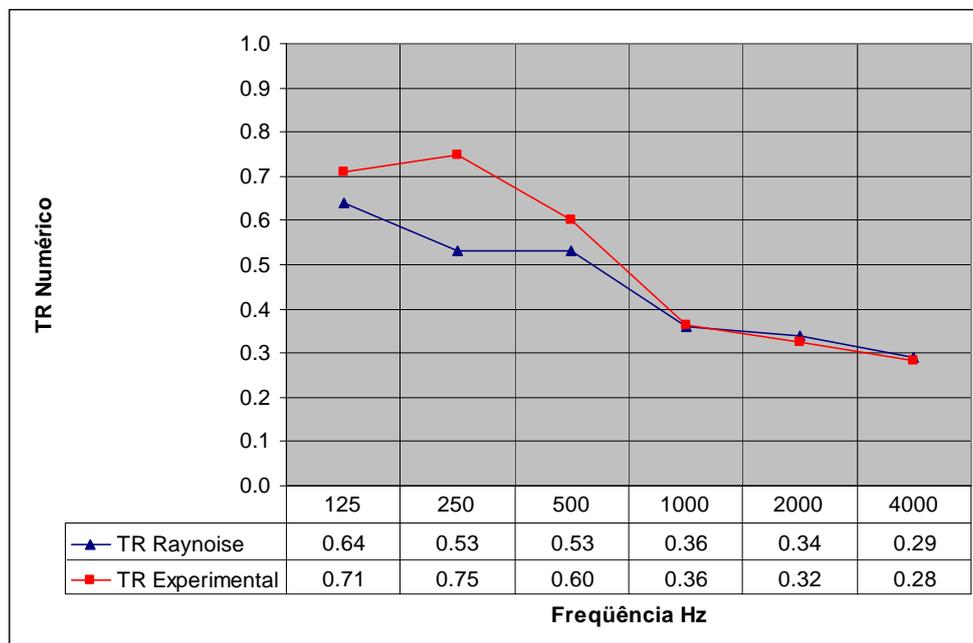


Figura 6.31 – Comparação dos TR's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 na Posição 1.

Na Fig. 6.32 podem ser visualizados os valores de *NPS*, numérico e experimental, em bandas de oitava. Novamente, observa-se uma boa concordância entre estes valores.

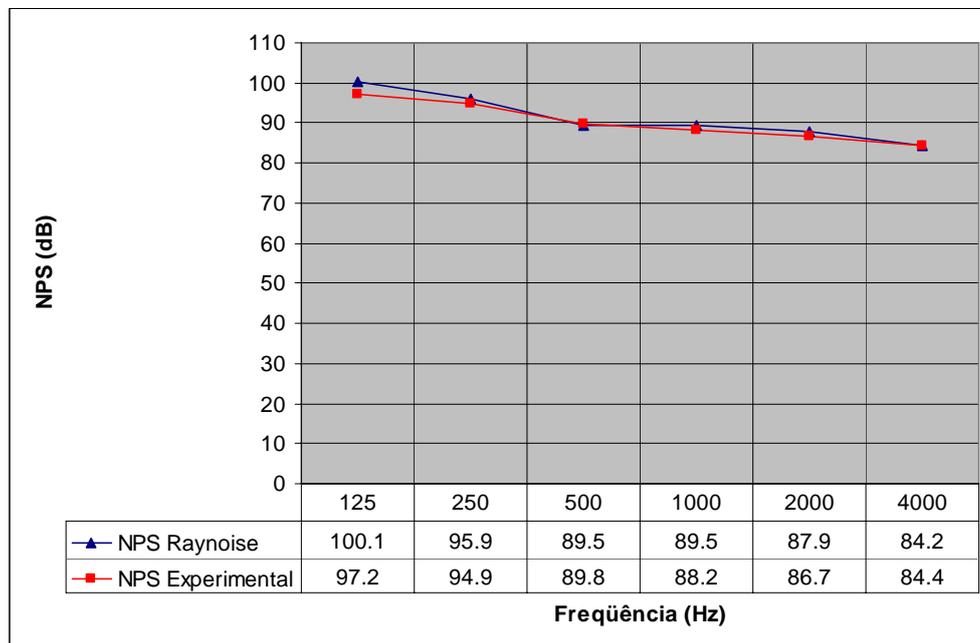


Figura 6.32 – Comparação dos *NPS* numérico e experimental da sala com amostra *SNX2* na Posição 1.

