



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**DIFUSIVIDADE DO CAMPO SONORO DE
CÂMARA REVERBERANTE PARA
MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO SONORA**

MARCIO GUIMARÃES MATTOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

ORIENTADOR: PROF. SAMIR NAGI YOUSRI GERGES, PH.D.

Florianópolis
1999

MATTOS, Marcio G. Difusividade do campo sonoro de câmara reverberante para medição de absorção sonora. Florianópolis, 1999, 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Samir N. Y. Gerges, Ph.D.

Defesa: 27/05/1999

Resumo: Problemas na difusividade do campo sonoro de câmaras reverberantes geram erros na medição da absorção sonora, provocando imprecisões e causando discrepâncias entre valores medidos em diversos laboratórios. Com a finalidade de avaliar e aperfeiçoar o campo acústico da câmara reverberante do LVA-UFSC, diversas medições de absorção sonora de uma amostra de referência (também medida em outros laboratórios) foram realizadas na câmara, contendo várias configurações de difusores. Para caracterizar a difusividade do campo sonoro da câmara, três métodos clássicos foram utilizados. Simulações numéricas pelo método dos raios acústicos precisaram o método por comparações a valores medidos.

Palavras Chave: acústica, câmara reverberante, difusores, absorção sonora

DIFUSIVIDADE DO CAMPO SONORO DE CÂMARA REVERBERANTE
PARA MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO SONORA

Marcio Guimarães Mattos

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Dissertação defendida e aprovada em 27/05/1999, pela comissão examinadora



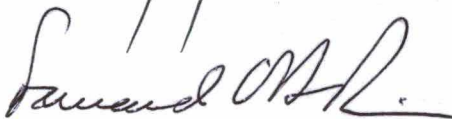
Prof. Samir N. Y. Gerges, Ph.D. - Orientador - Moderador



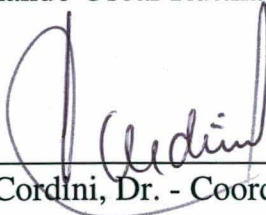
Prof. José Luiz Bento Coelho, Ph.D.



Prof. Elvira Barros Viveiros da Silva, Dr.Eng.



Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Ph.D.



Prof. Jucilei Cordini, Dr. - Coordenador do CPGEC

*Aos meus pais,
Selma e João Henrique,
por todo amor e dedicação*

*Aos meus irmãos,
Suzana e Fernando,
por estarem sempre ao meu lado*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Samir N. Y. Gerges, pela oportunidade, orientação e incentivo;

Aos professores José L. Bento Coelho, Elvira B. Viveiros da Silva e Fernando O. Ruttkey Pereira, por contribuírem, com suas análises e sugestões, para a melhoria deste trabalho;

Aos professores e colegas do LVA e, em especial, aos amigos Arlinton J. Calza, Felipe Vergara, Mauricy C. R. Souza e Marcio H. A. Gomes pela colaboração e incentivo na concretização deste trabalho;

Ao Prof. João Candido Fernandes, pela orientação na graduação e pela revisão deste trabalho;

Ao Prof. Roberto de Oliveira, coordenador do CPGEC na gestão 97/99, e a Irizete Meneses, da Coordenadoria;

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT.....	XV
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 METODOLOGIA.....	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 CÂMARA REVERBERANTE.....	6
2.1.1 <i>Configuração e Aplicação</i>	7
2.1.2 <i>Difusores</i>	13
2.1.3 <i>Avaliação do Campo Sonoro</i>	18
2.2 DIFUSIVIDADE DO CAMPO SONORO EM CÂMARA REVERBERANTE.....	26
2.3 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	33
2.3.1 <i>Causas de Discrepância</i>	34
2.3.2 <i>Medição de absorção sonora em câmara reverberante</i>	36
2.4 SIMULAÇÃO POR RAIOS ACÚSTICOS	42
2.4.1 <i>Software Raynoise - Princípios de modelamento</i>	45
Capítulo 3 - COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA.....	51
3.1 COMPARAÇÃO ENTRE LABORATÓRIOS	51
3.1.1 <i>Resultados das Medições dos Coeficientes de Absorção Sonora da Amostra de Referência realizadas em 5 Laboratórios</i>	53
3.2 MEDIÇÃO NA CÂMARA REVERBERANTE DO LVA/UFSC.....	54
3.2.1 <i>Câmara Reverberante do LVA/UFSC</i>	55
3.2.2 <i>Instrumentação e Procedimento</i>	57
3.2.3 <i>Cálculo dos Tempos de Reverberação</i>	63
3.2.4 <i>Cálculo dos Coeficientes de Absorção</i>	64

3.2.5	<i>Coefficientes de Absorção Sonora para várias Configurações de Difusores</i>	65
3.2.6	<i>Repetibilidade do Método</i>	80
Capítulo 4 - DIFUSIVIDADE DO CAMPO SONORO NA CÂMARA REVERBERANTE		81
4.1	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	81
4.2	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA	85
4.3	DENSIDADE MODAL	89
4.4	FREQÜÊNCIA DE SCHROEDER.....	98
Capítulo 5 - SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE RAIOS ACÚSTICOS		100
5.1	CONSTRUÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO.....	101
5.1.1	<i>Construção do Modelo</i>	101
5.1.2	<i>Dados do Modelo</i>	102
5.1.3	<i>Parâmetros de Cálculo</i>	104
5.1.4	<i>Procedimento de Cálculo</i>	106
5.2	CONVERGÊNCIA DOS RAIOS E REFLEXÕES	107
5.2.1	<i>Convergência da Ordem de Reflexão</i>	107
5.2.2	<i>Convergência do Número de Raios</i>	110
5.3	AJUSTE DO MODELO	111
5.4	SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS MEDIDOS NA CÂMARA.....	116
Capítulo 6 - CONCLUSÕES		119
6.1	SÍNTESE DOS RESULTADOS	120
6.1.1	<i>Coefficiente de Absorção Sonora</i>	120
6.1.2	<i>Simulação pelo método de raios acústicos</i>	121
6.1.3	<i>Difusividade do Campo Sonoro da Câmara Reverberante</i>	122
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		125
APÊNDICE I - CONSTRUÇÃO DO MODELO DA CÂMARA REVERBERANTE PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....		130
APÊNDICE II - DADOS DE ENTRADA PARA OS MODELOS SIMULADOS		134

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Planta e corte da câmara reverberante do Lab. de eletroacústica de Hangzhou [DUANQI et al. (1991)].....	8
Figura 2.2 - Dimensão, forma e disposição dos difusores esféricos de concreto da câmara reverberante do Lab. de eletroacústica de Hangzhou [DUANQI et al. (1991)].....	9
Figura 2.3 - Vista interna da câmara reverberante do Lab. de Hangzhou [DUANQI et al. (1991)]	9
Figura 2.4 - Geometria da câmara reverberante do LAL-CIC [GIULIANO et al. (1996)].....	11
Figura 2.5 - Forma da câmara reverberante do LAL-CIC (dimensões em m) [GIULIANO et al. (1996)].....	11
Figura 2.6 - Valores médios de coeficiente de absorção sonora na faixa de frequência entre 500 - 5000 Hz em função do número de difusores [BENEDETTO et al. (1981)].	16
Figura 2.7 - Diagrama esquemático das câmaras de reverberação investigadas nº 1 a 5 [DÄMMIG (1991)].	17
Figura 2.8 - Representação de uma onda plana incidente [NÉLISSE e NICOLAS (1997)]	23
Figura 2.9 - Comparativo do coeficiente de correlação em banda estreita [NÉLISSE e NICOLAS (1997)].	24
Figura 2.10 - Caminhos de reflexão de primeira ordem em uma caixa retangular [LMS (199-)]..	46
Figura 2.11 - Caminho de reflexão correspondente a fonte imagem de terceira ordem [LMS (199-)]	47
Figura 2.12 - Construção de fonte imagem [LMS (199-)].....	47
Figura 2.13 - Teste de visibilidade [LMS (199-)].....	48
Figura 2.14 - Raios Sonoros [LMS (199-)].....	49
Figura 2.15 - Propagação do cone sobre as superfícies [LMS (199-)]	49
Figura 2.16 - Método dos raios triangulares [LMS (199-)].....	50
Figura 3.1 - Variação dos resultados do coeficiente de absorção sonora de uma amostra medidos em 19 laboratórios [COPPS et al. (1995)].....	52
Figura 3.2 - Coeficientes de absorção da amostra de referência medido em 5 Laboratórios	54
Figura 3.3 - Câmara reverberante do LVA-UFSC - Formato.....	55
Figura 3.4 - Difusores Inclinados	56
Figura 3.5 - Difusores Suspensos	56
Figura 3.6 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora – Instrumentação.....	58
Figura 3.7 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora - Câmara Reverberante	58

Figura 3.8 - Esquema de Medição.....	59
Figura 3.9 - Câmara Reverberante - Planta	61
Figura 3.10 - Câmara Reverberante – Corte.....	61
Figura 3.11 - Câmara Reverberante - Perspectiva.....	62
Figura 3.12 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora - Microfone.....	62
Figura 3.13 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora - Fonte Sonora	62
Figura 3.14 - Cálculo do TR pelas curvas de decaimento do NPS.....	63
Figura 3.15 - Curva de decaimento do Tempo de Reverberação	63
Figura 3.16 - Faixa de Avaliação para cálculo do TR20	64
Figura 3.17 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores I	66
Figura 3.18 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores II.....	67
Figura 3.19 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores III.....	68
Figura 3.20 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores IV	69
Figura 3.21 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores V.....	70
Figura 3.22 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores VI	71
Figura 3.23 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores VII.....	72
Figura 3.24 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores VIII.....	73
Figura 3.25 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores IX	74
Figura 3.26 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores X.....	75
Figura 3.27 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores XI	76
Figura 3.28 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores XII	77
Figura 3.29 - Coeficientes de absorção sonora, em função da frequência, para as 12 configurações de difusores.....	78
Figura 3.30 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora medidos na câmara com 8 difusores suspensos, com os outros 5 laboratórios.	79

Figura 4.1 - Câmara com 4 difusores suspensos	82
Figura 4.2 - Câmara com 8 difusores suspensos	83
Figura 4.3 - Câmara com 10 difusores suspensos	83
Figura 4.4 - Estabilização da curva de coeficiente de absorção em função do número de difusores.....	84
Figura 4.5 - Distribuição dos pontos de medição do NPS.....	86
Figura 4.6 - Desvio Padrão em função da frequência da Distribuição Especial do NPS na câmara reverberante sem difusores	87
Figura 4.7 - Desvio Padrão em função da frequência da Distribuição Especial do NPS na câmara reverberante com difusores	88
Figura 4.8 - Desvios Padrão do NPS em função da frequência para câmara com e sem difusores	89
Figura 4.9 - Distribuição de frequências no espaço	92
Figura 4.10 - Resposta da câmara reverberante sem difusores.....	97
Figura 4.11 - Resposta da câmara reverberante com difusores	98
Figura 5.1 - Modelo da câmara reverberante simulado.....	100
Figura 5.2 - Ambiente do software Raynoise.....	101
Figura 5.3 - Convergência do número de raios para câmara sem amostra	110
Figura 5.4 - Convergência do número de raios para câmara com amostra.....	111
Figura 5.5 - Tempos de reverberação Simulados x Medidos para câmara sem amostra.....	112
Figura 5.6 - Tempos de reverberação Simulados x Medidos para câmara com amostra	113
Figura 5.7 - Tempos de reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara sem amostra	114
Figura 5.8 - Tempos de reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara com amostra	115
Figura 5.9 - Tempos de reverberação do Modelo Calibrado da Câmara Reverberante	116
Figura 5.10 - Coeficientes de absorção simulados da amostra de referência	116
Figura 5.11 - Tempos de reverberação Medidos x Simulados para câmara com e sem amostra	117
Figura 5.12 - Coeficientes de absorção da amostra de referência medidos x simulados.....	117
Figura I.1 - modelo da câmara reverberante construído no arquivo DXF.....	131
Figura I.2 - modelo da amostra construído no arquivo DXF.....	131
Figura I.3 - modelos dos difusores construídos no arquivo DXF.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Desvio Padrão máximo admissível para banda de um terço de oitava descrito na norma ISO 3741 (1988)	26
Tabela 2.2 - Máxima área de absorção sonora equivalente para câmara com volume $V=200\text{ m}^3$	38
Tabela 2.3 - Temperatura e umidade relativa do ar durante a medição de T_1 e T_2	39
Tabela 2.4 - Fator "I"	42
Tabela 3.1 - Coeficientes de Absorção da amostra de referência medidos em vários Laboratórios	53
Tabela 3.2 - Dimensões dos Difusores "Inclinados"	56
Tabela 3.3 - Dimensões dos Difusores "Suspensos"	57
Tabela 3.4 - Ordem de disposição dos microfones e fonte na câmara reverberante	60
Tabela 3.5 - Locação das posições de microfone, fonte e amostra na câmara reverberante	60
Tabela 3.6 - Repetibilidade do coeficiente de absorção sonora	80
Tabela 4.1 - Coeficiente de Absorção para câmara com 4 difusores suspensos.....	82
Tabela 4.2 - Coeficiente de Absorção para câmara com 8 difusores suspensos.....	83
Tabela 4.3 - Coeficiente de Absorção para câmara com 10 difusores suspensos.....	84
Tabela 4.4 - Coordenadas Cartesianas dos pontos de medição do NPS.....	86
Tabela 4.5 - Desvio Padrão dos NPS medidos na câmara reverberante sem difusores.....	87
Tabela 4.6 - Desvio Padrão dos NPS medidos na câmara reverberante com difusores	88
Tabela 4.7 Freqüências de Ressonância teóricas da câmara reverberante em estudo calculadas de acordo com a equação (4.6)	93
Tabela 4.8 - Densidade Modal calculada em bandas de terça de oitava.....	96
Tabela 4.9 - Freqüências de Schroeder por bandas de terça de oitava	99
Tabela 5.1 - Ordem de Reflexão para câmara vazia.....	109
Tabela 5.2 - Ordem de Reflexão para câmara com amostra.....	109
Tabela 5.3 - Parâmetros de entrada do modelo simulado para câmara sem amostra	112
Tabela 5.4 - Tempos de Reverberação Simulados x Medidos para Câmara sem amostra	112
Tabela 5.5 - Parâmetros de entrada do modelo simulado para câmara com amostra	113
Tabela 5.6 - Tempos de Reverberação Simulados x Medidos para Câmara com amostra.....	113

Tabela 5.7 - Parâmetros de entrada do modelo ajustado para câmara sem amostra.....	114
Tabela 5.8 - Tempos de Reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara sem amostra	114
Tabela 5.9 - Parâmetros de entrada do modelo ajustado para câmara com amostra	115
Tabela 5.10 - Tempos de Reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara com amostra.....	115
Tabela 5.11 - Coeficientes de Absorção simulados da amostra de referência.....	116
Tabela I.1 - Séries, Elementos e Materiais associados ao modelo de simulação	133
Tabela II.1 - Coeficientes de Absorção atribuídos aos materiais: concreto e difusor	135
Tabela II.2 - Coeficientes de Absorção atribuídos ao material: amostra.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Auxiliado por Computador)
CBN.....	<i>Conical Beam Method</i> (Método dos raios cônicos)
DXF.....	<i>Drawing eXchange File</i> (arquivo de transferência de projeto)
MISM.....	<i>Mirror Image Source Method</i> (Método da fonte imagem especular)
RTM.....	<i>Ray Tracing Method</i> (Método dos raios acústicos)
TBM.....	<i>Triangular Beam Method</i> (Método dos raios triangulares)

LISTA DE SÍMBOLOS

A.....	Área de Absorção Equivalente - [m ²]
c.....	Velocidade do Som - [m/s]
d.....	Coeficiente de Difusão - [adimensional]
EDT.....	<i>Early Decay Time</i> (Tempo de decaimento inicial) - [s]
f.....	Frequência - [Hz]
MFP.....	<i>Mean Free Path</i> (Caminho Médio Livre) - [m]
NPS.....	Nível de Pressão Sonora - [dB]
NR.....	Número de Raios - [adimensional]
OR.....	Ordem de Reflexão - [adimensional]
r.....	Índice de repetibilidade [adimensional]
S.....	Área da Superfície - [m ²]
SPL.....	<i>Sound Pressure Level</i> (Nível de Pressão Sonora) - [dB]
STI.....	<i>Speech Transmission Index</i> (Índice transmissão da fala) - [adimensional]
t.....	Temperatura - [°C]
T, TR.....	Tempo de Reverberação - [s]
V.....	Volume - [m ³]
α	Coeficiente de Absorção de Sabine - [adimensional]
λ	Comprimento de Onda - [m]
σ	Desvio Padrão - [adimensional]

RESUMO

Problemas na difusividade do campo sonoro de câmaras reverberantes geram erros na medição da absorção sonora, provocando imprecisões e causando discrepâncias entre valores medidos em diversos laboratórios.

Com a finalidade de avaliar e aperfeiçoar o campo sonoro da câmara reverberante do LVA-UFSC, diversas medições de absorção sonora de uma amostra de referência (também medida em outros laboratórios) foram realizadas na câmara, contendo várias configurações de difusores. Para caracterizar a difusividade do campo sonoro da câmara, três métodos clássicos foram utilizados. Através de um software comercial, simulações numéricas pelo método dos raios acústicos indicaram a precisão do método pela comparação aos valores medidos.

Os resultados mostraram que os coeficientes de absorção sonora da amostra de referência, medidos na câmara do LVA-UFSC, alcançaram os níveis de absorção determinados pelos outros laboratórios. As medições de difusividade indicaram uma melhora na distribuição sonora da câmara, favorecendo a correta medição da absorção sonora. As simulações numéricas resultaram próximas aos valores medidos, apesar de exigirem grandes iterações de calibração. Apesar da câmara do LVA-UFSC possuir paredes paralelas e volume menor que o recomendado por norma internacional, valores corretos de coeficiente de absorção foram encontrados, indicando que câmaras com configurações fora das recomendadas pela norma, podem possuir as características e propriedades necessárias para medir, com precisão, o coeficiente de absorção sonora de materiais.

Palavras-chaves: acústica, câmara reverberante, difusores, absorção sonora

ABSTRACT

Problems with the diffuseness of sound field of reverberation rooms give rise to errors in the measurement of sound absorption, leading to imprecisions and causing discrepancies among the values measured in several laboratories.

In order to assess and improve the sound field of the LVA-UFSC reverberation room, several measurements of sound absorption of a test material (also measured in other laboratories) were carried out in the chamber, comprising various diffusers configurations. Using a commercial ray tracing software, numerical simulations have shown the precision of this method by comparing with measured values.

The results have shown that the sound absorption coefficient measured in the LVA-UFSC chamber reached similar levels of absorption as determined by other laboratories. The diffuseness measurements have indicated an improvement of the sound distribution within the chamber, thus enabling the correct measurement of sound absorption. The numerical simulations were close to the measured values, despite the sensitivity of the technique to the input parameters. Even though the LVA-UFSC chamber has parallel walls and volume smaller than that recommended by the ISO 354 (1985), correct values of absorption coefficient were found, thus indicating that chambers with configurations different from those recommended by the standard can have the necessary characteristics and properties to measure accurately the absorption coefficient of materials.

Keywords: acoustics, reverberation room, diffusers, sound absorption

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o intuito de mensurar determinadas grandezas acústicas, desenvolvidas teoricamente por modelos matemáticos que utilizam o campo sonoro difuso como premissa, foi criada a câmara reverberante.

Nessas medições há a exigência de um ambiente sonoro controlado, onde a energia média por unidade de volume seja aproximadamente a mesma em qualquer ponto no espaço; esta propriedade é chamada de difusão do campo sonoro. Com a câmara reverberante obtém-se um ambiente controlado e um campo sonoro difuso.

Uma câmara reverberante clássica consiste basicamente de uma sala completamente fechada (sem janelas e com uma porta acústica) feita de espessas paredes de concreto, planas e não paralelas. Sua estrutura é montada sobre amortecedores e envolvida por uma outra sala, de dimensões maiores, feita de tijolos.