6.4.3 Sala simulada com amostra *SNX2* na posição 2 (3º Caso).

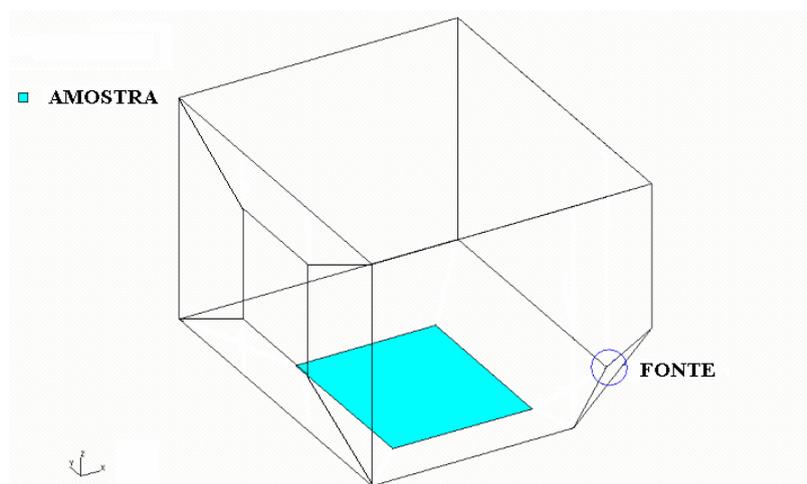


Figura 6.33 – Amostra na Posição 2.

No gráfico abaixo têm-se os tempos de reverberação experimentais e numéricos, onde se percebe que nas bandas de 125 e 250 Hz esses valores

apresentaram uma pequena diferença. Já para as bandas de 500 Hz a 4 kHz esses valores tiveram uma boa concordância.

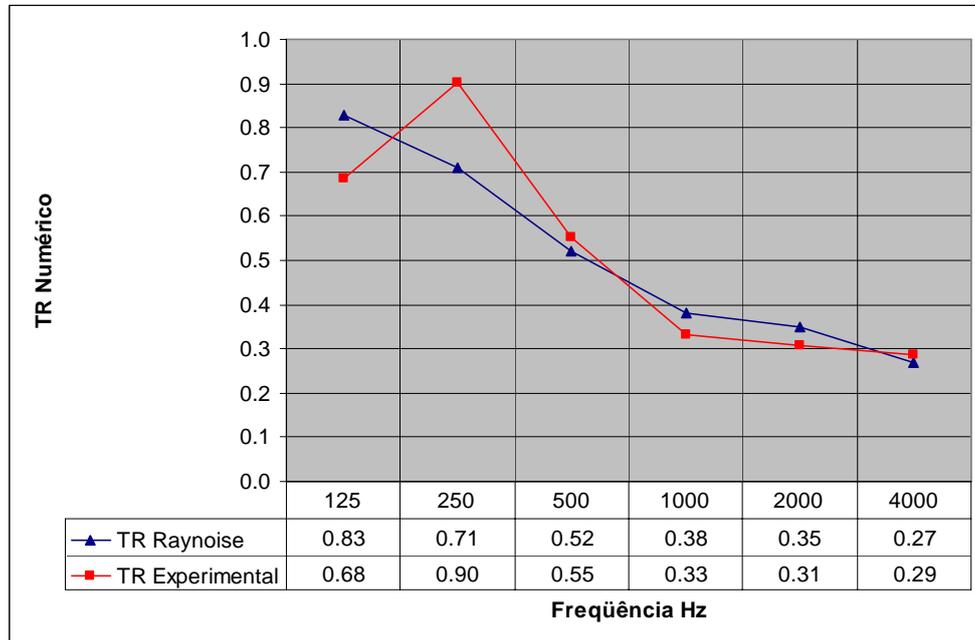


Figura 6.34 – Comparação dos TR's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 na Posição 2.