Devido às paredes de concreto (com baixa absorção sonora), o som gerado dentro da câmara, por uma fonte controlada, reflete inúmeras vezes, gerando um campo reverberante e, idealmente, um campo sonoro difuso. Para auxiliar na melhor distribuição das ondas sonoras pela câmara, são usados difusores (suspensos ou rotativos).

Dentre as principais aplicações de uma câmara, pode-se citar a determinação do coeficiente de absorção sonora de materiais e objetos, a determinação da potência sonora de fontes, a determinação de perda de transmissão sonora de partições (utilizando duas câmaras reverberantes) e a indução acústica à vibração.

A medição da absorção sonora dos materiais consiste na determinação do coeficiente de absorção sonora α , que é a razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente no material. A medição de α em câmara reverberante consiste em medir-se o tempo de reverberação TR (onde TR é o tempo requerido para que o nível de pressão sonora decresça 60 dB depois da fonte sonora ser desligada) na câmara, com e sem a presença do material absorvedor.

Como o decaimento da pressão sonora em uma sala é controlado, principalmente, pela absorção sonora característica das superfícies das paredes, materiais e objetos existentes no ambiente, é através da medição do coeficiente de absorção que quantifica-se a razão deste decaimento e, assim, a qualidade acústica do ambiente.

1.1 JUSTIFICATIVA

No início da década de 80, o Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina construiu uma câmara anecóica¹. Após um determinado período, esta câmara foi dividida, sendo construída uma laje de concreto como piso, resultando em uma câmara semi-anecóica² na parte superior e uma câmara reverberante na parte inferior. Devido ao projeto inicial ter sido concebido como câmara anecóica, as paredes que resultaram na câmara reverberante configuraram-se paralelas entre si e com dimensões de largura e comprimento iguais.

Das medições realizadas na câmara reverberante do LVA, as principais são a determinação do coeficiente de absorção sonora e a determinação da potência sonora irradiada por fontes.

~

¹ Câmara Anecóica: câmara revestida de material de absorção em todas as seis superfícies, utilizada na simulação de campo livre (piso de tela).

² Câmara Semi-Anecóica: câmara com a mesma finalidade e configuração que a anecóica, com a diferença da superfície do piso ser refletora.

Com o intuito de estudar o campo sonoro de câmara reverberante e a reprodutibilidade da medição, cinco outros laboratórios realizaram medições do coeficiente de absorção sonora de uma espuma de poliuretano Sonex[®] SONEXRoc de 30 x 30 x 4,5 cm (chamada amostra de referência). Ao ser medido o coeficiente de absorção desta amostra na câmara reverberante do LVA, constatou-se que havia distorções entre os resultados medidos na câmara e os encontrados nos outros cinco laboratórios, principalmente nas médias e altas frequências.

Estas distorções indicavam a existência de algum problema com o campo sonoro gerado dentro da câmara reverberante do LVA, comprometendo a medição da absorção sonora.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Estudar a difusividade do campo sonoro da câmara reverberante do LVA-UFSC para a medição do coeficiente de absorção sonora de materiais.

Objetivos Específicos

↳ Pesquisar a influência dos difusores no campo sonoro da câmara e sua aplicabilidade na medição do coeficiente de absorção;

↳ Relacionar a medição de absorção sonora da amostra de referência nos cinco laboratórios, com a medição no LVA-UFSC.

↳ Através de simulação numérica pelo método de raios acústicos, comparar valores simulados de coeficiente de absorção com valores medidos na câmara reverberante.

↳ Verificar, através de métodos clássicos, o comportamento do campo sonoro na câmara reverberante.

1.3 METODOLOGIA

O estudo da difusividade do campo e sua adequação para a medição do coeficiente de absorção iniciou-se pela escolha do difusor a ser utilizado na câmara. Posteriormente, medições do coeficiente de absorção da amostra de referência foram realizadas, para várias configurações dos difusores escolhidos, e o comportamento da curva de coeficiente analisada.

Paralelo às medições, houve a construção e simulação do modelo da câmara reverberante. O modelo foi construído com a utilização do software AutoCAD[®] e, posteriormente, exportado ao software Raynoise[®]. A simulação dividiu-se em três etapas, sendo a primeira a convergência do número de raios e da ordem de reflexão, posteriormente, a calibração dos tempos de reverberação medidos e simulados e, finalmente, a simulação e comparação do modelo medido na câmara.

Por último, foi realizada uma avaliação do campo sonoro da câmara reverberante utilizando-se três métodos: estabilização do coeficiente de absorção, distribuição espacial da pressão sonora e densidade modal.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Seguindo a Introdução, uma revisão bibliográfica abordando os principais aspectos sobre os tópicos abordados no trabalho é desenvolvida no Capítulo 2.

O Capítulo 3 descreve as relações entre os coeficientes de absorção da amostra de referência medidos por diferentes laboratórios; posteriormente são apresentados os difusores utilizados no trabalho e todas as medições de coeficiente de absorção realizadas na câmara reverberante em estudo.

No Capítulo 4 é apresentada a simulação numérica da câmara reverberante pelo método de raios acústicos, os parâmetros envolvidos na simulação, além dos modelos simulados com seus respectivos valores.

A avaliação do campo sonoro da câmara reverberante, por três métodos, através de medições e modelos teóricos, é descrito no Capítulo 5.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões, as observações e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CÂMARA REVERBERANTE

"O som em uma sala consiste basicamente do som direto provindo da fonte, mais o som refletido ou difundido pelas paredes e objetos dentro da sala. O som, tendo uma ou mais reflexões, é chamado de som reverberante" PIERCE (1981).

Se houver apenas ondas diretas em todos os lugares, a sala será desprovida de reverberação; salas assim projetadas são chamadas de câmaras anecóicas. Uma câmara reverberante é, por outro lado, uma sala projetada de tal forma que o campo reverberante predomine em todo seu volume.

PIERCE (1981) comenta que uma idealização apropriada (formulada por W. C. Sabine¹ na virada do século) é a de que o som preenche uma câmara reverberante de tal modo que a energia média por unidade de volume em qualquer posição seja, aproximadamente, a mesma em qualquer outra região. O modelo matemático correspondente (modelo do campo reverberante), que Sabine deduziu de uma série de engenhosos experimentos, tem relação com o modelo de onda da acústica clássica (equação da onda mais as condições de contorno), similar ao da transferência de calor radiativo da teoria do eletromagnetismo ou da teoria cinética da mecânica clássica. Sua melhor aplicação ocorre em salas "grandes", cujas dimensões são substancialmente maiores que o comprimento de onda típico, e para salas "vivas", para qual é

¹ W. C. Sabine, " Architectural Acoustics", Eng. Rec., 38:520-522 (1898)

considerável pela razão do tempo determinado da energia total propagando dentro da sala, com a razão do tempo a qual a energia é perdida (absorvida ou transmitida para fora).

2.1.1 Configuração e Aplicação

Câmaras reverberantes possuem características e propriedades que regem o desempenho da difusão de seu campo acústico. Muitos laboratórios tem-se utilizado de diferentes procedimentos para aperfeiçoar essa difusividade nas câmaras reverberantes. Através de dois exemplos descritos em DUANQI et al. (1991) e GIULIANO et al. (1996), são mostradas as principais características que determinam a qualidade das câmaras reverberantes, diferentes aplicações e soluções para o aperfeiçoamento da difusividade e principais cuidados que devem ser tomados na elaboração de uma câmara reverberante.

Em um projeto acústico de uma câmara reverberante é de grande importância estabelecer um campo sonoro difuso. Várias tentativas têm sido feitas para estabelecer difusão sonora na maioria das câmaras reverberantes existentes, com resultados não tão satisfatórios e, conseqüentemente, difusores têm sido instalados. DUANQI et al. (1991) discutem em seu artigo a excelente difusão sonora obtida na câmara reverberante de Hangzhou usando paredes planas inclinadas e difusores fixos esféricos de concreto.

No laboratório de acústica da empresa de eletroacústica de Hangzhou - China, foi construída uma câmara reverberante para a medição da performance de alto-falantes e microfones, do nível de potência sonora de alto-falantes e outras fontes sonoras e do coeficiente de absorção de materiais. Para tais medições é requerida uma perfeita difusão sonora, um longo tempo de reverberação, uma distribuição uniforme do campo sonoro e um baixo nível de ruído de fundo.

A câmara reverberante de Hangzhou foi construída com capacidade efetiva de $286,6 \text{ m}^3$ e uma superfície total de 414 m^2 . A planta e corte da câmara são mostrados na Figura 2.1.

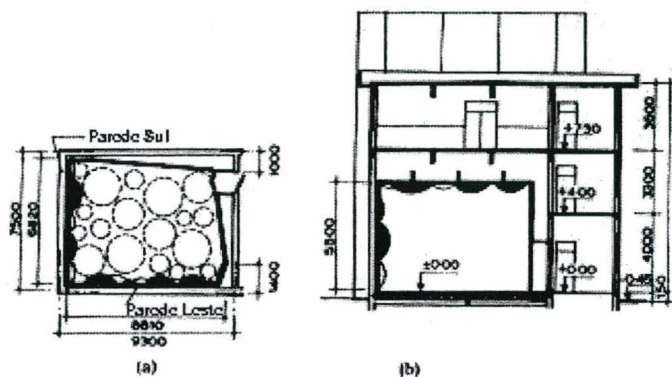


Figura 2.1 - Planta e corte da câmara reverberante do Lab. de eletroacústica de Hangzhou [DUANQI et al. (1991)]

O volume de $286,6 \text{ m}^3$ e as poucas áreas de absorção foram projetadas para dar boa difusividade, mas a difusão seria indubitavelmente afetada quando medido o coeficiente de absorção sonora de materiais, particularmente quando o piso fosse coberto pelos 10 m^2 de material absorvedor.

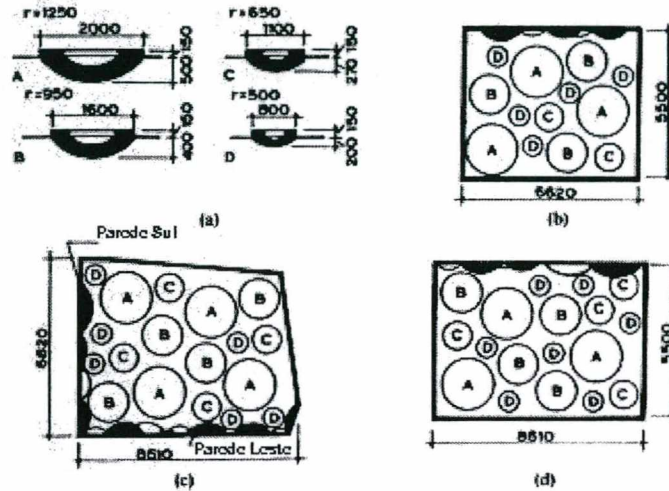
Para obter-se uma perfeita difusão do campo sonoro, os métodos usualmente adotados podem ser:

- adição de elementos suspensos distribuídos, ou difusores, na câmara, contudo, esses elementos podem reduzir em demasia o tempo de reverberação.

- instalação de painéis rotativos no centro da câmara, mas estes reduzem consideravelmente o espaço de medição. Há, também, o ruído do motor movimentando os painéis, de difícil eliminação.

Para remediar os efeitos mencionados acima, quatro diferentes difusores esféricos com raios de curvatura de 1,25 m, 0,95 m, 0,65 m e 0,50 m, feitos de concreto, foram usados na câmara. Os difusores foram fixados em duas paredes adjacentes e no teto, em um arranjo irregular, de forma que nenhum par de superfícies lisas iriam defrontar-se uma com a outra. As dimensões, forma, e

disposição dos difusores são mostradas na Figura 2.2. A Figura 2.3 mostra, em foto, o interior da câmara reverberante.



a) Dimensão e forma dos difusores; b) Disposição na parede sul; c) Disposição no teto; d) Disposição na parede leste

Figura 2.2 - Dimensão, forma e disposição dos difusores esféricos de concreto da câmara reverberante do Lab. de eletroacústica de Hangzhou [DUANQI et al. (1991)].

DUANQI et al. (1991) concluem que é possível estabelecer suficiente difusão em uma câmara reverberante sem difusores suspensos ou painéis rotativos. O uso de paredes inclinadas, com difusores de concreto esféricos fixos, é um dos melhores métodos para se obter um campo sonoro difuso em câmara reverberante.

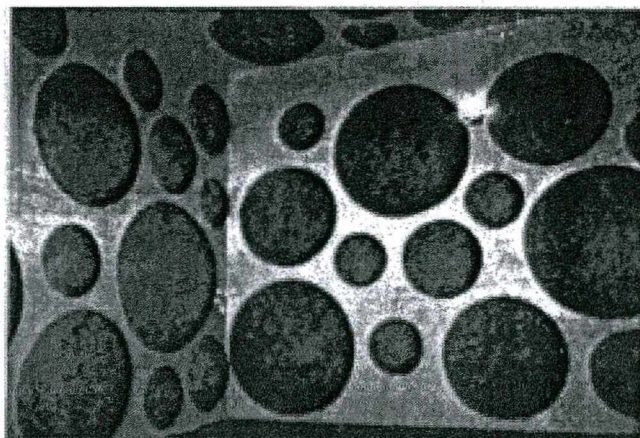


Figura 2.3 - Vista interna da câmara reverberante do Lab. de Hangzhou [DUANQI et al. (1991)]

O outro estudo recente de câmara reverberante foi realizado no *Laboratorio de Acústica y Luminotecnia da Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (LAL-CIC)*. A câmara reverberante do LAL-CIC tem volume de 189 m^3 , com paredes planas não paralelas, sendo usada para medições de absorção acústica. Em seu trabalho, GIULIANO et al.(1996) descrevem sobre a câmara do LAL-CIC, o cálculo do volume, as áreas de absorção acústica, os tempos de reverberação, a uniformidade e difusividade do campo sonoro e o nível de ruído de fundo.

O principal uso dessa câmara é a medição do coeficiente de absorção sonora de materiais e objetos. Para obter-se bons resultados na medição do coeficiente de absorção é necessário seguir as recomendações da norma ISO 354 (1985) e verificar as condições para as quais a fórmula de Sabine é aceitável: baixa absorção acústica, boa difusividade e uniformidade do campo sonoro.

Desse estudo de qualificação da câmara, os pontos principais são:

Quanto à concepção:

Para a concepção da câmara foi usada como modelo a câmara reverberante do laboratório de acústica da Universidade Católica de Louvain (Bélgica). Ambas as câmaras são geometricamente idênticas, mas o revestimento das paredes, teto e piso e o tratamento dos difusores, diferem.

Quanto à Forma:

Para se obter uma boa uniformidade do campo sonoro, os modos normais da câmara, nas baixas frequências, devem ser igualmente espaçados e os ecos "flutuantes" evitados. Para se obter isto, todos os planos opostos, incluindo as paredes, teto e piso, não devem ser paralelos. A Figura 2.4 mostra a geometria da câmara e a Figura 2.5 mostra seu formato, correspondendo às sete superfícies irregulares de um poliedro. Duas das quatro paredes são inclinadas para o interior da câmara, com um ângulo de 82° , e as outras duas são verticais. O teto da câmara tem um decaimento duplo.

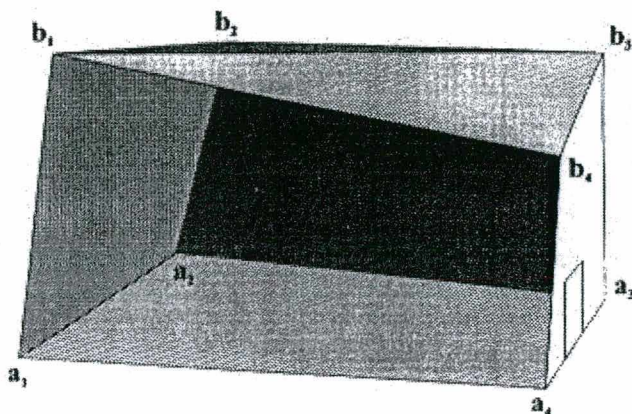


Figura 2.4 - Geometria da câmara reverberante do LAL-CIC [GIULIANO et al. (1996)]

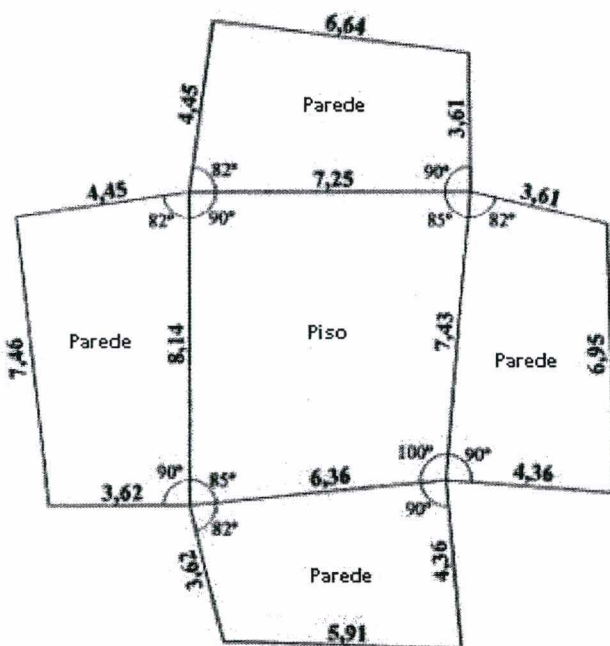


Figura 2.5 - Forma da câmara reverberante do LAL-CIC (dimensões em m) [GIULIANO et al. (1996)]

Quanto ao Volume:

O volume da câmara é um parâmetro muito importante, porque ele fixa a menor frequência para qual a medição é precisa. Por outro lado, o volume não deve ser desnecessariamente grande para evitar a absorção do ar nas altas frequências. A recomendação da ISO 354 (1985) é de um volume próximo de 200 m³ para medições até 100 Hz.

O volume também é um parâmetro da equação no cálculo da área de absorção sonora equivalente e, portanto, é necessário conhecê-lo com precisão.

O cálculo do volume de um poliedro de sete superfícies irregulares é relativamente complicado e os detalhes são mostrados no artigo de GIULIANO et al. (1996). O volume calculado da câmara foi de $(189 \pm 2) \text{ m}^3$, a área superficial total igual a 208 m^2 e o comprimento da maior linha reta entre as superfícies da câmara é de 11 m.

Quanto aos tempos de reverberação:

Os tempos de reverberação da câmara foram medidos através de um método impulsivo, usando um ruído de explosão filtrado em bandas. Esta escolha foi baseada numa melhor precisão encontrada no método impulsivo quando comparado ao método do ruído randômico recomendado na ISO 354 (1985).

Os autores do trabalho mencionam que é importante notar que há diferenças sistemáticas nos resultados obtidos quando medidos por ambos os métodos. Embora os desvios sejam pequenos, os métodos não são equivalentes.

Os tempos de reverberação foram determinados com e sem difusores aleatoriamente suspensos no teto. Três diferentes configurações de difusores foram utilizadas.

Quanto às áreas de absorção:

Para se obter um adequado campo sonoro reverberante, as áreas de absorção sonora equivalente das superfícies da câmara devem ser pequenas. Para isto, as paredes da câmara e o teto foram pintados com tinta epóxi e o piso revestido com granito polido.

Quanto à uniformidade:

Para avaliar a uniformidade, foi calculado o desvio padrão espacial do nível de pressão sonora, para cada banda de frequência, medido em seis

posições na câmara vazia e contendo uma amostra de lã de vidro. A câmara foi excitada com ruído branco.

Quanto à difusão:

Uma excelente difusão dentro da câmara é essencial para que a fórmula de Sabine tenha validade e as medições de coeficiente de absorção sonora sejam precisas. Diferentes métodos podem ser usados para qualificar a difusão. Em seu trabalho, GIULIANO et al. (1996) adotaram o método recomendado pelo norma ISO 354 (1985), isto é, medições do coeficiente de absorção sonora de um material de alta absorção, com um número crescente de difusores, distribuídos aleatoriamente dentro da câmara. Quando o coeficiente de absorção medido alcançar um valor máximo e constante, a melhor condição de difusão é obtida. O método foi aplicado para uma amostra de lã de vidro de 50 kg/m³ de densidade, 10 m² de área e 5 cm de espessura, medidos com e sem três tipos de difusores.