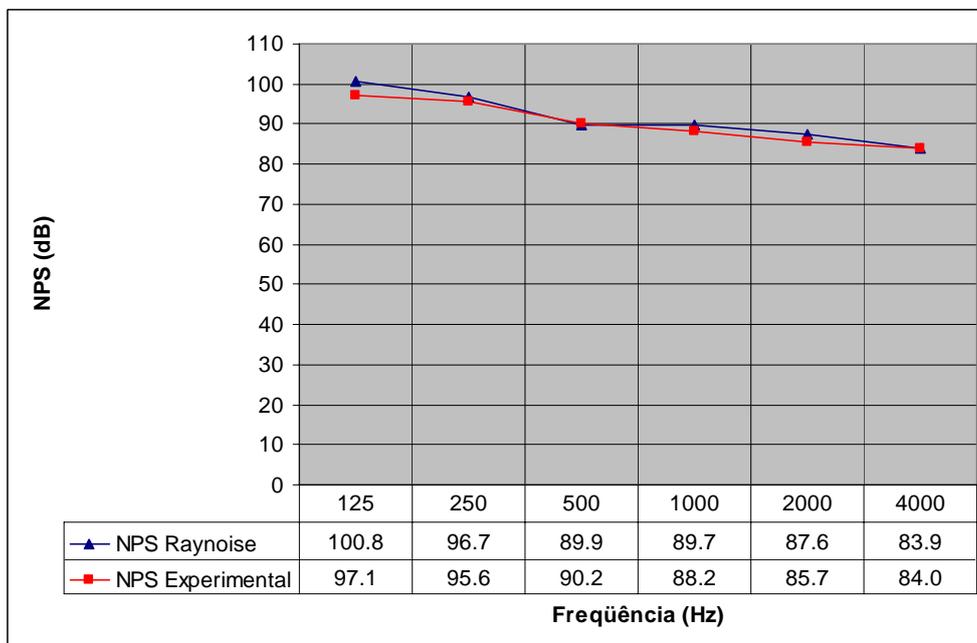


Figura 6.35 – Comparação dos NPS's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 na Posição 2.

Com relação ao *NPS*, este caso também apresentou um bom resultado, pois os valores obtidos mostraram-se bem próximos uns dos outros para cada banda de frequência como mostrado no gráfico da Fig. 6.35.

6.4.4 Sala simulada com amostra SNX2 com Geometria Diferente (4º Caso).

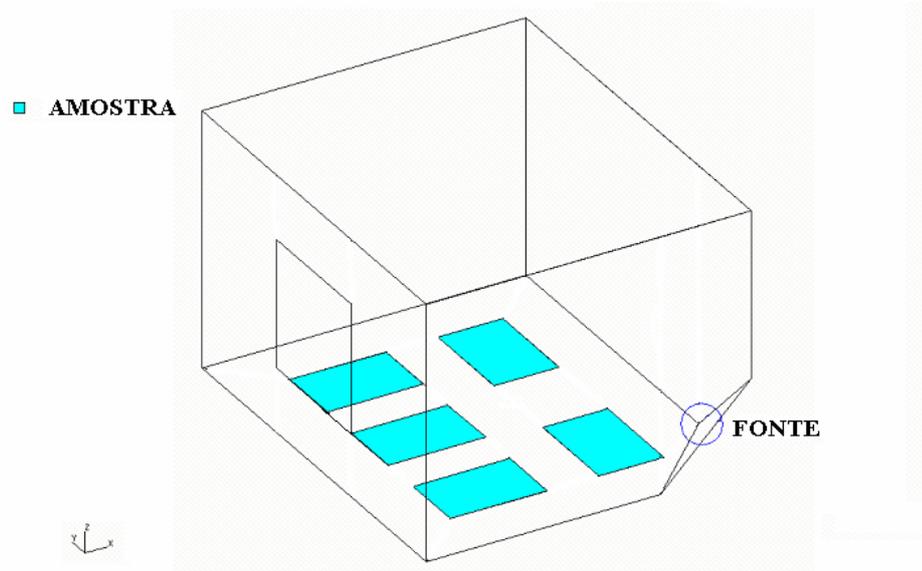


Figura 6.36 – Amostra com Geometria Diferente.

Neste caso, estudou-se a influência da geometria da amostra nos resultados, a partir de uma distribuição diferente da amostra em relação às distribuições anteriores, constatando-se que para as bandas de 500 Hz a 4 kHz não houve mudança nos valores de *TR*. As Figuras 6.37 e 6.38 mostram os resultados obtidos para esta configuração, enquanto que a Fig. 6.39 apresenta os resultados superpostos.