Quanto ao ruído de fundo:

Uma câmara reverberante requer um alto isolamento acústico para isolar os ruídos provenientes de fora desta e, ao mesmo tempo, evitar a fuga dos sons gerados dentro da câmara para outras salas do laboratório. Para alcançar isto, uma estrutura dupla foi construída; o interior usando concreto e o exterior tijolos. O espaço entre ambas as "caixas" foi preenchido com placas de lã de vidro. A caixa interna é montada em amortecedores helicoidais. O acesso à câmara dá-se através de duas portas acústicas. O nível de ruído de fundo dentro da câmara para um ruído externo normal é de 22 dB(A).

2.1.2 Difusores

Sabido como a principal forma de aperfeiçoamento da difusividade do campo sonoro em câmaras reverberantes, os difusores são largamente utilizados pela maioria dos laboratórios. Diversas análises vêm sendo realizadas

ao longo dos anos para se determinar as propriedades e características dos difusores, quanto aplicados às câmaras reverberantes.

Quando uma amostra de material de alta absorção é introduzida dentro de uma câmara reverberante, a difusividade do campo sonoro é inevitavelmente reduzida. Contudo, segundo BALACHANDRAN e ROBINSON (1967), a difusividade do campo pode ser aperfeiçoada pela adição de irregularidades às superfícies da câmara, se estas forem comparáveis as dimensões do comprimento de onda do som.

Regras foram propostas pela ISO R354 (1963) para as dimensões de uma câmara reverberante, com intuito de promover difusão. Contudo, KOSTEN (1960) apud BALACHANDRAN e ROBINSON (1967) mostrou que, para se alcançar uma difusão suficiente do campo sonoro na presença de uma grande área de material de alta absorção, é essencial a instalação de painéis difusores aleatoriamente orientados.

Não há regras definidas para a fixação desses painéis em suas posições, comentam BALACHANDRAN e ROBINSON (1967). É geralmente considerado benéfico que suas dimensões sejam comparáveis ao comprimento de onda nas baixas frequências de interesse. Eles podem ser levemente curvados em sua forma, não devem contribuir consideravelmente na absorção sonora e devem propiciar uma reflexão especular.

Durante os últimos 30 anos, comenta MALING (1971), muitos trabalhos foram realizados para estudar o problema da distribuição das frequências de ressonância em salas retangulares. Embora existam várias técnicas que podem ser usadas para encontrar a distribuição modal nas altas frequências, nas baixas frequências a maioria dos resultados de importância prática tem provindo de cálculos diretos das frequências modais. Pode ser argumentado que tais cálculos são desnecessários no projeto de uma câmara reverberante porque as paredes de uma câmara podem ser inclinadas, ou painéis difusores podem ser introduzidos para mudar a estrutura modal. Todavia, muitas câmaras reverberantes são construídas como paralelepípedos e é razoável esperar que uma câmara com bom espaçamento modal seja mais satisfatória quando painéis

difusores forem acrescentados, do que uma câmara que tenha uma pobre distribuição modal.

Segundo SCHULTZ (1971), painéis suspensos ou difusores distribuídos aleatoriamente em câmara reverberante foram populares na Europa, particularmente na Alemanha. Tais painéis suspensos foram avaliados pela comparação de valores medidos de coeficiente de absorção de uma amostra com resultados teóricos para campo difuso.

Segundo ele, é necessário um comprometimento entre o tamanho dos painéis e o comprimento de onda nas baixas frequências, bem como entre o número de painéis e a quantidade de difusores requerida.

KUTTRUFF (1979) comenta que o uso de elementos suspensos de "espalhamento", ou difusores, é particularmente vantajoso na obtenção de um campo sonoro difuso em câmara reverberante. Ele menciona que, quanto à disposição dos difusores, a forma de se encontrar o número de difusores, suas melhores localizações e orientações dá-se através de um procedimento de tentativa e erro.

MYNCKE (1972) apud BENEDETTO et al. (1981) recomenda levar-se em consideração o fato de que a adição de muitos difusores pode criar direções preferenciais das ondas sonoras e comprometer seriamente a validade da fórmula de Sabine, pela variação do caminho médio livre (*mean free path*).

KATH et al.(1961) apud BENEDETO et al. (1981) descrevem um estudo experimental dos erros sistemáticos e aleatórios na medição do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante, na presença ou não de difusores. Neste estudo, os autores concluem que os difusores são essenciais para a correta medição do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante.

Em seu trabalho, BENEDETO et al.(1981) mostram uma série de medições, de diferentes tipos de materiais, realizados em uma câmara reverberante com e sem a presença de difusores, com o intuito de estabelecer-se o efeito dos elementos de difusão nos valores dos coeficientes de absorção. Na Figura 2.6, é mostrado o valor médio de α na faixa de frequência entre 500 - 5000 Hz em função do número e do tipo de material empregado nos difusores.

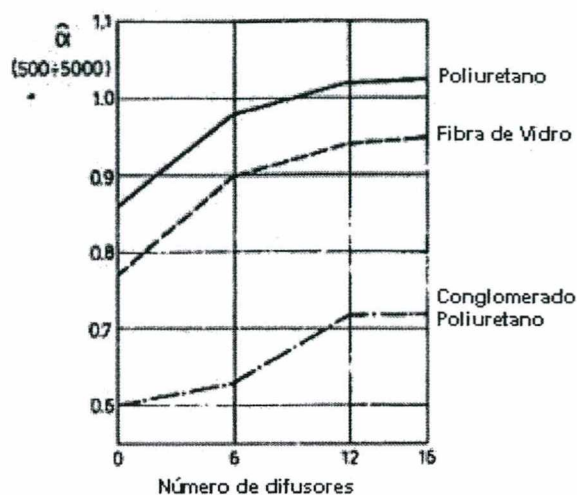


Figura 2.6 - Valores médios de coeficiente de absorção sonora na faixa de frequência entre 500 - 5000 Hz em função do número de difusores [BENEDETTO et al. (1981)].

Baseados neste, bem como em outros resultados por eles obtidos, BENEDETTO et al. (1981) afirmam que é evidente o aumento no valor do coeficiente de absorção de materiais porosos, ocasionados pelo uso de elementos de difusão, nas frequências acima de 680-800 Hz.

Eles também comentam, a respeito da normalização da medição do coeficiente de absorção de materiais em câmara reverberante, sobre a necessidade de estudos mais aprofundados quanto à definição quantitativa da difusão que deve ser provida, para que se estabeleça precisamente as condições em que os difusores devem ser usados.

DÄMMIG (1991) mostra os resultados da simulação de cinco modelos de câmaras reverberantes de diferentes formatos, vide Figura 2.7, para demonstrar como a determinação do coeficiente de absorção sonora pode ser influenciada pelas diferenças na configuração do campo sonoro na proximidade da amostra. Estas investigações foram baseadas no modelo de raios acústicos com reflexões imagem nas superfícies da câmara.

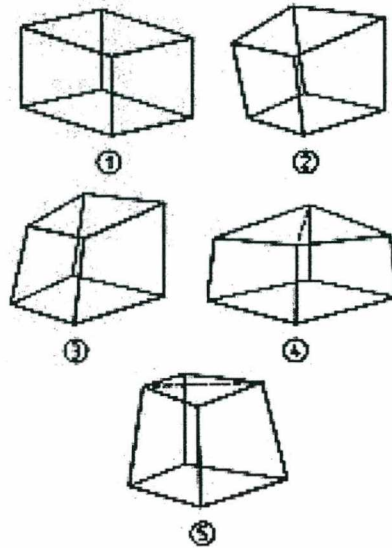


Figura 2.7 - Diagrama esquemático das câmaras de reverberação investigadas nº 1 a 5 [DÄMMIG(1991)].

Os materiais absorvedores foram arranjados em diferentes posições no piso da câmara reverberante e a distribuição dos ângulos de incidência sonora sobre a superfície da amostra foi calculada. Com o auxílio dos valores teóricos de coeficiente de absorção em função do ângulo para os materiais usados, pode-se concluir qual o valor do coeficiente de absorção médio esperado em função do ângulo de incidência e como este valor difere de um valor válido para um campo sonoro difuso.

As investigações anteriores foram restritas para a câmara sem elementos de difusão sonora. Em DÄMMIG (1995), tais modelos de câmara foram suplementados por modelos calculados levando-se em consideração elementos de difusão sonora. Como elementos de difusão foram escolhidos segmentos de cascas cilíndrico elípticos. Os resultados encontrados para os modelos calculados em câmaras reverberantes providas com elementos de difusão mostraram que tais dispositivos, de fato, permitem melhorar os resultados dos coeficientes de absorção médio em função do ângulo de incidência, aproximando-os dos valores teóricos esperados para um campo sonoro difuso.

Há, contudo, desvios que diferem caso a caso e as melhorias, geralmente, não são tão convincentes quanto se poderia esperar. No caso de

câmaras sem elementos de difusão serem usadas para a determinação de coeficiente de absorção, as câmaras com ângulos oblíquos serão mais favoráveis que as paralelepipedais. Estas diferenças desaparecem, contudo, quando as câmaras são providas com elementos de difusão; a câmara paralelepipedal investigada provou ser, ao menos, equivalente à câmara com ângulos oblíquos. Desse ponto de vista, comenta DÄMMIG (1995), o considerável custo da técnica adicional para a construção de câmaras com ângulos oblíquos para a medição do coeficiente de absorção possivelmente não vale a pena. Como já enfatizado em DÄMMIG (1991), isto não afeta a tecnologia da medição de potência acústica, que é fundamentada em outras bases.

2.1.3 Avaliação do Campo Sonoro

A difusividade do campo sonoro é o fator mais importante na qualidade de uma câmara reverberante. Vários métodos tem sido elaborados para se analisar e quantificar o grau de difusão existente no campo sonoro das câmaras reverberantes. Alguns métodos quantificam a difusividade de forma direta através de medições do próprio campo sonoro, outros, relacionam comportamentos do campo sonoro em medições de tempo de reverberação, coeficientes de absorção, entre outros, com a difusividade existente.

Em seu artigo, SCHULTZ (1971) menciona cerca de oito métodos propostos para avaliação do grau de difusividade, descritos a seguir:

Microfones direcionais

Um microfone direcional, rotacionado em todas as direções num campo sonoro difuso, deverá registrar o mesmo sinal, independente da direção para o qual ele esteja posicionado.

Medidor de potência acústica

Em princípio, um medidor de potência acústica mede o fluxo vetorial de energia e, portanto, deve produzir uma leitura independente da

orientação do ângulo no campo difuso. Este método, contudo, não é muito sensível às variações em uma perfeita difusividade. Igualmente, para uma onda plana progressiva, o indicador é proporcional ao coseno do ângulo entre a direção da propagação da onda e a direção na qual o elemento de sensibilidade do medidor de potência está apontado.

Correlação cruzada entre medições de pressão em posições vizinhas no campo.

A função de correlação cruzada em um campo perfeitamente difuso pode ser calculada e, o resultado, checado por observações experimentais em câmara reverberante. Novamente, este método não é muito sensível às variações em uma perfeita difusividade.

Medição de absorção em câmara reverberante

Pode-se avaliar o grau de difusividade na câmara reverberante pela comparação do coeficiente de absorção "Sabine" de uma amostra de material acústico, determinado pelo método do decaimento, com o coeficiente de absorção estatístico calculado através da medição realizada com o mesmo material em tubo de impedância.

Irregularidade na Freqüência

Foi pensado que o grau de difusão sonora em uma sala poderia ser determinado pela medição da irregularidade da freqüência. Esta unidade é derivada da função de transferência da sala obtida com microfone fixo e várias posições de alto-falante, varrendo-se lentamente um sinal senoidal através da faixa de freqüência de interesse e plotando-se a curva da resposta do microfone em função da freqüência. A Irregularidade na Freqüência, F (em dB/Hz) é obtida através da curva, achando-se a soma de todos os valores de "pico" (em dB) da mesma faixa de freqüência e dividindo-se pelo intervalo de freqüência envolvido (em Hz).

Uniformidade Espacial da Pressão

Alguns procedimentos de medição têm avaliado o estado de difusão pela averiguação da uniformidade da pressão (ou pressão quadrática) em diferentes posições dentro da câmara.

Uniformidade da taxa de decaimento

É assumido que, com um perfeito campo sonoro difuso dentro da câmara, o método em câmara reverberante para absorção de "Sabine" terá a mesma taxa de decaimento para todas as posições de microfone.

Linearidade da curva de decaimento

Atribui-se que, se o campo sonoro em uma câmara é difuso, não só em regime estacionário, como também, durante o decaimento o nível de pressão sonora em função do tempo será linear.

Por fim, SCHULTZ (1971) comenta que nenhum destes métodos é muito sensível: a diferença entre a condição de menor difusividade (aquela da onda plana progressiva) e a condição de câmara em que acredita-se próxima da difusão perfeita não é muito grande. Em qualquer caso, o que é necessário é a capacidade de dizer que não se tem uma "perfeita difusão", mas uma difusão suficiente para o propósito da medição envolvida.

Segundo WATERHOUSE e COOK (1976), há dois tipos de modelos para o campo sonoro difuso usado em câmara reverberante. O primeiro é o modelo de modos normais, no qual é considerado que o campo sonoro difuso consiste de um número de campos de modos normais sobrepostos. Tipicamente, os modos são excitados por um ruído randômico de banda estreita. Se painéis rotativos estão presentes, os campos modais são espacialmente perturbados. Este modelo conduz naturalmente a questão da uniformidade da densidade da energia. Para cada modo normal, a densidade de energia é, em geral, não uniforme, mas tem um modelo espacial com máximo e mínimo. Contudo, com o aumento do número de modos normais sobrepostos, a densidade de energia torna-se mais uniforme, porque os picos dos diferentes modos normais, em geral, não

coincidem. Já no caso do modelo de onda livre, o campo sonoro é considerado consistindo de um grande número de ondas planas sobrepostas, propagando-se em todas as direções, com incidência aleatória, em direção e fase, em qualquer posição.

Para investigar os dois modelos propostos, WATERHOUSE e COOK (1976) calcularam a densidade de energia em função da posição para os modos axiais, tangenciais e oblíquos, em um ambiente retangular fechado. Ao final, eles concluem que os modelos de modo normal e de onda livre conduzem a resultados idênticos para a função de correlação espacial. Esse fato, e a consideração da similaridade dos dois modelos, conduziram à conclusão que estes são consistentes. Ambos os modelos sugerem que a densidade de energia torna-se mais uniforme quando a largura de banda do sinal de excitação aumenta.

Em seu artigo, SEKIGUCHI et al. (1992) descrevem o desenvolvimento de um método de medição que visa a análise da informação espacial do campo sonoro em uma sala. Este sistema de medição possui quatro microfones instalados nos vértices de um tetraedro regular. Com esse método, a informação espacial de uma frente de onda é analisada através da resposta impulsiva nos quatro pontos, que estão completamente sincronizados. Usando modelos nos quais as posições das fonte imagem são conhecidas, estudos experimentais conduziram à identificação das posições da fonte sonora e distorções na frequência pelas reflexões repetidas. Além disso, fontes sonoras virtuais têm sido detectadas e a forma da onda nos campos sonoros tem sido recomposta. Os resultados desses experimentos indicam que as medições são precisas e o método pode ser efetivamente usado.

Atento ao fato de que as pessoas ouvem por dois ouvidos, SCHROEDER et al. (1974) apud BERANEK (1996) propuseram uma medição binaural para avaliar a qualidade acústica de salas de concerto. Esta medição determina a energia relativa à reflexão lateral. Este procedimento faz uso de dois minúsculos microfones montados no exterior do canal auditivo de uma pessoa ou de uma cabeça artificial. Os sinais de saída dos microfones são conectados à um

computador que determina o coeficiente de correlação cruzada interaural. (*Interaural Cross-Correlation Coefficient* - IACC).

Tendo como conceito de difusão para um campo sonoro que este será difuso se ondas sonoras provindas de todas as direções alcançarem simultaneamente um ouvinte (em uma sala de concerto, por exemplo) em determinada posição, BERANEK (1996) tentou relacionar a difusão do campo reverberante com o coeficiente de correlação cruzada interaural IACC.

Chamando de $IACC_{L3}$, Beranek investigou se este índice seria capaz de identificar o grau de difusão do som existente em uma sala de concerto. Para isso, ele determina o $IACC_{L3}$ na posição de um ouvinte para o intervalo de tempo iniciando-se 80 ms depois da chegada do som direto e terminando 1 segundo após sua chegada nas bandas de oitava das frequências centrais de 500, 1000 e 2000 Hz. BERANEK (1996) conclui que o índice $IACC_{L3}$ não é sensível ao nível de diferença encontrado na preferência das melhores salas de concerto, às quais ele foi submetido, no entanto, ele permite separar uma sala com pobre difusividade de outras indicando, assim, que o $IACC_{L3}$ pode vir a ser também um índice de difusividade aplicável a qualquer ambiente. Para maiores detalhes, o método e a medição do IACC é detalhadamente explicado em HIDAKA et al. (1995).

NÉLISSE e NICOLAS (1997) comentam que o grau de difusividade de um campo sonoro em câmara reverberante tem sido amplamente investigado nas últimas cinco décadas. Contudo, mesmo para o conceito do campo difuso bem compreendido, há poucas ferramentas práticas teóricas e significativas para caracterizar o campo sonoro em uma câmara. Além disso, muitas definições de difusividade e descrições usadas para quantificar o grau de difusividade são freqüentemente mal usadas. Como exemplo, o conhecimento de que apenas a uniformidade da pressão sonora do campo em uma câmara não dá suficiente informação sobre o grau de difusividade do campo. Geralmente, mais de uma caracterização deve ser usada para definir corretamente o campo sonoro.

NÉLISSE e NICOLAS (1997) apresentam uma abordagem modal analítica para calcular descrições de interesse em uma câmara reverberante

retangular. Eles também utilizam como indicadores do campo sonoro a função de correlação e a uniformidade espacial.

A correlação cruzada é um método bastante pesquisado e utilizado na caracterização do campo sonoro. Vários artigos descrevem o método como uma forma eficaz no estudo da difusividade. Em função deste fato, o conceito de correlação cruzada é explanado a seguir. Posteriormente, é descrito o método da uniformidade espacial.

Função de Correlação

Considerando os pontos r e $r+r'$ como mostra a Figura 2.8, a pressão nestes pontos é dada por:

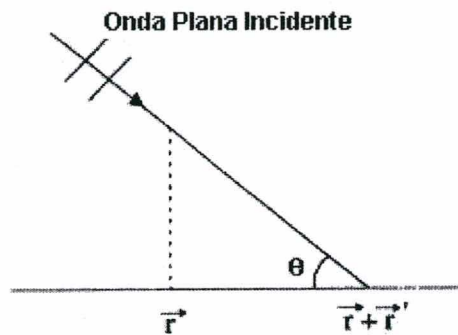


Figura 2.8 - Representação de uma onda plana incidente [NÉLISSE e NICOLAS (1997)]

$$P(r) = A.e^{ikr} \quad e \quad P(r+r') = A.e^{-i.k(r+r')} \quad (2.1)$$

Se o estado harmônico é assumido para a pressão do campo, a função de correlação é descrita por:

$$C(kR) = \text{Re} \left(\frac{P(r)P^*(r+r')}{\sqrt{|P(r)|^2 |P(r+r')|^2}} \right)$$

$$\text{Re} = (e^{-ikR \cos \theta}) = \cos (kR \cos \theta) \quad (2.2)$$

Deve ser notado que a função de correlação depende apenas da distância R. Para um campo difuso deve-se calcular a integral sobre todas as direções (θ, ϕ) das ondas planas. O resultado, respectivamente, para 1, 2 e 3 dimensões é

1D $C(kR) = \cos(kR)$ (2.3)

2D $C(kR) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(kR \cos \theta) d\theta = J_0(kR)$ (2.4)

onde: $J_0(kR)$ é a função de Bessel de primeira ordem do primeiro tipo.

3D $C(kR) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \cos(kR \cos \theta) \sin \theta d\theta d\phi$
 $= \frac{\text{sen}(kR)}{kR}$ (2.5)

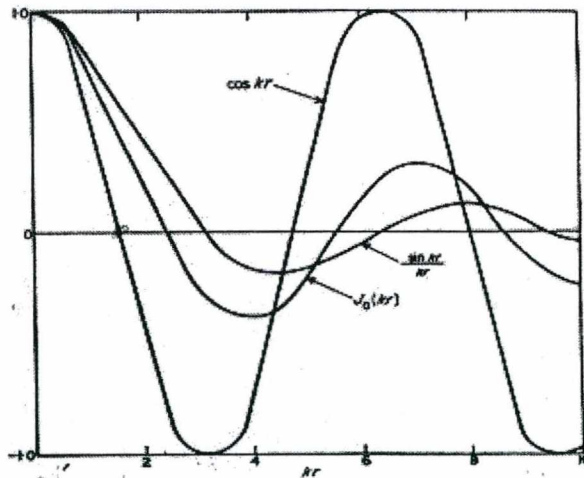


Figura 2.9 - Comparativo do coeficiente de correlação em banda estreita [NÉLISSE e NICOLAS (1997)].

A função $\text{sen}(kR)/kR$ foi amplamente estudada teoricamente por MORROW (1971) e, experimentalmente, por COOK et. al (1955), BALACHANDRAN (1959), TOHYAMA et al. (1979), entre outros. Geralmente,

comentam NÉLISSE e NICOLAS (1997), a equação $\text{sen}(kR)/kR$ para onda plana é obtida se for usada uma banda estreita contendo suficientes modos na câmara. Na maioria dos estudos teóricos, certas suposições têm sido feitas para simplificar o cálculo da função de correlação: (i) na expressão modal da função de correlação, termos cruzados são negligenciados usando-se uma aproximação para altas frequências; (ii) a aproximação em altas frequência permite mudar o somatório discreto sobre os modos da câmara para uma integração contínua em frequência. Esta aproximação é válida apenas se a densidade modal for alta; (iii) cálculos detalhados da função de correlação mostram que a correção $\nabla k/k$ se aplica à forma conhecida $\text{sen}(kR)/kR$, mas é sempre negligenciada.

Uniformidade Espacial

Para estudar a uniformidade espacial da pressão do campo em um volume V é usado o desvio padrão σ de um campo de pressão acústico, o qual é relacionado com a variação da pressão. Se considerarem-se N pontos para os quais o nível de pressão sonora $NPS(r)$ é computado no volume central da câmara, a definição do desvio padrão é dada por:

$$\sigma^2(f) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [NPS(r_i, f) - \overline{NPS}(f)]^2 \quad (2.6)$$

onde: $\overline{NPS}(f)$ é o nível de pressão sonora médio, no volume V e na frequência (f). No ponto r_i de V , o nível de pressão sonora $NPS(r_i, f)$ é definido por:

$$NPS(r_i, f) = 10 \cdot \log (|P(r_i, f)|^2) \quad (2.7)$$

Tem sido aceito que o campo acústico em uma câmara reverberante qualificada exibe difusividade adequada se o desvio padrão σ permanecer abaixo de 1,5 dB. Com maior precisão, a norma ISO 3741 (1988) estabelece o desvio padrão máximo admissível, não devendo exceder os valores dados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Desvio Padrão máximo admissível para banda de um terço de oitava descrito na norma ISO 3741 (1988)

Banda de um terço de oitava Frequência central (Hz)	Desvio Padrão máximo permitido (dB)
100 a 160	1,5
200 a 630	1,0
800 a 2500	0,5
3150 a 10000	1,0

2.2 DIFUSIVIDADE DO CAMPO SONORO EM CÂMARA REVERBERANTE

Para se obter uma boa difusividade do campo sonoro em câmaras reverberantes, há a necessidade de se atentar para vários fatores. A seguir são apresentadas características e definições de difusão sonora, os principais métodos para se obter uma boa difusividade em câmaras reverberantes e conceitos que regem a difusão das ondas sonoras.

Segundo SCHROEDER (1959), para medir-se o coeficiente de absorção de materiais acústicos em uma câmara reverberante, para todos os ângulos de incidência, é necessário, na localização do material absorvedor, um campo sonoro difuso. Nas baixas frequências, onde o comprimento de onda é comparável às dimensões lineares da câmara, a obtenção de um campo sonoro completamente difuso é difícil, se não impossível.

Segundo SCHULTZ (1971), a difusão do campo sonoro pode ser definida como:

i) Em um campo sonoro difuso, há uma total uniformidade (potencial mais cinética) da densidade de energia em todas as posições da câmara e cada elemento de volume irradia igualmente em todas as direções.

ii) Em um campo sonoro difuso, há uma igual probabilidade de fluxo de energia para todas as direções e uma incidência de energia, em ângulos aleatórios, sobre as superfícies da câmara.

iii) Um campo sonoro difuso compreende uma superposição de um infinito número de ondas planas progressivas, tal que há uma igual probabilidade de propagação para todas as direções. Também, em qualquer ponto no espaço, as relações de fase entre as ondas são randômicas.

SCHULTZ (1971) comenta que estas três definições são, provavelmente, adequadas para uma concepção inicial, mas não oferecem ajuda do ponto de vista operacional. "O fato é que não se tem nenhuma forma prática ou direta de medição para nenhuma destas concepções citadas e, deste modo, não há uma boa forma de determinar o grau de difusão existente numa dada sala nem como determinar o grau de difusão que seria requerido para uma dada aplicação".

SCHULTZ (1971) também menciona em seu artigo, formas de se alcançar a difusão do campo sonoro em uma sala. Basicamente, ele cita três maneiras, que são: volume da câmara, tratamento especial à câmara e elementos de difusão acrescentados à câmara. Estes tópicos são explicitados abaixo:

Volume da câmara

O modo mais direto de se alcançar difusão em uma sala é fazer uma grande sala, comparada ao comprimento de onda do som de interesse. Com o aumento da frequência, o número de modos de ressonância da sala dentro da largura de banda de medição aumenta rapidamente e tende a preencher uniformemente o espectro de frequência e o ângulo de incidência. Quanto mais modos houver, quer dizer, quanto maior a frequência dentro da câmara, mais aproximadamente difuso é o campo sonoro.

Um critério de difusão adequado pode ser enquadrado em termos do menor número permissível de modos na largura de banda da medição: valores entre 10 a 20 modos têm sido sugeridos. No sentido estatístico, o número de modos em uma largura de banda é apenas dependente do volume da câmara, da frequência e da largura da banda.

Tratamento especial à câmara

a) Paredes Obíquas

Há uma tradição de que "inclinando" as paredes da câmara reverberante (isto é, arranjando a geometria tal que dois pares de paredes não sejam paralelas) aumenta-se a difusividade de dentro da câmara. De fato, inclinar por si só não ajuda muito. O número de modos da câmara em uma dada banda de frequência depende apenas do tamanho da sala, portanto, afastar as paredes não aumenta a densidade modal, mas só garante que não se poderá calcular as frequências modais (como é possível para uma câmara perfeitamente retangular).

b) Proporções da câmara

R. H. Bolt e L. W. Sepmeyer calcularam a frequência modal de várias salas retangulares. Seus estudos mostraram que certas proporções de sala favoreciam a distribuição uniforme nas ressonâncias ao longo do eixo das frequências, o que conduz a uma maior uniformidade na função de transferência na câmara e a uma distribuição uniforme do ângulo de incidência da energia sobre as superfícies.

Porém, estes estudos apenas são apropriados para salas vazias, perfeitamente retangulares, ou salas com, no máximo, uma pequena deformação em sua forma retangular. Na prática, imprecisões na construção da sala e a adição de objetos ou de dispositivos especiais de difusão modificam as distribuições de frequências e os ângulos de incidência calculados, tal que os benefícios prováveis de se tentar aperfeiçoar as proporções da sala através dos meios teóricos não justificam o grande esforço de cálculo requerido, até mesmo com computadores de alta velocidade.

c) Absorção em baixas frequências versus sobreposição modal

Quando os modos na sala estão bem separados, é desejável fazer a largura de banda modal média ao menos igual ao espaçamento modal médio, para que alguns modos disponíveis cubram a faixa de frequência uniformemente. Na ausência de absorção na sala, a largura de banda modal é pequena e cada modo é, então, fracamente excitado pelo som, nas frequências a apenas uma

pequena distância do eixo da frequência. Acrescentando absorção à câmara, a largura de banda dos modos individuais se expande e, então, a margem de cada curva de resposta modal tende a sobrepor aquelas dos modos adjacentes. Frequências de excitação situadas entre modos podem envolver ambos os modos vizinhos, superiores e inferiores, na excitação da sala e, assim, o tratamento com acréscimo de absorção ajudará para que alguns modos disponíveis cubram a faixa de frequência uniformemente.

Elementos difusores acrescentados à câmara

a) Painéis suspensos (difusores)

Populares na Europa, particularmente na Alemanha, conforme já mencionado, séries de painéis suspensos, distribuídos aleatoriamente por toda a câmara reverberante, têm sido avaliadas pelos valores de absorção medidos de um material de absorção com o resultado teórico para o campo difuso.

Algumas dificuldades foram encontradas com os painéis suspensos (difusores). Um comprometimento é requerido entre o tamanho do painel versus o comprimento de onda nas baixas frequências e, também, o número de painéis versus a quantidade de painéis requerida. Deve-se evitar esconder a amostra em um "amontoado" de painéis. Se houver muitos painéis, o processo reverberante tornar-se-á não-exponencial, próximo a lei de decaimento de potência, análogo à reverberação submarina.

b) Painéis rotativos

Sem dúvida, o dispositivo mais efetivo no aumento da "difusão aparente" em uma câmara tem sido a introdução de um extenso painel refletor rotativo. Este tipo de painel causa dois efeitos: i) deforma continuamente a "forma" da sala no tempo; ii) redireciona continuamente o fluxo de energia no espaço. O resultado é uma contínua troca da frequência modal ao longo do eixo das frequências e do ângulo de incidência da energia sobre cada superfície. Assim, na região de baixa frequência, mesmo se a difusão real for pobre, em razão da inadequada soma modal e uma correspondente distribuição concentrada de ângulos de incidência, os painéis rotativos irão aumentar a difusão efetiva pela

contínua troca das frequências modais e dos ângulos de incidência sobre uma faixa moderada durante o período de rotação do circuito.

Também DODD e DOAK (1971) escrevem em seu artigo sobre a difusão em câmara reverberante. Nesse estudo, eles classificam os campos sonoros como ativos ou reativos, sendo o campo difuso, reativo.

Segundo eles, qualquer campo de pressão acústica pode ser considerado como composto de dois componentes, chamados de campo de onda em propagação (ou ativo) e o campo de onda estacionária (ou reativo). Estes dois componentes podem ser identificados como se segue.

Para o campo ativo, o fluxo médio de energia acústica é diferente de zero, isto é, a média temporal sobre um intervalo satisfatório da componente pressão e da componente velocidade de partícula é diferente de zero. Para o campo reativo (difuso), o fluxo médio de energia acústico é zero, isto é, a média temporal sobre um intervalo satisfatório da componente pressão e da componente velocidade de partícula é zero.

Em uma câmara reverberante ideal, o campo acústico é quase inteiramente reativo. Portanto, uma fonte sonora em tal câmara precisará gerar apenas uma pequena quantidade correspondente de potência média acústica para manter um alto nível de pressão sonora. Novamente, em tal câmara, toda componente harmônica simples da flutuação de pressão tem uma média espacial de amplitude de pressão com valor zero, sobre o volume de cada esfera de raio de meio comprimento de onda que não contenha uma fonte.

Segundo PIERCE (1981), quando os picos de ressonância estão mais próximos entre si que a largura de banda associada a qualquer um dos picos, as ressonâncias tornam-se menos evidentes. Se o espaçamento médio $(\Delta f)_{\text{modo}}$ entre os picos for da ordem ou menor que, digamos, $1/3 (\Delta f)_{\text{ressonância}}$ os picos de ressonância podem ser aproximados por uma curva contínua. Desde que o espaçamento médio $(\Delta f)_{\text{modo}}$ diminua com o aumento da frequência, haverá a frequência f_{sch} (frequência de corte de Schroeder) abaixo da qual $(\Delta f)_{\text{ressonância}} > 3(\Delta f)_{\text{modo}}$ não é satisfeita e acima do qual o será. Essa frequência é identificada pela equação abaixo:

$$f_{sch} = \left(\frac{c^3}{4 \ln 10} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{60}}{V} \right)^{1/2} = c \left(\frac{6}{A_s} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

Esta equação com unidade do sistema internacional e com $c = 340$ m/s, torna-se, aproximadamente, igual a:

$$f_{sch} = 2000 \left(\frac{T_{60}}{V} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

onde: T_{60} é o tempo de reverberação, em s

V é o volume da câmara, em m^3

Em artigo recente, SCHROEDER (1996) explica que a equação (2.9) resulta da equiparação da largura de banda de meia potência B das ressonâncias:

$$B = \frac{\log_e 10^6}{2\pi T} = \frac{2,2}{T} \quad (2.10)$$

com três tempos de espaçamento assintótico (que não podem coincidir) médios Δf entre as frequências de ressonância.

$$\Delta f = \frac{c^3}{4\pi V f^2} \quad (2.11)$$

SCHROEDER (1996) comenta que o fator 2000 na equação (2.9) (o qual contém a velocidade do som c) garante que, em média, pelos menos três ressonâncias cairão dentro da largura de banda de meia potência de uma ressonância para frequência acima de f_c . O inconveniente (e dependente de unidade) fator 2000, segundo ele, pode ser cancelado se a frequência for

convertida em comprimento de onda $\lambda_c = c/f_c$. Usando a formulação de Sabine para o tempo de reverberação:

$$\bar{T} = 13,8 \frac{4V}{cA} \quad (2.12)$$

onde A é a área de absorção equivalente, a equação (2.9) chega a seguinte forma:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{A}{6}} \quad (2.13)$$

onde o fator 6 é um número puro e λ_c é dado na mesma unidade que \sqrt{A} .

Em contraste com a equação (2.9), a equação (2.13) é independente de unidade. Uma tripla (ou maior) sobreposição de modos é obtida para um comprimento de onda menor que λ_c .

Um pré-requisito para a aplicação das técnicas de medição em câmara reverberante, segundo DÄMMIG (1991), é a presença de um campo sonoro difuso. Um campo sonoro difuso é um campo no qual, em termos estatísticos, a densidade da energia sonora é estacionária no tempo e no espaço e o valor instantâneo do vetor intensidade sonora é isotrópico. Isto significa, em outras palavras, que, em um tempo médio, a mesma quantidade de energia sonora passa por qualquer ponto no interior da câmara provindo de todas as direções. Este estado pode, em geral, ser alcançado apenas aproximadamente, pelo fato de que nem todas as superfícies da câmara permanecem sendo refletoras ideais quando há uma amostra de material absorvedor no interior da câmara. A própria amostra de material absorvedor não é mais exposta às condições de campo sonoro que seriam esperadas no campo sonoro idealmente difuso.

A questão sobre o que constitui um campo sonoro, como melhorar sua difusividade e como predizer as características de campo sonoros, difusos ou não, em salas, tem sido o tópico de pesquisas e é de considerável interesse

prático, por exemplo, no que diz respeito ao coeficiente de absorção em câmaras reverberantes e em salas acústicas de concerto HODGSON (1994).

KUTTRUFF (1991) apud HODGSON (1994) investigou dois meios de aumentar a difusividade do campo sonoro de salas. Estes envolvem o aumento da quantidade de superfícies refletoras difusas da sala e a introdução de difusores ou obstáculos difusores dentro do volume da câmara. É claro que difusores na forma de painéis refletores são comumente usados para promover difusividade em câmaras reverberantes. Ele mostrou que ambas as medições tendem a aumentar a difusividade do campo sonoro em qualquer posição na câmara, em um decaimento sonoro mais exponencial e cujo índice é mais precisamente predito pela teoria do campo difuso. Em efeito, ambas as medições tendem a aumentar a randomização da incidência do som nas superfícies e, portanto, do campo sonoro, resultando em um campo mais difuso. A única exceção ocorre quando a densidade dos difusores torna-se suficientemente alta. Então, o som é "cercado" entre os difusores e não pode alcançar as superfícies da câmara e a aplicabilidade da teoria do campo difuso decresce.

2.3 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Utilizado neste trabalho como parâmetro de qualificação, a medição de absorção sonora de materiais vem sendo pesquisada por vários autores com o intuito de se estabelecer as principais influências que regem seu grau de precisão.

BENEDETTO et al. (1981) descrevem em seu artigo o resultado de uma série de medições de diferentes tipos de materiais realizadas em câmara reverberante, com e sem difusores, para estabelecer o efeito dos elementos de difusão nos valores do coeficiente de absorção. Primeiro, eles mostram o coeficiente de absorção sonora de quatro diferentes materiais (lã de vidro, poliuretano expandido, conglomerado de poliuretano e poliuretano expandido coberto por uma membrana de poliuretano expandido de diferente espessura) na

presença de 0, 6, 12 e 16 difusores. Posteriormente, é mostrado o efeito de 16 difusores no tempo de reverberação para a câmara vazia e para a câmara com material de absorção de fibra de vidro. Em seqüência, é calculado o coeficiente de absorção de cinco diferentes materiais com características diferentes (feltros, porosos, painéis, etc) para a câmara vazia e com 16 difusores.

Através dos resultados obtidos, eles concluem que há um claro aumento no valor do coeficiente de absorção de materiais porosos, pelo uso de difusores, nas frequências acima de 630 - 800 Hz. Com relação aos materiais compostos, a diferença com o uso de difusores geralmente cai dentro dos limites de confiança da medição, sempre para altos valores de α (entre 0,8 a 1), tanto para baixas (abaixo de 500 Hz) e altas (acima de 4000 Hz) frequências.

Também KATH et al. (1961) apud BENEDETTO et al. (1981) descrevem um estudo experimental dos erros sistemáticos e aleatórios na medição do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante, ambos na presença ou não de difusores. O desvio padrão dos tempos de reverberação em câmara vazia decresceu quando da utilização dos difusores. Na presença de uma grande amostra de material absorvedor, os desvios padrão são muito menores quando os difusores estacionários são utilizados. Finalmente, o autor conclui que difusores são essenciais para uma correta medição do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante.

2.3.1 Causas de Discrepância

Esforços tem sido feitos ao longo dos tempos para achar as razões que levam os resultados de medições de absorção sonora de materiais, feitas por vários laboratórios, divergirem em seus valores. Devido ao método de medição, relativamente simples, a falta de cuidado pode ser excluída como causa e, como os atuais dispositivos eletrônicos têm sido aperfeiçoados, as razões para tais diferenças também não podem ser derivadas desta área. Segundo DÄMMIG (1991), uma conclusão óbvia é, portanto, que as diferenças originam-se do

próprio campo sonoro ao qual a amostra está exposta durante a medição. Isto significa que, em última análise, parâmetros tais como as propriedades da câmara, a posição da amostra e as posições da fonte sonora e do microfone são provavelmente os responsáveis.

Um sério problema, especialmente nas bandas de alta frequência, segundo COPS et al. (1995), é o efeito da atmosfera na absorção sonora. Mudanças das condições atmosféricas na câmara reverberante, antes e após a montagem da amostra, conduzem a erros consideráveis nos resultados do coeficiente de absorção sonora. Contudo, parece ser bem difícil manter as condições atmosféricas constantes numa medição real.