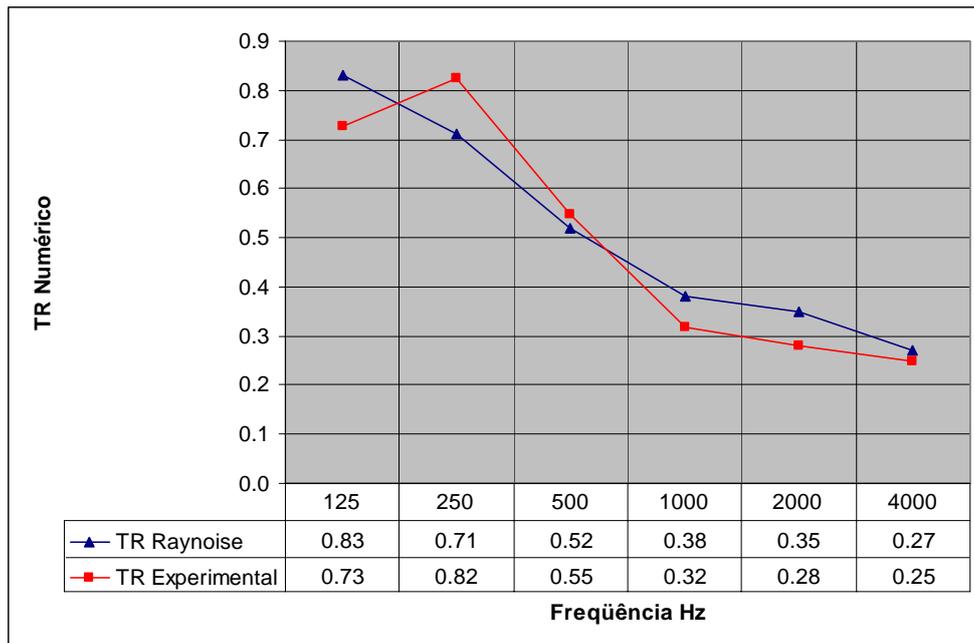


Figura 6.37 – Comparação dos TR's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 com Geometria Diferente.

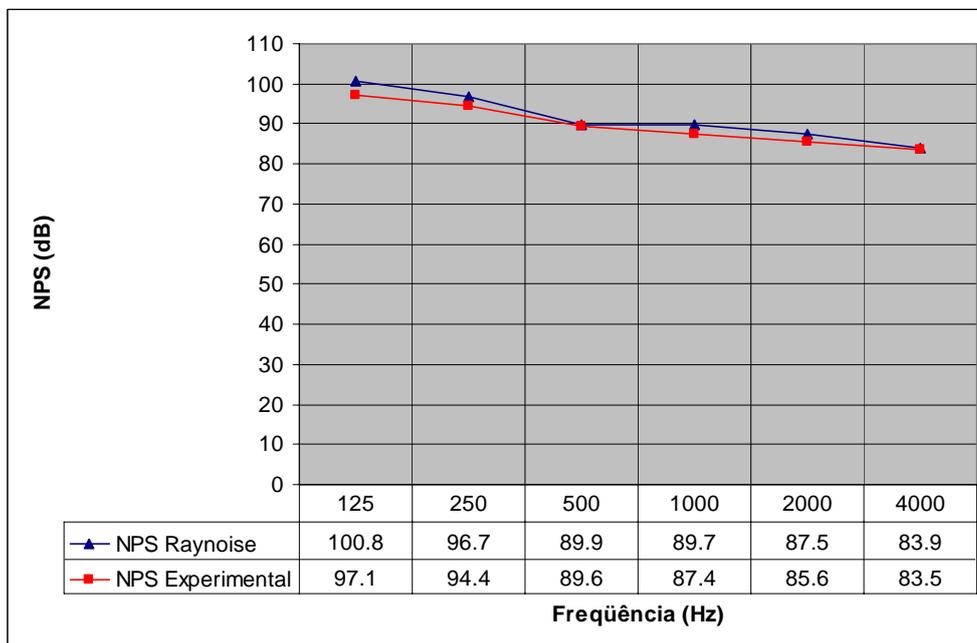


Figura 6.38 – Comparação dos NPS's numérico e experimental da sala com amostra SNX2 com Geometria Diferente.