COPS et al.(1995) mencionam que a maioria dos resultados de coeficiente de absorção a altas frequências excedem a unidade, o que é teoricamente incorreto. Há duas razões. O uso da fórmula de Sabine, que é genericamente aplicada em propósitos práticos e é prescrita pela ISO 354 (1985), superestima os resultados. Além disso, tem sido demonstrado que devido ao chamado efeito de borda, difrações aumentam o coeficiente de absorção para valores excedendo a unidade.

É sabido que a posição do alto-falante pode influenciar a medição do tempo de reverberação e, conseqüentemente, a avaliação do coeficiente de absorção. COPS et al. (1995) realizaram medições com duas diferentes posições de fonte. Um alto-falante foi posicionado a 0,5 m acima do piso e a cerca de 1,5 m de um dos cantos da câmara. O segundo alto-falante foi posicionado no lado oposto da câmara a uma altura de 2,5 m do piso e também a 1,5 m do canto. Medições foram realizadas com o mesmo material. Dos resultados, pequenas diferenças foram encontradas nas médias e altas frequências, entretanto, nas baixas frequências, ocorreram diferenças de até 15%. Nas baixas frequências, o comprimento de onda sonora é da mesma ordem de magnitude das dimensões da sala, gerando uma carência de densidade modal e causando discrepâncias no coeficiente de absorção calculado. Esta é a principal razão porque os coeficientes de absorção são calculados com o valor médio obtidos por, pelo menos, duas posições de fonte e diversas posições de microfone.

O campo sonoro em uma câmara reverberante é fortemente influenciado pela configuração do material de medição. COPS et al. (1995) realizaram medições de um material de lã de rocha com superfície de 10 m^2 e espessura de $0,16 \text{ m}$ posicionado em três diferentes posições sobre o piso. Os resultados mostraram que nas médias e altas frequências não há importantes variações. Nas frequências abaixo da banda de terça de oitava de 400 Hz , as discrepâncias aumentam de 10% a 100% .

2.3.2 Medição de absorção sonora em câmara reverberante

A Norma ISO 354 (1985) - Medição de Absorção Sonora em Câmara Reverberante tem como propósito promover a uniformidade no método e nas condições de medição de absorção sonora em câmara reverberante para que os valores determinados em diferentes laboratórios sejam o mais próximos possíveis.

O princípio na determinação da absorção sonora é a medição dos tempos de reverberação em câmara reverberante, com e sem a amostra de ensaio. Destes tempos, calcula-se a área de absorção sonora equivalente A da amostra. Em caso de amostra plana, o coeficiente de absorção sonora é obtido dividindo A pela área de superfície S .

Como condições necessárias, a norma ISO 354 (1985) estabelece padrões para a câmara reverberante, para a difusividade do campo sonoro e para a amostra de teste. Dentre estes, os principais são explicitados a seguir.

⇒ *Volume da Câmara Reverberante:*

O volume da câmara deve ser de, pelo menos, 150 m^3 ; para novas construções, ela recomenda volumes de aproximadamente 200 m^3 .

⇒ *Forma da Câmara Reverberante:*

A forma da câmara deve ser tal, que a seguinte condição seja satisfeita

$$I_{max} < 1,9 V^{1/3}$$

onde: I_{max} é o comprimento da maior linha reta possível no interior da câmara (no caso de uma câmara retangular, é a maior diagonal) e V é o volume da câmara.

Para obter-se uma distribuição uniforme das frequências naturais, especialmente nas bandas de baixa frequência, a câmara não deve ter duas dimensões iguais ou múltiplas entre si.

⇒ *Difusão do Campo Sonoro:*

Durante o decaimento, o campo sonoro na câmara deve ser suficientemente difuso. Para se conseguir uma difusão sonora satisfatória, além da forma da câmara, em geral, são necessários difusores suspensos estáticos ou rotativos. Idealmente, estes elementos de difusão devem ser placas com baixa absorção sonora e com densidade superficial de pelo menos 5 kg/m^2 . Difusores de diferentes tamanhos, variando entre $0,8 \text{ m}^2$ a 3 m^2 de área de cada lado, são recomendados. As placas devem estar levemente encurvadas, serem orientadas aleatoriamente e posicionadas em toda câmara.

Como método para se avaliar a difusividade na câmara, a norma recomenda que se selecione uma amostra de 5 a 10 cm de espessura, de um material absorvedor poroso homogêneo, em ótimas condições, tendo um coeficiente de absorção sonora maior que 0,9 nas faixas de frequência entre 500 Hz e 4000 Hz.

Posteriormente, realizam-se medições de absorção sonora desta amostra na câmara em análise, como segue:

- a) sem nenhum difusor;
- b) com pequeno número de difusores estacionários (aproximadamente 5 m^2 de área);
- c) com quantidades crescentes de difusores estacionários, aumentando aproximadamente 5 m^2 de área por vez.

Para cada etapa de medição, calcula-se o valor médio do coeficiente de absorção sonora nas faixas entre 500 Hz e 4000 Hz e representa-se graficamente estes valores em função do número de difusores utilizados em cada caso.

Será visto que o coeficiente de absorção sonora médio aproxima-se de um máximo e permanece constante, mesmo com o aumento do número de difusores. O número ótimo de difusores estacionários será aquele em que este valor constante é primeiro obtido.

⇒ *Área de Absorção Sonora:*

A área de absorção sonora equivalente A_1 da câmara vazia, determinada em bandas de um terço de oitava, não deve exceder os valores da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Máxima área de absorção sonora equivalente para câmara com volume $V=200 \text{ m}^3$

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

Se o volume V da câmara diferir de 200 m^3 , os valores dados na Tabela 2.2 devem ser multiplicados pelo fator $(V/200)^{2/3}$.

⇒ *Absorvedores Planos:*

A amostra deve ter área entre 10 m^2 e 12 m^2 . Se o volume V da câmara for maior que 250 m^3 , a amostra deve ter sua área aumentada por um fator de $(V/250)^{2/3}$.

É recomendado que a amostra tenha forma retangular com uma razão de largura e comprimento entre 0,7 a 1. A amostra deve ser colocada afastada, no mínimo, 1,0 m das bordas das paredes da câmara. De preferência, é recomendado que as bordas da amostra não estejam paralelas à parede mais próxima.

No caso da amostra ser montada diretamente sobre uma superfície da câmara, as bordas devem ser totalmente cobertas por uma moldura de seção

retangular construída de materiais acusticamente refletores e, em geral, de espessura não maior que 2 cm.

⇒ *Temperatura e Umidade Relativa:*

A umidade relativa do ar dentro da câmara deve ser maior de 40%. Durante as séries de medições de tempo de reverberação T_1 e T_2 , a umidade relativa e a temperatura devem permanecer o mais constante possível e, pelo menos, atender as condições dadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Temperatura e umidade relativa do ar durante a medição de T_1 e T_2

Limite da umidade relativa	Umidade relativa durante as medições	Temperatura durante as medições	Limite inferior de Temperatura
40 até 60 %	3 %	3 °C	10 °C
> 60 %	5 %	5 °C	10 °C

Quanto ao procedimento de medição, a Norma ISO 354 (1985) estabelece:

⇒ *Geração do Campo Sonoro:*

O som dentro da câmara reverberante deve ser gerado por um ou mais alto-falantes, cuja forma de radiação seja o mais onidirecional possível. Para frequências abaixo de 300 Hz, medições devem ser realizadas com a fonte sonora em pelo menos duas posições distintas (afastadas de pelo menos 3 m) com geração do sinal independente.

O sinal utilizado deve consistir de um ruído de bandas limitadas que tenha um espectro da frequência contínuo com uma largura de banda de pelo menos um terço de oitava.

⇒ *Medição do Tempo de Reverberação:*

O equipamento de recepção deve consistir de um ou mais microfones, o mais onidirecionais possível, amplificadores, filtros e um sistema de medição para o tempo de reverberação.

O registro deve ser feito com, pelo menos, três posições de microfone, distanciadas de pelo menos $\lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda sonora correspondente à frequência central da banda de interesse.

Apenas um microfone deve ser utilizado a cada medida. O microfone deve estar distanciado pelo menos 1 m da amostra, 1 m das superfícies da câmara e dos difusores e 2 m da fonte sonora.

⇒ *Faixa de Frequência para a Medição:*

As medições devem ser realizadas seguindo as frequências centrais, em Hertz, das bandas de um terço de oitava: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 e 5000.

⇒ *Número de Medições:*

O número mínimo de medições para cada banda de frequência é:

- doze decaimentos para 100 a 250 Hz (por exemplo, dois para cada uma de seis combinações de fonte/microfone);
- nove decaimentos para 350 a 800 Hz (por exemplo, três para cada uma de três combinações de fonte/microfone);
- seis decaimentos para 1000 a 5000 Hz (por exemplo, dois para cada uma de três combinações de fonte/microfone)

Quanto aos resultados a Norma ISO 354 (1985) estabelece:

⇒ *Método de Cálculo:*

O tempo de reverberação de uma câmara, em cada banda de frequência, é expresso pela média aritmética do número total das medições do tempo de reverberação feitas naquela banda de frequência.

A área de absorção sonora equivalente A_1 , em metros quadrados, de uma câmara vazia, deve ser calculada usando a equação:

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} \quad (2.14)$$

onde: V é o volume, em metros cúbicos, da câmara reverberante vazia
 c é a velocidade do som no ar, em metros por segundo
 T_1 é o tempo de reverberação, em segundos, da câmara reverberante vazia.

Para temperaturas na faixa de 15 a 30 °C, a velocidade do som no ar, c , em metros por segundo, pode ser calculada através da fórmula:

$$C = 331 + 0,6.t \quad (2.15)$$

onde: t é a temperatura no ar, em graus Celsius.

A área de absorção sonora equivalente A_2 , em metros quadrados, da câmara reverberante contendo a amostra de ensaio, deve ser calculada usando a equação:

$$A_2 = \frac{55,3V}{c.T_2} \quad (2.16)$$

onde: T_2 é o tempo de reverberação, em segundos, da câmara reverberante após a amostra de ensaio ser colocada.

A área de absorção sonora equivalente A , em metros quadrados, da amostra de ensaio, deve ser calculada usando a expressão:

$$A = 55,3 \cdot \frac{V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.17)$$

O coeficiente de absorção sonora de uma amostra plana α_s deve ser calculado usando a equação:

$$\alpha_s = \frac{A}{S} \quad (2.18)$$

onde: A é a área de absorção sonora equivalente, em metros quadrados
 S é a área, em metros quadrados, da amostra de ensaio

Por fim, a Norma ISO 354 (1985) estabelece, em seu anexo, critérios para se verificar a precisão do procedimento de medição. Estes são repetibilidade e reprodutibilidade.

A repetibilidade é determinada por ensaios repetidos, realizados em um pequeno intervalo de tempo com a mesma amostra, seguindo o procedimento especificado na norma e utilizado no ensaio (usando o mesmo número de posições de microfone, a excitação da câmara, o registro das curvas de decaimento e a mesma avaliação dos tempos de reverberação para cada ensaio).

A repetibilidade "r" do laboratório pode ser estimada através da expressão:

$$r = l \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2} \quad (2.19)$$

onde: α_i é o resultado da medição i ;

$\bar{\alpha}$ é a média aritmética da série de n medições: $\alpha_1 \dots \alpha_i \dots \alpha_n$;

l é o fator derivado da distribuição de Student para um nível de probabilidade de 95% e um apropriado número de grau de liberdade (veja Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Fator "l"

v= n-1	4	5	6	7	8	9	10	20	∞
1	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,23	2,09	1,96

2.4 SIMULAÇÃO POR RAIOS ACÚSTICOS

Para poderem estudarem em detalhes a flutuação do nível de pressão sonora em câmara reverberante, DODD e DOAK (1971) desenvolveram um software no Instituto de Acústica e Vibrações da Universidade de Southampton. Em essência, o computador calcula a somatória de contribuições de autofunções, ambas as partes real e imaginária, de uma pressão acústica complexa no ponto (x', y', z') na câmara provocada por uma fonte harmônica pontual simples, de frequência irradiada w e potência sonora predeterminada a um outro ponto (x, y, z). O software permite simular contribuições da ordem de 500 autofunções.

Em trabalho anterior, DODD (1968) apud DODD e DOAK (1971), investigou a influência da posição da fonte e do microfone (isto é, cantos e posições aleatórias) nas curvas de resposta em frequência, com um modelo computacional. A forma, o espaçamento e a amplitude de tais flutuações da curva de resposta foram encontradas como sendo estatisticamente insensíveis à posição selecionada. Semelhante insensibilidade foi encontrada na escolha dos fatores de autofunção em salas, retangulares ou não, e com respeito a escolha do espaçamento estatístico da autofrequência, de salas retangulares ou não.

Baseado no princípio dos raios acústicos, FORSBERG (1985) desenvolveu um programa de simulação da propagação do som em ambientes. A única característica do método é que, ambos, sala e raios, são representados apenas em pontos discretos. O programa, implementado em Pascal, possui duas vantagens principais: o tempo requerido para o processamento não aumenta caso a sala a ser analisada torne-se mais complexa e as entradas de dados são as mais simples possíveis. Os resultados alcançados indicam que o método age do modo pretendido e gera resultados suficientemente precisos para qualquer aplicação. Os dados produzidos pelo software incluem, para uma sala arbitrária, o nível de pressão sonora e o tempo de propagação das reflexões do som originárias de uma fonte com características de radiação arbitrária e alcançando um ou vários pontos de recepção dados.

Para calcular a resposta impulsiva de uma sala acústica, VORLÄNDER (1989) desenvolveu um método baseado em dois conhecidos algoritmos, o modelo de raios acústicos e o de fontes imagem. Com este método, o procedimento de seleção das fontes imagem "visíveis" dentre as enormes quantidades de fontes possíveis, é feito pelo exame dos históricos das partículas do som. Através da lista obtida das fontes imagem visíveis, a resposta impulsiva da sala é facilmente construída. O método combina as vantagens do processo de raios acústicos, a saber, o pequeno aumento relativo do tempo computacional com o comprimento da resposta impulsiva, com a precisão inerente do modelo de fonte imagem.

No modelo de raios acústicos há, segundo LEHNERT (1993), dois tipos de erros sistemáticos inerentes, isto é, devidos ao problema de detecção e à limitada resolução espacial. O primeiro deles é causado pelo fato de os raios não poderem, em princípio, ser detectados por um receptor de formato pontual. O seguinte é devido ao limitado número de traçados de raios.

Através da característica estatística do método de raio acústicos, erros sistemáticos, como detecções múltiplas do mesmo traçado sonoro, e/ou detecção de caminhos sonoros inválidos, podem surgir. Contudo, como mostra LEHNERT (1993), esses erros podem ser corrigidos sem um aumento significativo no tempo computacional.

Para demonstrar a sensibilidade dos resultados sobre a escolha dos parâmetros de entrada no modelo, VERMEIR e MEES (1995) apresentaram resultados de simulações para algumas geometrias simples. Utilizando um software, eles calcularam as respostas impulsiva em banda larga, a partir das quais, todas as quantidades acústicas relevantes de sala foram derivadas.

Dos dados de entrada, VERMEIR e MEES (1995) afirmam que os coeficientes de absorção sonora e de difusão permanecem problemáticos. Para o coeficiente de absorção sonora, foi demonstrado que os efeitos relacionados com o comportamento modal da sala e com a obstrução por objetos não podem ser simulados diretamente por raios acústicos. Também é mostrada a grande influência do parâmetro da difusividade no tempo de reverberação. A difusão pode ser levada em consideração através de reflexões randômicas das superfícies das paredes ou por um modelamento detalhado da geometria da sala, procedendo nele mesmo, um certo grau de difusão.

Assim como Vermeir e Mees, também MENG et al. (1995) determinaram a sensibilidade dos resultados de simulações de geometrias definidas em função da escolha dos parâmetros de entrada, tais como número de raios (NR) e ordem de reflexão (OR).

Neste trabalho, eles simularam, através do software RAYNOISE[®], um dos auditórios da Universidade Livre de Brussels - Bélgica. A integridade do software e a convergência do algoritmo também foram estudadas.

Como procedimento, eles fixaram a ordem de reflexão e variaram o parâmetro acústico Nível de Pressão Sonora (NPS) em função do número de raios. Posteriormente, fixando o número de raios e variando o número de reflexão, o NPS é variado. Este procedimento é realizado até haver a convergência das curvas de NPS em função de "N" e de "R".

MENG et al. (1995) afirmam que os métodos de simulação computacional ainda sofrem limitações inerentes à geometria da sala, aos valores de absorção e reflexão dos materiais usados e aos algoritmos. Eles comentam que, para o procedimento de simulação acústica, o software RAYNOISE[®] possui muitos méritos, mas também tem algumas limitações.

Em uma sala de geometria complexa ou completamente mobiliada, onde a difração, a difusão e as reflexões de borda são importantes, a reflexão especular não consegue representar o mecanismo de reflexão do meio. Superfícies rugosas irão resultar em um espalhamento da energia refletida. Características acústicas dos materiais das superfícies podem ser um fator adicional mais sensível para a precisão do modelo acústico.

Para uma análise prévia, os parâmetros de entrada, tais como número de raios e ordem de reflexão, determinam se os valores resultantes alojam-se na faixa de convergência. A seleção destes parâmetros é relacionada com as dimensões da sala, os materiais das superfícies e a potência sonora da fonte. Então, afirmam MENG et al. (1995), para cada modelo acústico diferente, primeiramente, a faixa de convergência das quantidades acústicas deve ser testada, para só então, os parâmetros de entrada serem determinados.

2.4.1 Software Raynoise - Princípios de modelamento

Princípios Gerais

Raynoise é baseado no princípio da acústica geométrica. A acústica geométrica assume que as ondas sonoras comportam-se como raios sonoros,

exatamente como na ótica geométrica, onde as "ondas" luminosas comportam-se como raios luminosos. Os raios acústicos são refletidos por superfícies sólidas e parte de sua energia é perdida a cada reflexão. Esta aproximação é válida apenas nas médias e altas frequências.

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

O MISM usa fontes imagem virtuais para traçar o caminho da reflexão do som do receptor para a fonte sonora.

Isto pode facilmente ser ilustrado com um simples problema em 2D de uma sala retangular, contendo uma fonte esférica no ponto S e um receptor no ponto R (veja Figura 2.10). Inicia-se pela construção da fonte imagem de primeira ordem no ponto S, com respeito as paredes: S_1 , S_2 , S_3 e S_4 . Pelo cálculo dos pontos de interseção das linhas S_iR com a correspondente parede i , pode-se projetar os caminhos de reflexão de primeira ordem.

Da mesma forma procede-se com as fontes secundárias, eliminando-se as paredes nas quais a fonte secundária for refletida por último.

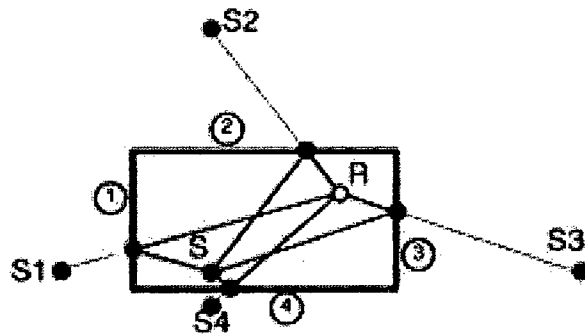


Figura 2.10 - Caminhos de reflexão de primeira ordem em uma caixa retangular [LMS (199-)]

Este processo deve ser contínuo até a ordem estipulada de fonte imagem. A Figura 2.11 mostra a construção da fonte imagem de terceira ordem (S_{124}). Dessa maneira, esta fonte imagem representa o caminho de reflexão que foi percorrido pelo raio refletido na três paredes (parede 1, parede 2 e parede 4).

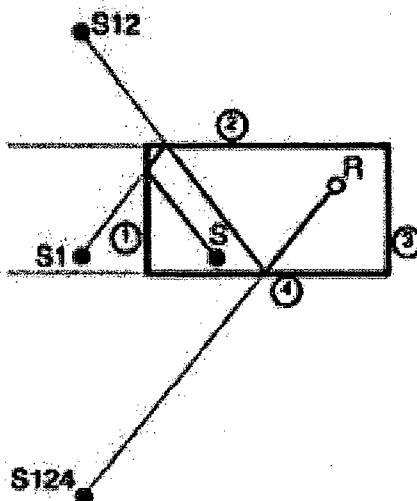


Figura 2.11 - Caminho de reflexão correspondente a fonte imagem de terceira ordem [LMS(199-)]

Quando aplicado a uma sala retangular, o modelo resulta numa sessão regular de fontes imagem, com todo elemento sendo visível de qualquer posição da sala, conforme representado na Figura 2.12.