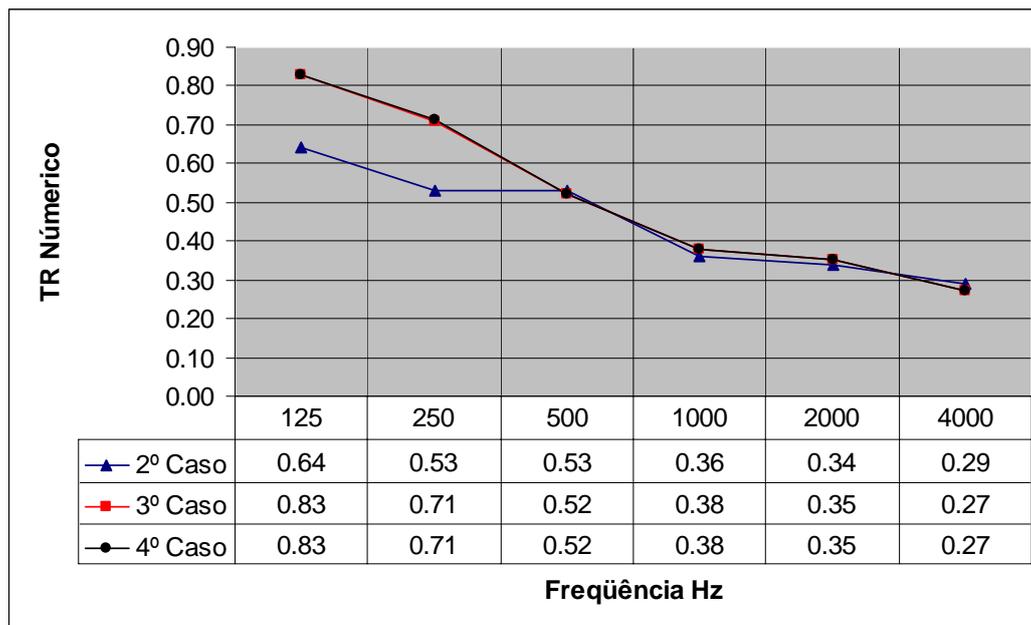


Figura 6.39 – Comparação dos TR's numéricos da sala com amostra SNX2 com as três configurações analisadas (Posição 1, Posição 2 e Geometria Diferente).

Tabela 6.8 – Valores de TR nos três casos estudados.

Frequência (Hz)	1º Caso		2º Caso		3º Caso	
	TR Experimental	TR Numérico	TR Experimental	TR Numérico	TR Experimental	TR Numérico
125	0,71	0,64	0,68	0,83	0,73	0,83
250	0,75	0,53	0,90	0,71	0,82	0,71
500	0,60	0,53	0,55	0,52	0,55	0,52
1000	0,36	0,36	0,33	0,38	0,32	0,38
2000	0,32	0,34	0,31	0,35	0,28	0,35
4000	0,28	0,29	0,29	0,27	0,25	0,27

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o procedimento de modelagem através do Método de Acústica de Raios, tendo por base o *software* comercial RAYNOISE. Inicialmente, foi desenvolvido o teste de convergência do modelo a partir dos parâmetros Número de Raios e Ordem de Reflexão, os quais são de grande relevância para os cálculos, tendo como resultado a utilização de um total de 10.000 raios e uma Ordem de Reflexão igual a 50.

Os resultados apresentados neste capítulo permitem afirmar que o modelo computacional, concebido e processado no *software* RAYNOISE, produziu previsões

aceitáveis tanto para os Tempos de Reverberação quanto para os Níveis de Pressão Sonora nos quatro casos estudados, com exceção às bandas de oitava de 125 Hz e 250 Hz, o que já era esperado, uma vez que o Método de Acústica de Raios não se aplica para bandas de baixa frequência.

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, levando-se em conta os objetivos propostos. Primeiramente, o enfoque é para a validade do projeto, no que diz respeito à construção da câmara reverberante em escala reduzida e ao estudo dos fenômenos acústicos. Posteriormente, são apresentadas as conclusões sobre as características de absorção dos materiais ensaiados e, ainda, alguns comentários sobre a utilização do *software* RAYNOISE para a modelagem acústica frente aos resultados experimentais obtidos para cada um dos casos modelados.

Finalmente, ao final do capítulo são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros nesta área de pesquisa.

7.2 CONCLUSÕES

A primeira conclusão deste trabalho, refere-se à própria validade do projeto da câmara reverberante em escala reduzida, que foi concebida para o ensaio de materiais acusticamente absorventes e possibilitar a realização de aulas práticas de acústica, as quais permitirão a aplicação de métodos de ensaio para a medição do tempo de reverberação, a utilização da metodologia usada na qualificação de uma câmara reverberante e a medição do coeficiente de absorção de materiais porosos e/ou fibrosos, comparando a performance de um em relação ao outro.

Assim, construída a câmara reverberante em escala reduzida, tendo por base as dimensões em escala real da Câmara Reverberante da Universidade Federal de Santa Maria, a partir de materiais facilmente encontrados no comércio de Belém-PA, a um custo bastante aceitável, é possível ressaltar que o compensado utilizado na construção demonstrou ter um valor de isolamento sonora razoável para os objetivos propostos, apesar de não ser tão espesso, assim como as folhas de vidro utilizadas

na janela de visualização. Percebeu-se também que as borrachas utilizadas para a vedação da tampa frontal da câmara e os isoladores de vibração mostraram-se eficientes para os fins a eles determinados.