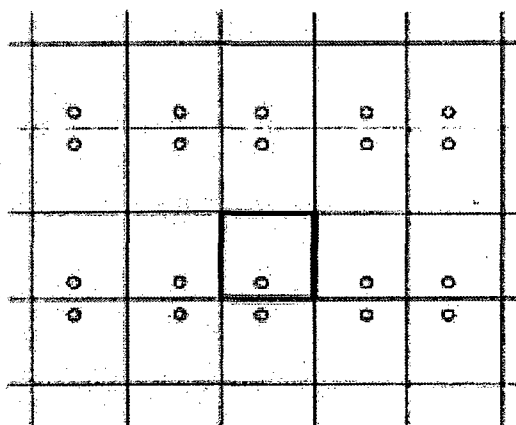


Figura 2.12 - Construção de fonte imagem [LMS(199-)]

Em salas irregulares, contudo, esse não é o caso, e o teste de visibilidade tem de ser feito. O exemplo da Figura 2.13 mostra que o receptor R_1 pode ser alcançado pela reflexão de primeira ordem contrária da parede 1, enquanto o receptor R_2 , não. Em outras palavras, R_1 é "visível" a S_1 , enquanto R_2 não.

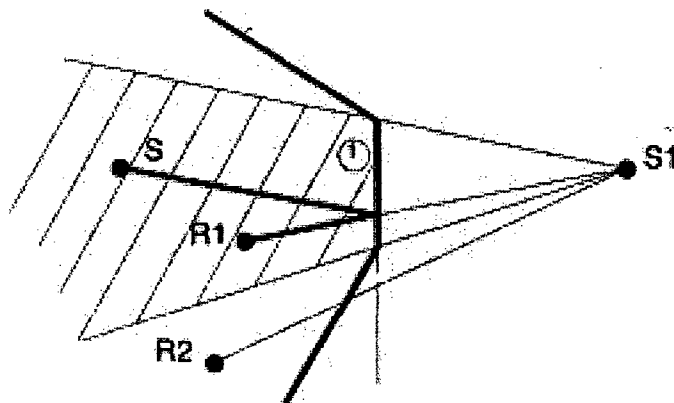


Figura 2.13 - Teste de visibilidade [LMS(199)]

Devido a esse teste de visibilidade, o MSM sofre um longo tempo de computação, especialmente quando um número grande de superfícies estão envolvidas e/ou quando a absorção média é pequena, aumentando assim, o número de fontes imagem que necessitam ser levadas em consideração.

Método dos Raios Acústicos (*Ray Tracing Method* - RTM)

No método dos raios acústicos (RTM) assume-se que a energia emitida pela fonte sonora é distribuída por um número discreto de raios sonoros. Cada raio tem uma energia inicial igual a energia total da fonte dividida pelo número de raios. Cada raio propaga-se à velocidade do som colidindo com as paredes, piso e teto, etc, onde é refletido de acordo com a lei da reflexão especular. O nível de energia de cada raio decresce a cada reflexão, em razão da absorção das paredes e, progressivamente, com a propagação, pela absorção do ar. Quando o nível de energia decai abaixo do limiar definido pelo usuário, o raio é abandonado e um próximo é propagado (veja Figura 2.14).

Para se calcular a energia sonora em diferentes pontos da sala, "células" receptoras com volumes finitos são definidos. Cada raio é verificado para detectar se ele cruza com o volume receptor. O número de raios cruzando o

volume receptor e a contribuição de energia destes raios dão a medição do nível da pressão sonora.

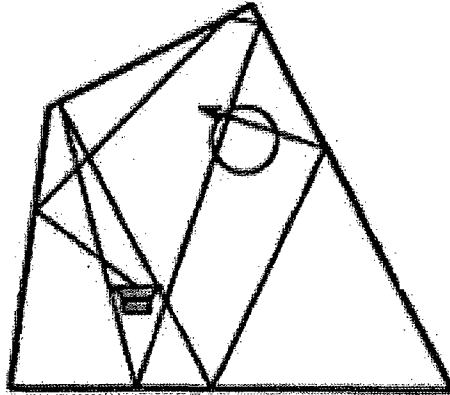


Figura 2.14 - Raios Sonoros [LMS(199-)]

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

O método de raios cônicos (CBN) emite um grande número de cones com seus vértices na fonte. A propagação dos cones através da sala é manejada pela aplicação do algoritmo dos raios acústicos para os eixos dos cones (vide Figura 2.15). Quando o ponto receptor se encontra dentro do volume varrido pelo cone, entre duas sucessivas reflexões, uma fonte imagem visível é encontrada e sua contribuição é calculada.

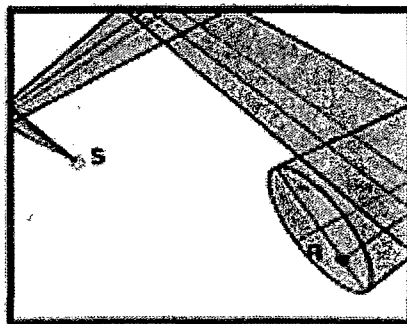


Figura 2.15 - Propagação do cone sobre as superfícies [LMS(199-)]

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

O método de raios triangulares é muito similar ao CBM, mas ao invés da emissão de cones, pirâmides de base triangular são usadas para discretizar a onda esférica (vide Figura 2.16). Este processo tem como vantagem a não ocorrência de nenhuma sobreposição dos feixes de raios e, assim, nenhuma função de compensação tem de ser aplicada.

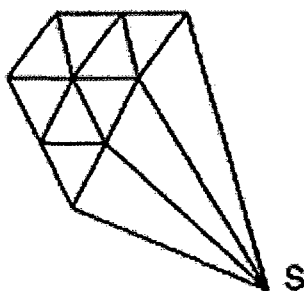


Figura 2.16 - Método dos raios triangulares [LMS(199)]

CAPÍTULO 3

COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Neste capítulo é descrita a medição do coeficiente de absorção sonora de uma espuma de poliuretano, também determinado em outros cinco laboratórios distribuídos pela América do Sul.

A amostra em questão é utilizada como referência para um estudo de adequação dos valores medidos na câmara reverberante do LVA-UFSC em função dos coeficientes de absorção determinados pelos outros laboratórios.

Este estudo compõe-se de medições do coeficiente de absorção sonora da amostra de referência na câmara reverberante contendo diversos tipos e distribuições de difusores. Através dos resultados obtidos, os difusores são avaliados quanto à eficiência na adequação aos valores de medição.

As medições realizadas na câmara reverberante do LVA-UFSC ocorreram de acordo com as recomendações da norma ISO 354 (1985).

3.1 COMPARAÇÃO ENTRE LABORATÓRIOS

A melhor técnica conhecida para a determinação do coeficiente de absorção sonora de materiais para incidência sonora aleatória é o método da câmara reverberante. Embora os detalhes do método de medição sejam descritos na norma internacional ISO 354 (1985), comparações entre diferentes laboratórios e, igualmente, dentro de um mesmo laboratório, resultam em grandes discrepâncias nos valores de absorção sonora obtidos. Diferentes testes têm sido realizados nas últimas décadas para identificar as razões dos desvios. A

Figura 3.1 mostra um exemplo da clara discrepância entre valores de coeficiente de absorção ocorridas sobre toda a faixa de frequência de interesse medidos em 19 laboratórios. COPS et al. (1995)

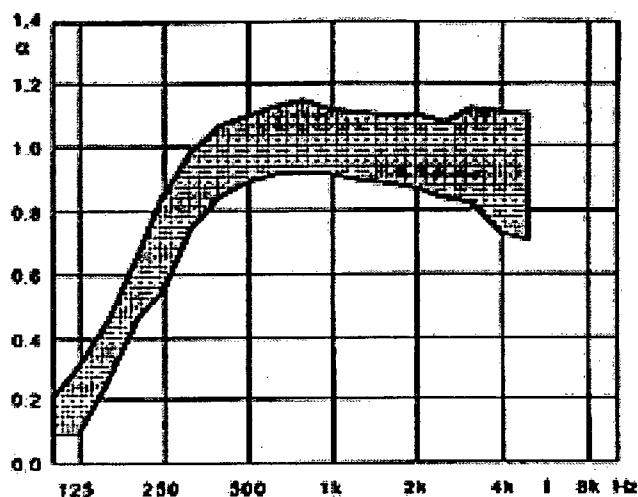


Figura 3.1 - Variação dos resultados do coeficiente de absorção sonora de uma amostra medidos em 19 laboratórios [COPS et al. (1995)]

A medição do coeficiente de absorção sonora de materiais em câmara reverberante depende de parâmetros que são fortemente influenciados pela repetibilidade dentro dos laboratórios e pela reprodutibilidade entre os resultados.

DÄMMIG (1991) comenta que, apesar da normalização do método de medição pela ISO 354 (1985), resultados provindos de vários laboratórios deixam muito a desejar. Ele atenta para o fato que no comércio internacional de produtos de absorção sonora, os quais são amplamente usados no campo das salas e edificações acústicas, isto pode ser muito problemático, podendo até mesmo conduzir a barreiras comerciais.

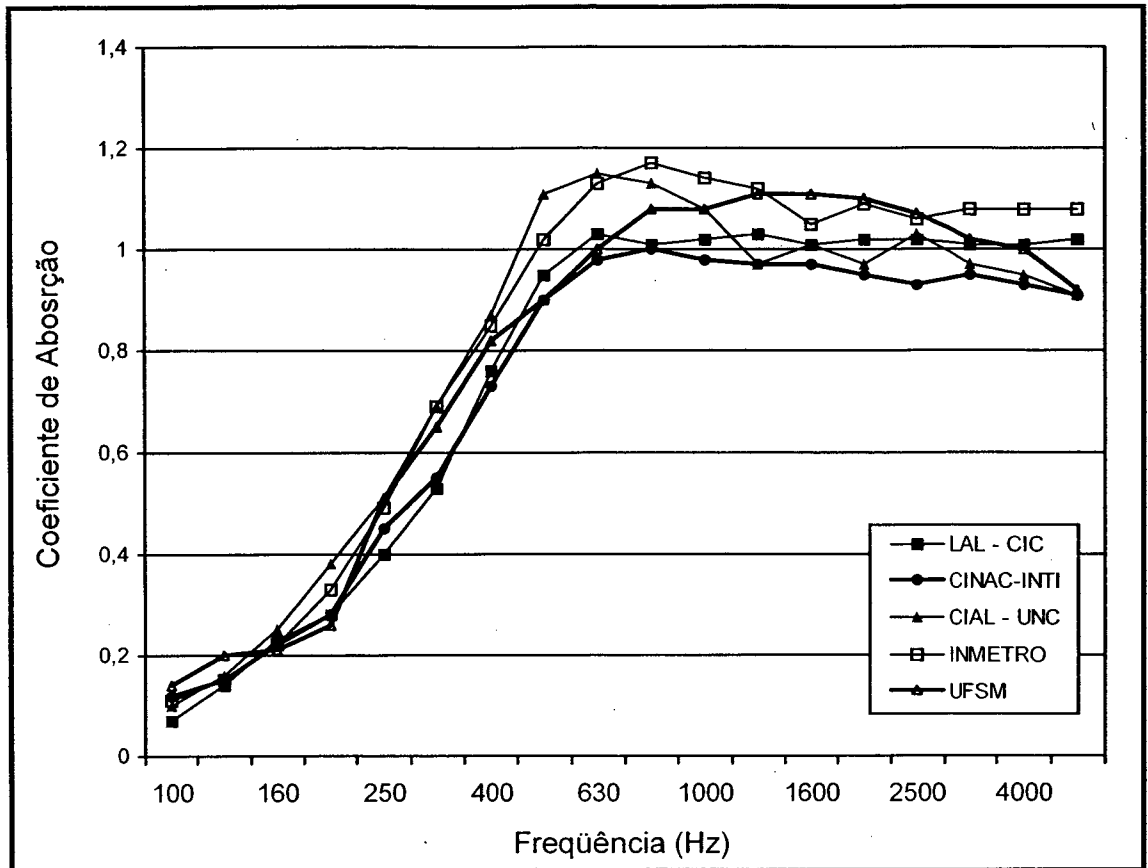
3.1.1 Resultados das Medições dos Coeficientes de Absorção Sonora da Amostra de Referência realizadas em 5 Laboratórios

A espuma flexível de poliuretano SONEX[®] ROC (densidade: 30 kg/m³ e dimensões: 60 x 60 x 4,5 cm (a unidade)) utilizada como amostra de referência na medição do coeficiente de absorção sonora deste trabalho foi, também, utilizada como amostra para medições similares em outros 5 laboratórios, sendo que destes, três estão instalados na Argentina e dois no Brasil.

Em NABUCO (1998) estão apresentados os resultados das medições dos cinco Laboratórios, os quais são descritos a seguir na Tabela 3.1 e na Figura 3.2.

Tabela 3.1 - Coeficientes de Absorção da amostra de referência medidos em vários Laboratórios

Freq. (Hz)	LAL - CIC	CINAC-INTI	CIAL - UNC	INMETRO	UFSM
100	0,07	0,12	0,10	0,11	0,14
125	0,14	0,15	0,16	0,15	0,20
160	0,23	0,22	0,25	0,22	0,21
200	0,28	0,28	0,38	0,33	0,26
250	0,40	0,45	0,51	0,49	0,51
315	0,53	0,55	0,69	0,69	0,65
400	0,76	0,73	0,87	0,85	0,82
500	0,95	0,90	1,11	1,02	0,90
630	1,03	0,98	1,15	1,13	1,00
800	1,01	1,00	1,13	1,17	1,08
1000	1,02	0,98	1,08	1,14	1,08
1250	1,03	0,97	0,97	1,12	1,11
1600	1,01	0,97	1,01	1,05	1,11
2000	1,02	0,95	0,97	1,09	1,10
2500	1,02	0,93	1,03	1,06	1,07
3150	1,01	0,95	0,97	1,08	1,02
4000	1,01	0,93	0,95	1,08	1,00
5000	1,02	0,91	0,91	1,08	0,92



(LAL - CIC): Laboratorio de Acústica y Luminotecnia - CIC - La Plata - Argentina; (CINAC - INTI): Centro de Investibaciones Acústicas - INTI - Buenos Aires - Argentina; (CIAL - UNC): Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas - UNIC - Cordoba - Argentina; (INMETRO): Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Brasil; (UFSC): Universidade Federal de Santa Maria - Brasil.

Figura 3.2 - Coeficientes de absorção da amostra de referência medido em 5 Laboratórios

3.2 MEDIÇÃO NA CÂMARA REVERBERANTE DO LVA/UFSC

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora na câmara reverberante do LVA-UFSC foi utilizado um conjunto de placas de espuma de poliuretano também denominado amostra de referência, cujos valores determinados em outros cinco laboratórios são descritos na Figura 3.2. Nesta medições foram utilizados dois tipos de difusores (difusores "inclinados" e "suspensos") instalados na câmara reverberante em doze configurações diferentes. Para o procedimento de medição foram seguidas as recomendações da norma ISO 354 (1985).

3.2.1 Câmara Reverberante do LVA/UFSC

Características:

Construída sobre amortecedores, tem formato regular e paredes paralelas. As paredes e piso são de concreto recoberto por tinta. É envolvida por paredes de alvenaria espaçadas da câmara por, aproximadamente, 1 m de camada de ar.

Geometria:

Comprimento: 7,39 m

Largura: 7,39 m

Altura: 2,64 m

Volume: 144,18 m³

Área total: 187,26 m²

Ângulo entre as superfícies adjacentes da câmara: 90 °

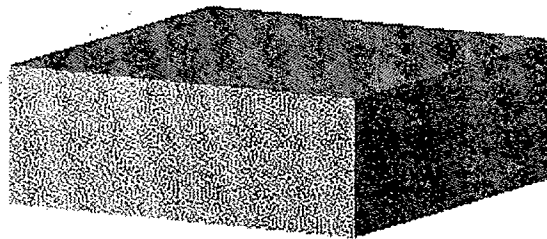


Figura 3.3 - Câmara reverberante do LVA-UFSC - Formato

DIFUSORES

Os difusores utilizados na câmara reverberante do LVA-UFSC foram de 2 tipos, denominados difusores "inclinados" e difusores "suspensos".

Os difusores "inclinados" são difusores de madeira compensada, apoiados no piso e nas laterais ou cantos da câmara, como mostra a Figura 3.4. Eram estes os difusores utilizados anteriormente na câmara reverberante.

Os difusores "Suspensos" são elementos de madeira tipo MDF, fixados no teto da câmara, com inclinações e curvaturas variadas, como mostra a Figura 3.5. São estes os difusores escolhidos para serem colocados na câmara com o intuito de se aperfeiçoar o campo acústico.

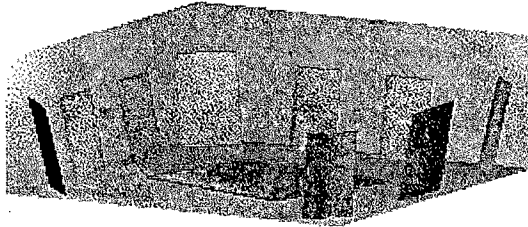


Figura 3.4 - Difusores Inclinaados

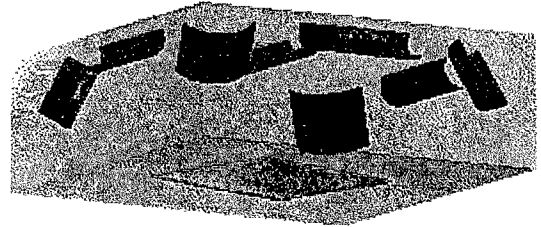


Figura 3.5 - Difusores Suspensos

DIFUSORES "INCLINADOS":

Chapas de Compensado de Madeira de 9,0 mm de espessura

Tabela 3.2 - Dimensões dos Difusores "Inclinaados"

Difusor	Largura (m)	Altura (m)	Área (m ²)
1	1,20	1,80	2,16
2	1,20	1,60	1,92
3	1,20	1,60	1,92
4	1,20	1,80	2,16
5	1,00	1,60	1,60
6	1,00	1,60	1,60
7	1,00	1,80	1,80
8	1,60	1,80	2,88
9	1,00	1,80	1,80

A numeração dos difusores segue com o difusor 1 sendo o primeiro difusor da esquerda (vide Figura 3.4), seguindo a numeração no sentido horário à câmara.

DIFUSORES "SUSPENSOS":

Chapas de Madeira MDF de 3,0 mm de espessura

Tabela 3.3 - Dimensões dos Difusores "Suspendos"

Difusor	Largura (m)	Altura (m)	Área (m ²)
1	1,83	1,22	2,23
2	2,44	0,915	2,23
3	1,83	1,22	2,23
4	2,44	0,915	2,23
5	1,83	1,22	2,23
6	2,44	0,915	2,23
7	1,83	1,22	2,23
8	2,44	0,915	2,23

A numeração dos difusores segue com o difusor 1 sendo o primeiro difusor da esquerda (vide Figura 3.5), seguindo a numeração no sentido horário à câmara. O difusor central na câmara é o de número 8.

3.2.2 Instrumentação e Procedimento

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

⇒ Câmara Reverberante do LVA/UFSC

⇒ Difusores "Inclinados": Chapas de Compensado de Madeira de 9,0 mm

⇒ Difusores "Suspendos": Chapas de Madeira MDF de 3,0 mm

⇒ Amostra:

30 placas de espuma flexível de poliuretano SONEX[®] ROC

densidade: 30 kg/m³

dimensões: 0,6 x 0,6 x 0,045 m a unidade,

área total: 30 unidades x 0,36 m² = 10,8 m².