No que diz respeito à metodologia de qualificação da câmara, foi realizada uma adaptação do procedimento normalizado que consta na norma ISO 354, o qual mostrou-se razoável frente aos resultados obtidos e seu reflexo nas medições realizadas na câmara construída, conforme pode ser constatado a partir das medições realizadas no material comercial SONEX – Placa Flexonic, para o qual houve uma boa aproximação, principalmente nas altas frequências, entre os resultados medidos na Câmara reduzida e os fornecidos pelo fabricante, os quais certamente foram obtidos em uma Câmara Reverberante qualificada de acordo com a norma técnica.

As discordâncias apresentadas em algumas das bandas de oitavas medidas tornam os valores obtidos na Câmara em escala reduzida mais conservativos, o que permite o desenvolvimento e estudo de materiais de absorção sonora, pois se estes materiais forem validados na Câmara em escala reduzida certamente apresentarão uma performance superior em Câmaras Reverberante reais.

Os painéis de fibra de coco ensaiados apresentaram valores de coeficiente de absorção considerados promissores no que tange ao controle do tempo de reverberação em recintos fechados, uma vez que os valores medidos estão na ordem de grandeza dos materiais de uso comercial. Especificamente, os valores das amostras de fibra de coco (FC3, FC4 e FC5) para as bandas de oitavas mais baixas (125, 250, 500 e 1000 Hz) apresentaram uma performance melhor que os das amostras de SONEX (SNX1 e SNX2). Este comportamento dos painéis de fibra de coco os qualifica, também, para o desenvolvimento de silenciadores resistivos a serem aplicados em sistemas de exaustão ou de ar condicionado, embora com desempenho inferior aos sistemas desenvolvidos a partir de materiais comerciais já consagrados como, por exemplo, a lã de rocha.

Na etapa de simulação numérica, os resultados obtidos foram animadores, uma vez que ficou consolidada a possibilidade de utilização da Câmara Reverberante em escala reduzida para a calibração de modelos numéricos,

compreensão e sensibilidade na utilização de *softwares* comerciais de modelagem acústica. Para as simulações computacionais realizadas com o *software* RAYNOISE, de uma forma geral, os valores de tempo de reverberação mostraram uma boa concordância com os valores obtidos de forma experimental, embora fosse esperado que em algumas faixas de frequências esses valores apresentassem alguma diferença, explicada pelo número de modos existentes em cada banda.

Finalmente, pode-se afirmar que o objetivo maior deste trabalho foi alcançado, ou seja, o de prestar uma contribuição à realização de ensaios experimentais na área da acústica, permitindo consolidar os conceitos adquiridos nas aulas teóricas, bem como o de viabilizar uma infra-estrutura básica que permita o desenvolvimento de painéis e/ou mantas de materiais absorventes confeccionados com matéria prima regional, tal como as fibras vegetais que são abundantes na Amazônia.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão deste trabalho é possível apresentar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1. Melhorar a performance da Câmara em escala reduzida, no que tange ao vazamento acústico, fazendo a introdução de chapas de aço no revestimento das paredes internas da câmara;
2. Investigar, a partir de várias configurações de disposição de amostras no piso da Câmara Reverberante em escala reduzida, a alteração do coeficiente de absorção sonora;
3. Testar, na Câmara Reverberante em escala reduzida, a performance dos painéis FC3, FC4 e FC5 quando usados na forma de *Baffle*;
4. Desenvolver painéis acústicos com fibras regionais diversas e comparar os resultados obtidos para o coeficiente de absorção sonora, de modo a permitir inferir a performance relativa destas fibras e apontar a que melhor se adequa para utilização no controle do tempo de reverberação em recintos fechados;

5. Desenvolver uma bancada de testes e medir a performance dos painéis de fibra de coco FC3, FC4 e FC5 em silenciadores do tipo resistivo, com configuração circular e retangular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M. A. N.**, (2002) **(A)**, “Investigation on the parameters involved in measuring sound absorption in reverberant chambers: critical review of the standard [in Portuguese]”, D.Sc. Thesis, Federal University of Rio de Janeiro, COPPE.
- ARAÚJO, M. A. N.**, (2002) **(B)**, “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.
- BARRON, M., COLEMAN, S.**, (2000), “Measurements of the absorption by auditorium seating – A Model Study”, *Journal of Sound and Vibration* 239 (4), pp.573-587.
- BBC** Research Department Report N° 1970/13, (1970), “Acoustic Scaling: General Outline”.
- BISTAFA, S. AND BRADLEY, J.** “Reverberation Time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics”. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (2), 861-874, 2000
- BRUEL & KJAER**, *Measurements in Building Acoustic*, Naerum - Denmark, Janeiro, 1988.
- 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.
- CARNEIRO, F. L.**, (1996) “Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos”, 2ª edição.
- CARRIÓN, A. (2001)** “Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona: Ediciones alfaOmega Capitulo I . p45, 61-69.