⇒ Fonte Estabilizadora com proteção NODAJI

⇒ Gerador de Sinais Amplificado Tipo 4205 Brüel & Kjaer

⇒ Fonte Sonora HP 1001 - Brüel & Kjaer

- ⇒ Analisador Digital de Sinais Tipo 2144- Brüel & Kjaer
- ⇒ Pré-Amplificador - Tipo 2639- Brüel & Kjaer
- ⇒ Microfone 1/2" Tipo 4166 - Brüel & Kjaer
- ⇒ Calibrador Tipo 4230 - Brüel & Kjaer

- ⇒ Programa "Building Acoustics" : Tipo 5305" - Brüel & Kjaer

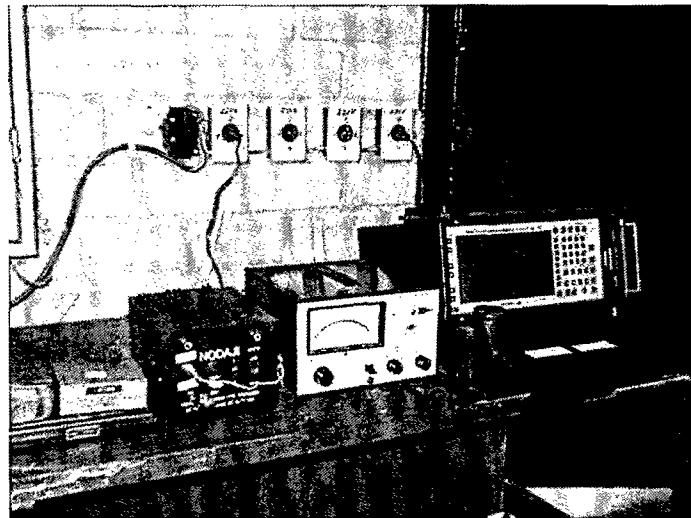


Figura 3.6 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora – Instrumentação

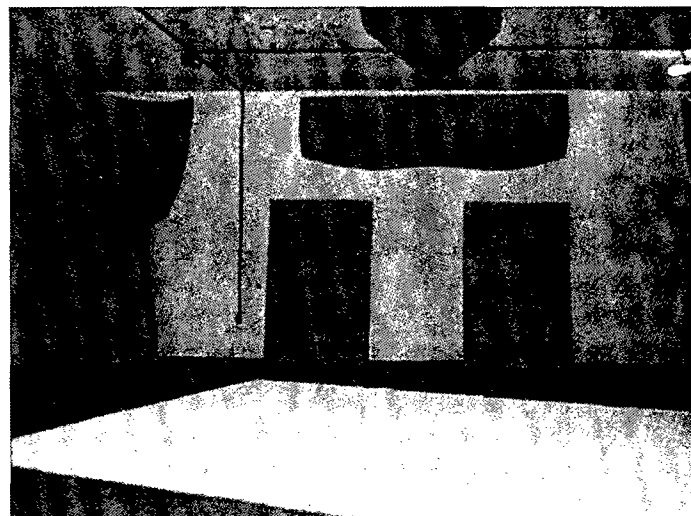


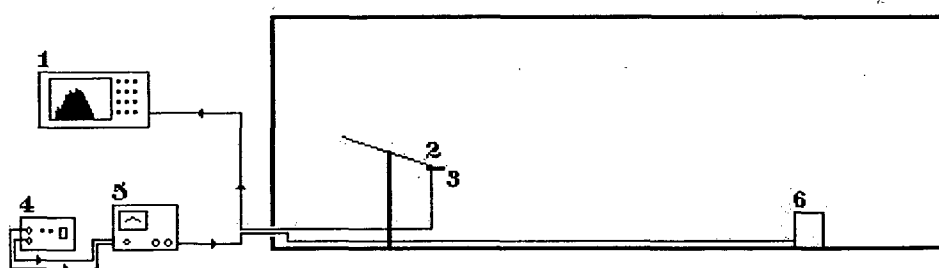
Figura 3.7 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora - Câmara Reverberante

DESCRIÇÃO DA MEDIÇÃO

Para a realização das medições foram seguidas as recomendações da Norma "ISO 354 - *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room* (1985)".

Segundo a norma, a determinação do coeficiente de absorção em Câmara Reverberante consiste basicamente na determinação do Tempo de Reverberação (TR) com e sem a amostra.

O sistema de medição utilizado consistiu em um gerador de sinais amplificado ligado a uma fonte sonora para a emissão do ruído, no caso, ruído branco, e um microfone acoplado a um pré-amplificador, juntamente com o analisador digital de sinais para processamento e registro do sinal captado.



1 - Analisador digital de sinais; 2 - Pré-amplificador; 3 - Microfone 1/2"; 4 - Fonte Estabilizadora; 5 - Gerador de Sinais Amplificado; 6 - Fonte Sonora.

Figura 3.8 - Esquema de Medição

O procedimento para medição do TR consiste, primeiramente, em gerar-se o sinal no gerador que, através da fonte sonora, emite o ruído branco dentro da câmara. O sinal, captado pelo microfone, é enviado ao analisador de sinais que, após interrompida a emissão do ruído dentro da câmara, registra o decaimento do NPS, em bandas de Terça de oitava, em função do tempo. Ter-se-á então, o registro de todo o decaimento, desde o nível do ruído gerado até o nível do ruído de fundo existente dentro da câmara.

A medição do TR é feita duas vezes, em bandas de terça de oitava nas frequências centrais de 100 até 5000 Hz, para cada uma das seis configurações de posição fonte-microfone, totalizando 12 medições.

Primeiramente, as 12 medições são realizadas com a câmara vazia e, posteriormente, com o material de absorção dentro da câmara.

Este procedimento foi repetido para cada uma das várias configurações de difusores dispostos pela câmara.

Tabela 3.4 - Ordem de disposição dos microfones e fonte na câmara reverberante

Medição	Fonte	Microfone
1	F1	P2 , h1
2	F1	P2 , h1
3	F1	P3 , h2
4	F1	P3 , h2
5	F1	P4 , h3
6	F1	P4 , h3
7	F2	P4 , h3
8	F2	P4 , h3
9	F2	P1 , h2
10	F2	P1 , h2
11	F2	P2 , h1
12	F2	P2 , h1

As posições de fonte, microfone e amostra seguiram como: (vide Figura 3.9)

Tabela 3.5 - Locação das posições de microfone, fonte e amostra na câmara reverberante

	X (m)	Y (m)	Z (m)
P1	1,80	5,64	1,40
P2	5,19	5,19	1,10
P3	5,39	1,50	1,40
P4	1,50	2,00	1,65
F1	1,50	5,89	0,00
F2	5,89	1,50	0,00
I	2,4	5,65	0,00
II	5,85	4,60	0,00

Onde o ponto (0,0,0) do sistema cartesiano corresponde ao canto inferior esquerdo da câmara, na Figura 3.9, com o eixo das abscissas (eixo X)

sendo o eixo horizontal da figura e o eixo das ordenadas (eixo Y) o eixo vertical. O eixo Z tem origem no plano do piso e sentido ao teto da câmara.

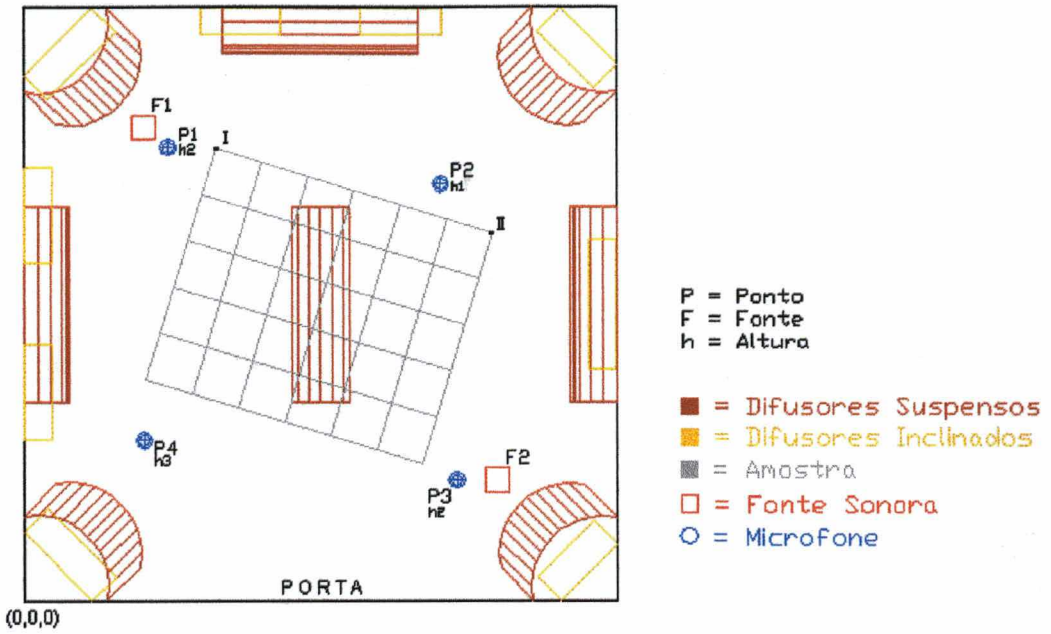


Figura 3.9 - Câmara Reverberante - Planta

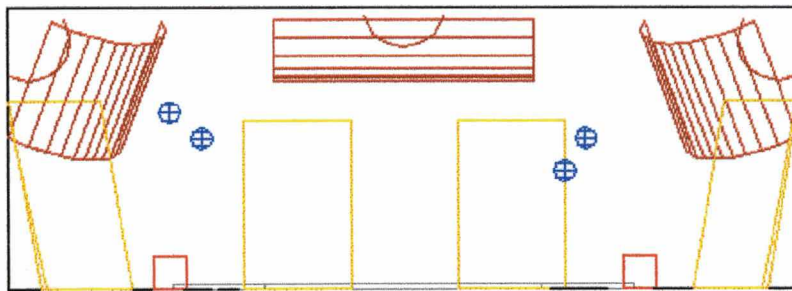


Figura 3.10 - Câmara Reverberante – Corte

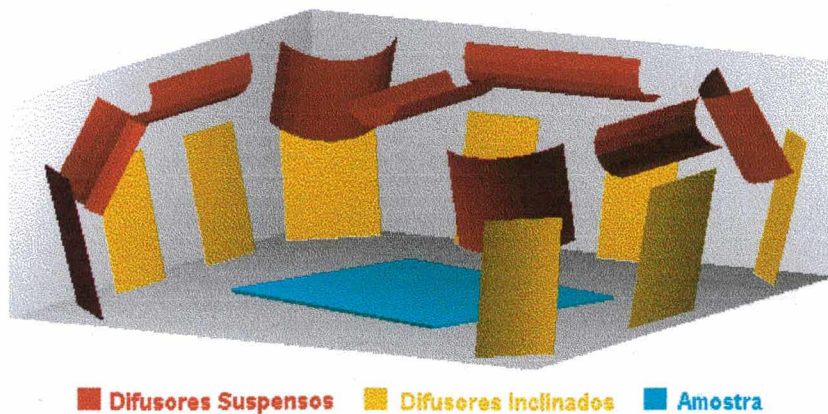


Figura 3.11 - Câmara Reverberante - Perspectiva

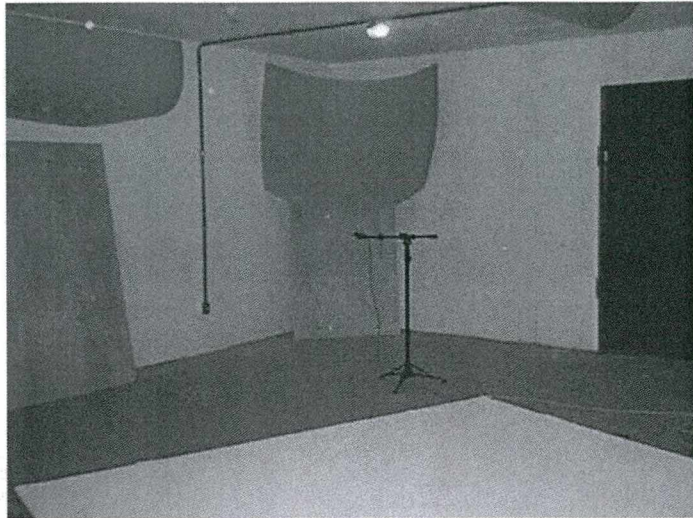


Figura 3.11 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora - Microfone

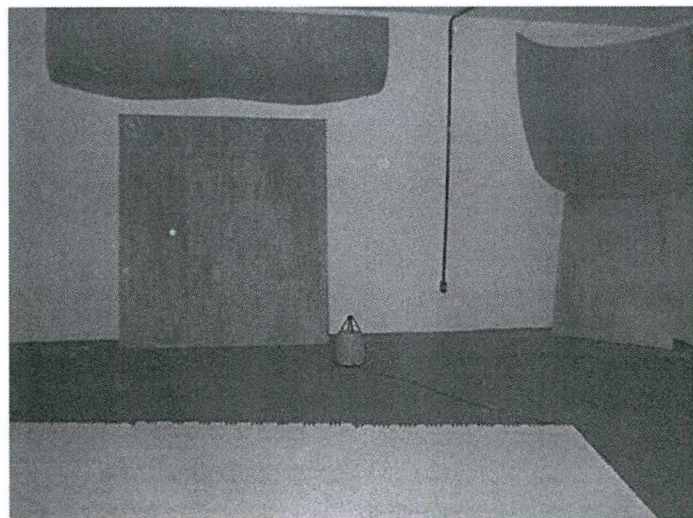


Figura 3.12 - Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora - Fonte Sonora

3.2.3 Cálculo dos Tempos de Reverberação

Após terem sido obtidas e registradas as curvas de decaimento do Nível de Pressão Sonora dentro da câmara através do analisador digital de sinais, os dados são exportados para o software "Building Acoustics" que efetua os cálculos dos tempos de reverberação.

O tempo de reverberação é calculado, em bandas de frequência, através dos espectros medidos durante o decaimento do nível de pressão sonora na câmara. A Figura 3.14 apresenta, de forma esquemática, o procedimento de cálculo do tempo de reverberação através dos espectros de decaimento do NPS medidos na câmara reverberante. Na Figura 3.15 está exemplificado, para a banda com frequência central de 1 kHz, a curva de decaimento do NPS medido na posição 05. Os arquivos contendo os espectros têm como extensão .TR2.

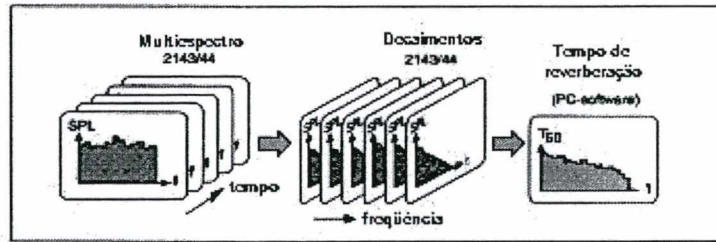


Figura 3.14 - Cálculo do TR pelas curvas de decaimento do NPS

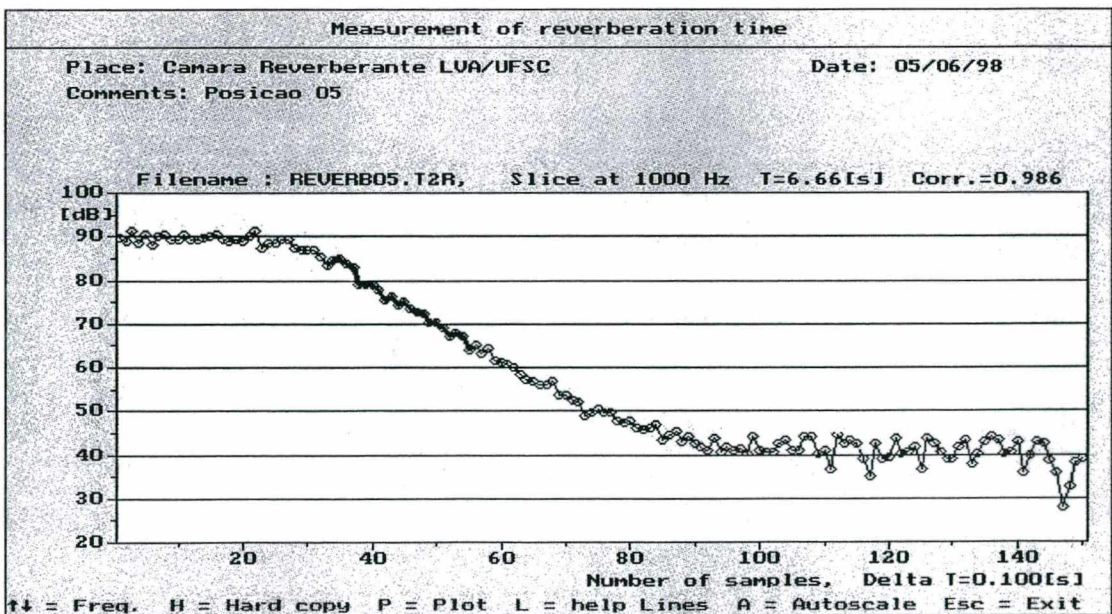


Figura 3.15 - Curva de decaimento do Tempo de Reverberação

Para cada espectro obtido, o tempo de reverberação é calculado através da regressão linear do decaimento. A amostra para a regressão linear é selecionada dentro da faixa de avaliação de 20 dB (*evaluation range*), situada entre os pontos Y_1 e Y_2 na curva, como mostra a Figura 3.16.

O tempo de reverberação é então calculado por:

$$\text{Tempo de Reverberação} = - 60/\text{declive}$$

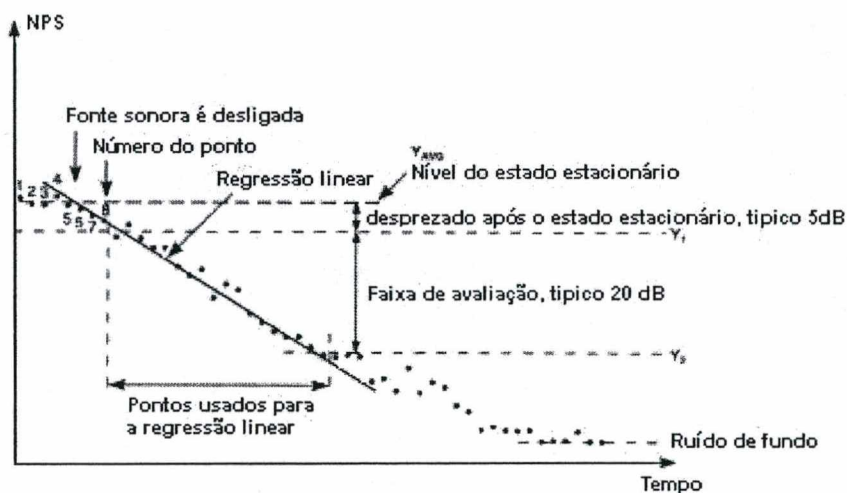


Figura 3.16 - Faixa de Avaliação para cálculo do TR20

3.2.4 Cálculo dos Coeficientes de Absorção

O tempo de reverberação, por banda de frequência, é expresso pela média aritmética sobre o total das medições de tempo de reverberação em cada banda de frequência.

Determinados os tempos de reverberação T_1 e T_2 , são calculados, seguindo os procedimentos recomendados pela norma ISO 354 (1985), as áreas de absorção sonora equivalente A_1 para câmara vazia e A_2 para câmara contendo a amostra. Destas áreas determina-se a área de absorção sonora equivalente da amostra de teste "A", da qual deriva-se o coeficiente de absorção sonora da amostra α_s .

3.2.5 Coeficientes de Absorção Sonora para várias Configurações de Difusores

Uma vez escolhido o tipo de difusores a serem aplicados na câmara reverberante, estes foram instalados na câmara para se avaliar sua aplicabilidade e funcionalidade na difusão do campo.