FERNANDES, J. “Acústica e Ruídos”. Faculdade de Engenharia-Unesp-Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo. Setembro 2000.

GERGES, SAMIR N. Y. (2000), “Ruído Fundamentos e Controle” 2ª edição, Florianópolis – SC – Brasil,

GOMES M. H. A. AND GERGES S. N. Y. (2001). “Modelling of room acoustic parameters using LMS technique and Numerical simulation” Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro.

GOMES, M. H. A., (2002), “Determination of the Acoustical Random-Incidence Scattering Coefficient”, D. Sc. Thesis, Federal University of Santa Catarina.

GRECO, M. (2000). Análise do problema harmônico de radiação e difusão acústica, usando o método de elementos de contorno. São Carlos, 2000. 88p. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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 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.

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.

KUTTRUFF, H., (2000), "Room Acoustics", Fourth Edition, Spon Press.

LOPEZ, M. R., *Acustica Arquitetonica – Soluciones Practicas*, Editorial Paraninfo S. A, 1992.

MASSARANI, P. M., (2002). "Medição de Absorção Sonora pelo Método In Situ em Ambiente Reverberante". "II Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações. SIBRAMA.

NASCIMENTO, R. L. X, ZINDELUK M., (2005). "Scaled Absorption Materials for Scale Modeling" The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering

NUNES, A. (2001). Análise Modal Teórica e Experimental de cavidades com absorção sonora, Campinas; faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 115p. Dissertação (Mestrado).

PULSE MANUAL – Getting Started (2003), Brüel&Kjær

RAYNOISE REV 3.1 (2002) Getting Started Manual LMS INTERNATIONAL N.V.

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, 1965.

SOUZA, M. C. R. (1997). "Previsão do ruído em salas por raios acústicos e ensaios experimentais", Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação (Mestrado).

TADEU A. J.B., MATEUS, M.R. D. (2001). "Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation" *Applied Acoustics* 62 (2001) 307±325

ÚRIA, M. G. T., (2005). “Avaliação acústica de salas de aula em escolas públicas na cidade de Belém-Pará: uma proposição de projeto acústico”, Belém; Universidade Federal do Pará, Dissertação (Mestrado).

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.

XIAOXIANG, ET AL (2004). “*Optimization of the locations of the loudspeaker and absorption material in a small room*” Applied Acoustics 65, pp 791–806, 2004.

ANEXOS

Rotinas elaboradas no programa Raynoise 3.1

Sala simulada sem amostra.

Input Mesh Format Dxf File "Reginaldo.dxf" Return

Medium Air

Temperature 28

RelHumidity 60

Return

Material 1

Name 'Compensado'

Sabine 0.015 0.03 0.03 0.04 0.04 0.04 0.05 0.05

Return

Set 1 Name "Paredes"

Elements 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Return

Assign

Material 1

Elements Set 1

Return

Source 1

Name 'Fonte 1'

Power 88 88.7 85 79.2 79.9 78.1 75.5 64.7

Position 0.92 0.12 0.10

Return

Point Plane 0 0 .28 To 1 0 .28 Divide 4 To 0 1.2 .28 Divide 5 To 1 1.2 .28 Return

Parameters

Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90

EchoSave 10 PathStore 5

StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40

Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1

Return

Mapping

Source 1

Frequency 63 To 8000 Octave

Echo Step 1 Point 1

Return

Postprocess

Source 1

Frequency 63 To 8000 Octave

Echo Step 10 Point All

Return

Response

Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Points 3
File P3.res
Return

Parameters

Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90
EchoSave 10 PathStore 5
StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40
Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1
Return

Reverberation

Source 1
Return

Extract Reverberation Return

Extract Result Pressure

Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24
Return

Extract Result SPL

Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24
Return

Save Return

Sala simulada com amostra SNX2 na Posição 1

Input Mesh Format Dxf File "Reginaldo.dxf" Return

Medium Air

Temperature 28
RelHumidity 60
Return

Material 1

Name 'Compensado'
Sabine 0.015 0.03 0.03 0.04 0.04 0.04 0.05 0.05
Return

Material 2

Name 'Sonex35x35'
Sabine 0.025 0.05 0.16 0.24 0.59 0.71 0.95 0.74
Return

Set 1 Name "Paredes"

Elements 1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Return

Set 2 Name "Amostra"

Elements 8
Return

Assign

Material 1

Elements Set 1
Return
Assign
Material 2
Elements Set 2
Return
Source 1
Name 'Fonte 1'
Power 88 88.7 85 79.2 79.9 78.1 75.5 64.7
Position 0.92 0.12 0.10
Return
Point Plane 0 0 0.28 To 1 0 0.28 Divide 4 To 0 1.2 0.28 Divide 5 To 1 1.2 0.28 Return
Parameters
Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90
EchoSave 10 PathStore 5
StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40
Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1
Return
Mapping
Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Echo Step 1 Point 1
Return
Postprocess
Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Echo Step 10 Point All
Return
Response
Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Points 3
File P3.res
Return
Parameters
Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90
EchoSave 10 PathStore 5
StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40
Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1
Return
Reverberation
Source 1
Return
Extract Reverberation Return
Extract Result Pressure
Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24
Return

Extract Result SPL

Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24

Return

Save Return

Sala simulada com amostra SNX2 na Posição 2

Input Mesh Format Dxf File "ReginaldoPos2.dxf" Return

Medium Air

Temperature 28

RelHumidity 60

Return

Material 1

Name 'Madeira'

Sabine 0.015 0.03 0.03 0.04 0.04 0.04 0.05 0.05

Return

Material 2

Name 'SNX 2'

Sabine 0.025 0.05 0.16 0.24 0.59 0.71 0.95 0.74

Return

Set 1 Name "Paredes"

Elements 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

Return

Set 2 Name "Amostra"

Elements 18

Return

Assign

Material 1

Elements Set 1

Return

Assign

Material 2

Elements Set 2

Return

Source 1

Name 'F1'

Power 88 88.7 85 79.2 79.9 78.1 75.5 64.7

Position 0.92 0.12 0.10

Return

Point Plane 0 0 0.28 To 1 0 0.28 Divide 4 To 0 1.2 0.28 Divide 5 To 1 1.2 0.28 Return

Save Return

Parameters

Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90

EchoSave 10 PathStore 5

StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40

Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1

Return

Mapping

Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Echo Step 1 Point 1
Return

Postprocess

Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Echo Step 10 Point All
Return

Response

Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Points 3
File P3.res
Return

Parameters

Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90
EchoSave 10 PathStore 5
StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40
Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1
Return

Reverberation

Source 1
Return

Extract Reverberation Return**Extract Result Pressure**

Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24
Return

Extract Result SPL

Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24
Return

Save Return**Sala simulada com amostra SNX2 com Geometria Diferente**

Input Mesh Format Dxf File "Reginaldo 5 amostras.dxf" Return

Medium Air

Temperature 28
RelHumidity 60
Return

Material 1

Name 'Paredes'
Sabine 0.015 0.03 0.03 0.04 0.04 0.04 0.05 0.05
Return

Material 2

Name 'SNX 2'

```
Sabine 0.025 0.05 0.16 0.24 0.59 0.71 0.95 0.74
Return
Set 1 Name "Paredes"
Elements 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 18 19 20 21 22 23 24 25 26
Return
Set 2 Name "Amostra"
Elements 13 14 15 16 17
Return
Assign
Material 1
Elements Set 1
Return
Assign
Material 2
Elements Set 2
Return
Source 1
Name 'F1'
Power 88 88.7 85 79.2 79.9 78.1 75.5 64.7
Position 0.92 0.12 0.10
Return
Point Plane 0 0 0.28 To 1 0 0.28 Divide 4 To 0 1.2 0.28 Divide 5 To 1 1.2 0.28 Return
Save Return
Parameters
Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90
EchoSave 10 PathStore 5
StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40
Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1
Return
Mapping
Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Echo Step 1 Point 1
Return
Postprocess
Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Echo Step 10 Point All
Return
Response
Source 1
Frequency 63 To 8000 Octave
Points 3
File P3.res
Return
Parameters
Rays 10000 ReflectionOrder 50 TimeWindow 2000 DynamicRange 90
```

EchoSave 10 PathStore 5
StoreLevel 1 HInterval 10 HLength 40
Diffuse 0 Diffract 0 Tail 0 RayMethod 1
Return
Reverberation
Source 1
Return
Extract Reverberation Return
Extract Result Pressure
Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24
Return
Extract Result SPL
Points 7 8 9 12 13 14 17 18 19 22 23 24
Return
Save Return