Como os difusores "inclinados" já haviam sido aplicados na câmara reverberante e seus desempenhos conhecidos, estes também foram utilizados na avaliação da difusividade do campo, para determinar, em conjunto com os difusores "suspensos", se teriam seu desempenho aperfeiçoado.

Com o objetivo de se avaliar a melhor configuração dos difusores a ser aplicada na câmara reverberante, uma metodologia foi escolhida:

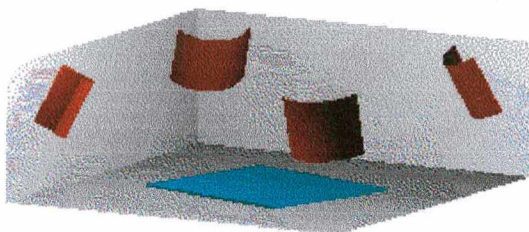
⇒ Combinações com os dois tipos de difusores seriam avaliadas, para determinar-se o desempenho particular nas principais posições na câmara, como cantos, laterais e central.

⇒ Também, com as combinações dos dois tipos, seria avaliada a relevância de cada tipo de difusor.

⇒ Os dois tipos de difusores deveriam ser avaliados isoladamente e em quantidades progressivas (seguindo a metodologia de avaliação da difusividade do campo sonoro em câmara reverberante descrita na norma ISO 354 (1985)), para determinar-se seus desempenhos individuais.

Seguindo-se estes três preceitos, 12 configurações de difusores foram escolhidas e aplicadas na câmara reverberante. A seguir, os coeficientes de absorção da amostra de referência foram determinados para cada configuração.

Os resultados dos valores dos coeficientes de absorção sonora medidos para cada configuração são apresentados a seguir:



Configuração I :

4 Difusores Suspensos nos cantos

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	13,32	9,68	0,06
125	14,92	9,60	0,08
160	14,27	7,54	0,13
200	13,44	6,06	0,19
250	11,13	4,84	0,25
315	8,35	3,63	0,33
400	7,08	2,19	0,68
500	7,17	1,83	0,88
630	7,07	1,73	0,94
800	6,63	1,69	0,95
1000	5,99	1,63	0,96
1250	5,74	1,55	1,01
1600	5,11	1,55	0,96
2000	4,67	1,52	0,96
2500	3,96	1,42	0,96
3150	3,47	1,35	0,97
4000	2,89	1,25	0,97
5000	2,36	1,16	0,94

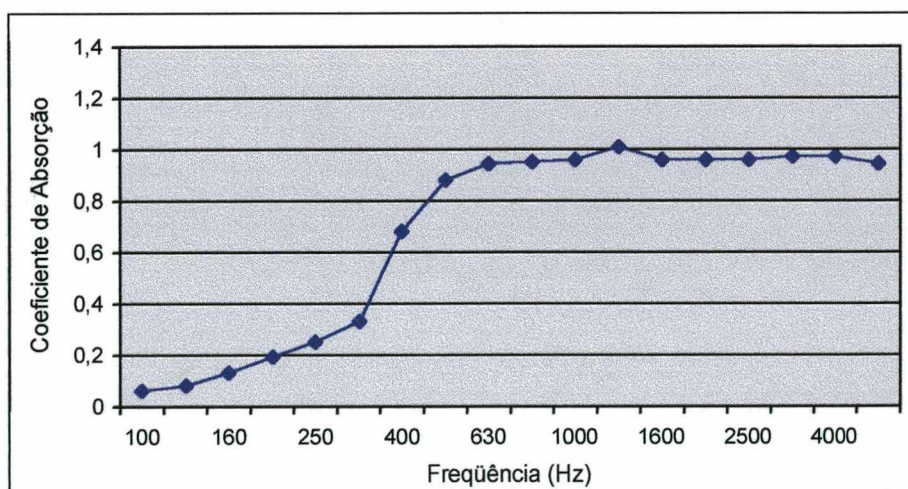
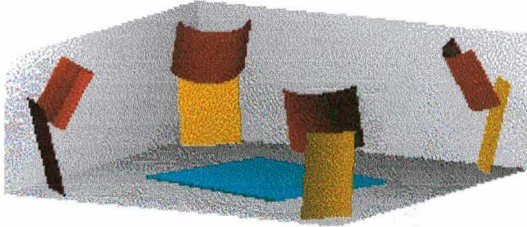


Figura 3.17 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores I



Configuração II :

- 4 Difusores Suspensos nos cantos
- 4 Difusores Inclinados nos cantos

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	11,32	7,07	0,11
125	18,12	8,34	0,14
160	11,20	5,95	0,17
200	11,81	5,55	0,20
250	10,34	3,52	0,40
315	6,85	2,24	0,65
400	6,44	1,74	0,90
500	6,13	1,57	1,02
630	6,08	1,60	0,99
800	6,16	1,55	1,03
1000	5,51	1,51	1,03
1250	5,18	1,55	0,97
1600	4,60	1,45	1,01
2000	4,31	1,42	1,01
2500	3,56	1,35	0,99
3150	3,13	1,24	1,04
4000	2,67	1,18	1,01
5000	2,22	1,09	1,00

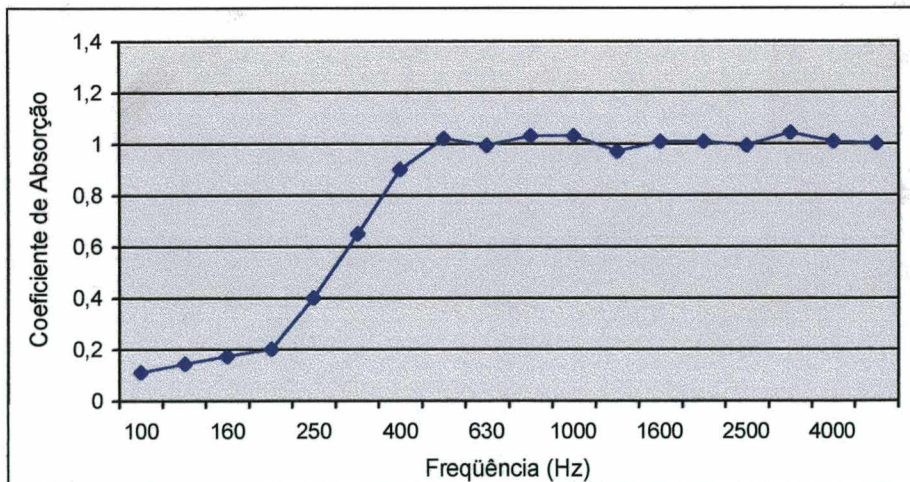
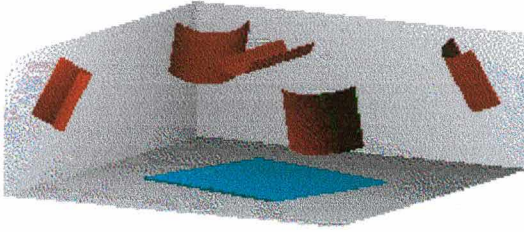


Figura 3.18 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores II



Configuração III :

4 Difusores Suspensos nos cantos
1 Difusor Suspenso no centro

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	18,14	9,41	0,11
125	17,17	8,88	0,12
160	13,59	7,17	0,14
200	13,30	6,46	0,17
250	11,71	5,03	0,24
315	7,82	3,84	0,28
400	6,33	2,07	0,70
500	5,99	1,63	0,96
630	6,54	1,72	0,92
800	6,26	1,62	0,98
1000	5,70	1,58	0,98
1250	5,54	1,55	1,00
1600	4,94	1,48	1,01
2000	4,54	1,42	1,04
2500	3,92	1,38	1,00
3150	3,43	1,30	1,03
4000	2,93	1,23	1,01
5000	2,36	1,12	1,01

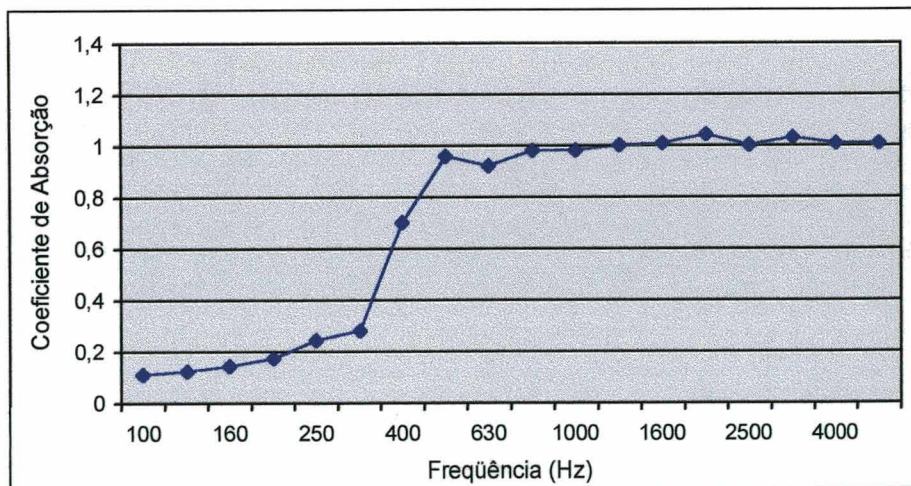
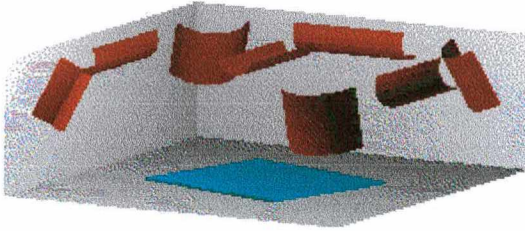


Figura 3.19 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores III



Configuração IV :

- 4 Difusores Suspensos nos cantos
- 3 Difusores Suspensos nas laterais
- 1 Difusor Suspenso no centro

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coeficiente Absorção
100	9,30	8,73	0,01
125	10,96	6,66	0,12
160	8,69	5,35	0,15
200	7,32	4,29	0,21
250	7,01	2,92	0,42
315	5,31	2,08	0,62
400	5,22	1,86	0,74
500	4,96	1,43	1,06
630	4,87	1,38	1,10
800	4,95	1,36	1,13
1000	4,79	1,39	1,09
1250	4,54	1,37	1,09
1600	4,03	1,30	1,10
2000	3,81	1,27	1,12
2500	3,31	1,22	1,10
3150	3,00	1,18	1,09
4000	2,60	1,12	1,07
5000	2,24	1,06	1,06

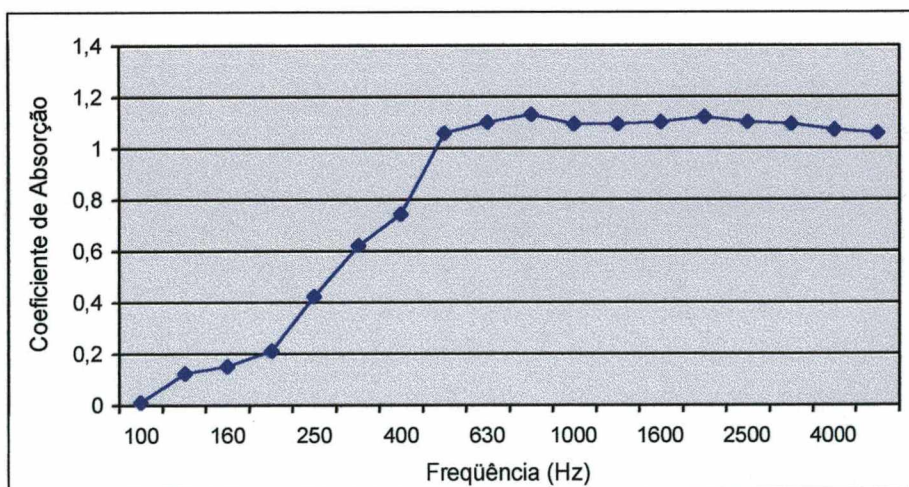
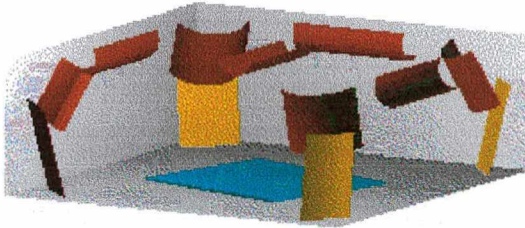


Figura 3.20 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores IV



Configuração V :

- 4 Difusores Suspensos nos cantos
- 3 Difusores Suspensos nas laterais
- 1 Difusor Suspenso no centro
- 4 Difusores Inclinados nos cantos

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	6,86	5,86	0,05
125	7,75	6,42	0,06
160	8,21	4,99	0,17
200	6,76	3,52	0,29
250	6,19	2,55	0,49
315	5,09	1,85	0,74
400	4,83	1,62	0,88
500	4,82	1,51	0,97
630	5,11	1,41	1,10
800	4,85	1,41	1,08
1000	4,71	1,32	1,17
1250	4,58	1,37	1,10
1600	4,21	1,36	1,07
2000	3,76	1,33	1,04
2500	3,27	1,20	1,13
3150	2,93	1,14	1,14
4000	2,45	1,05	1,16
5000	2,06	1,00	1,09

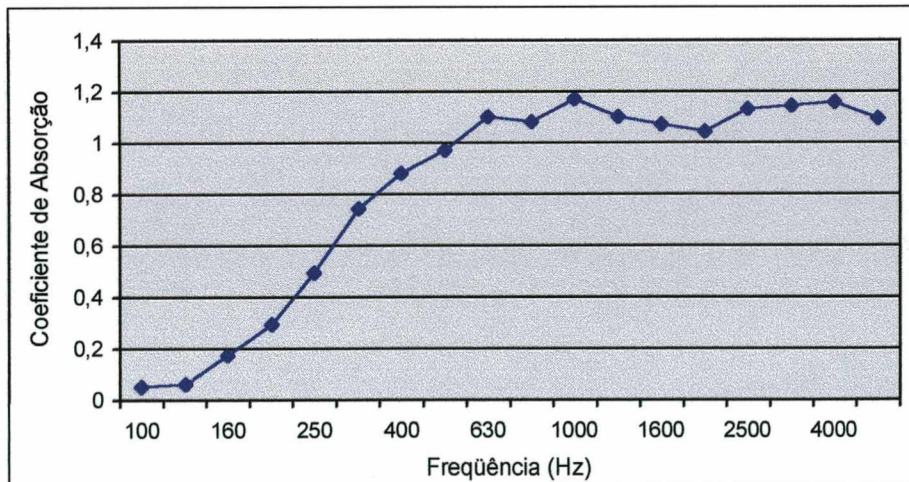
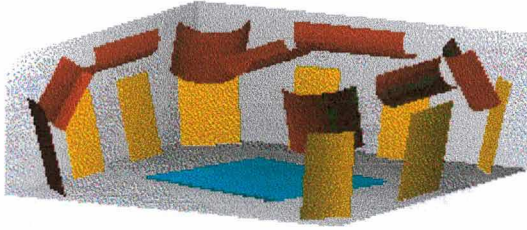


Figura 3.21 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores V



Configuração VI :

- 4 Difusores Suspensos nos cantos
- 3 Difusores Suspensos nas laterais
- 1 Difusor Suspenso no centro
- 4 Difusores Inclinados nos cantos
- 5 Difusores Inclinados nas laterais

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	4,86	4,17	0,07
125	6,60	3,92	0,22
160	6,61	4,27	0,18
200	5,48	3,26	0,27
250	5,38	2,66	0,41
315	4,53	1,74	0,76
400	4,20	1,63	0,81
500	4,23	1,46	0,96
630	4,47	1,34	1,12
800	4,42	1,30	1,17
1000	4,20	1,28	1,17
1250	4,02	1,32	1,09
1600	3,61	1,27	1,09
2000	3,34	1,23	1,10
2500	2,85	1,15	1,11
3150	2,57	1,08	1,14
4000	2,18	0,99	1,17
5000	1,84	0,95	1,09

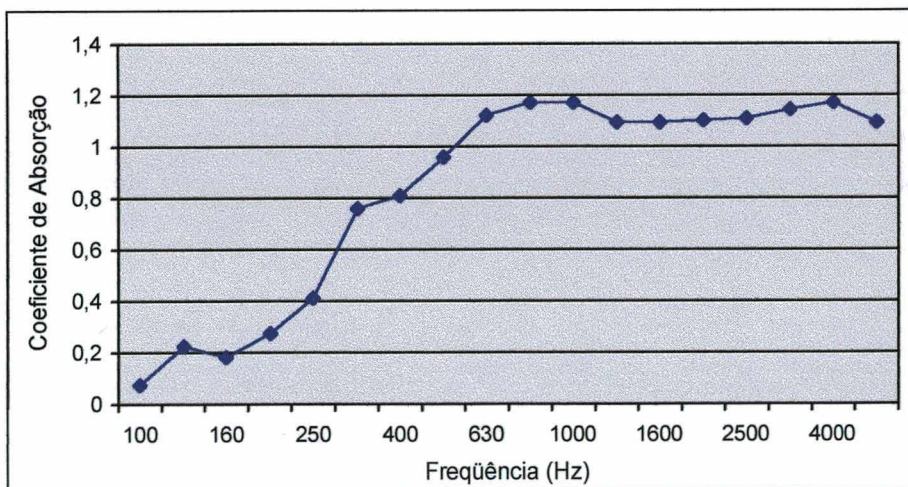
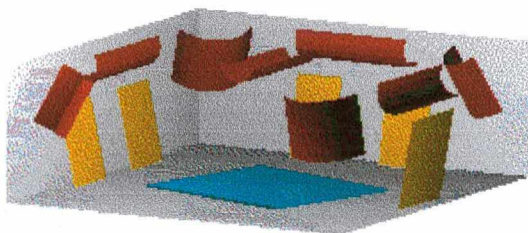


Figura 3.22 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores VI



Configuração VII :

- 4 Difusores Suspensos nos cantos
- 3 Difusores Suspensos nas laterais
- 1 Difusor Suspenso no centro
- 5 Difusores Inclinados nas laterais

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	8,54	7,55	0,03
125	7,52	6,05	0,07
160	6,54	4,27	0,17
200	6,05	3,53	0,25
250	5,60	2,44	0,50
315	4,66	2,04	0,59
400	4,44	1,69	0,79
500	4,70	1,49	0,98
630	4,77	1,34	1,15
800	4,46	1,32	1,15
1000	4,55	1,37	1,10
1250	4,35	1,37	1,07
1600	3,88	1,31	1,09
2000	3,60	1,27	1,09
2500	3,15	1,22	1,08
3150	2,79	1,13	1,12
4000	2,36	1,08	1,09
5000	2,00	0,97	1,14

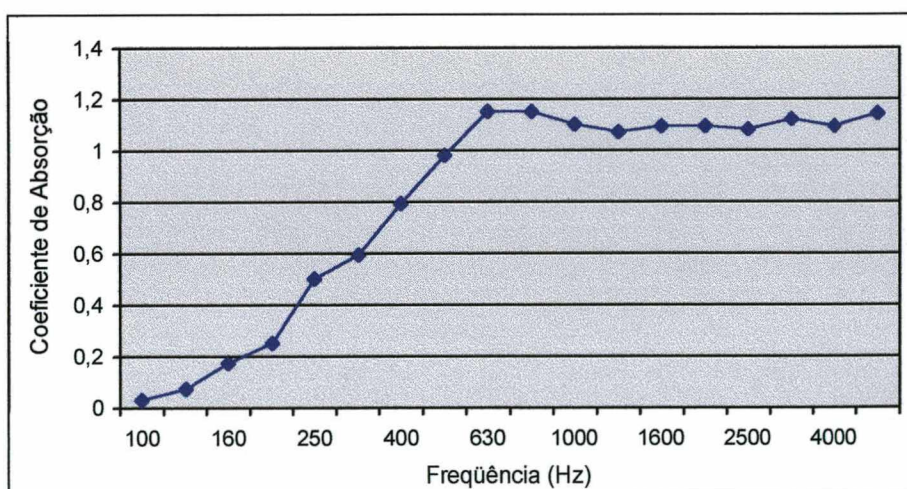
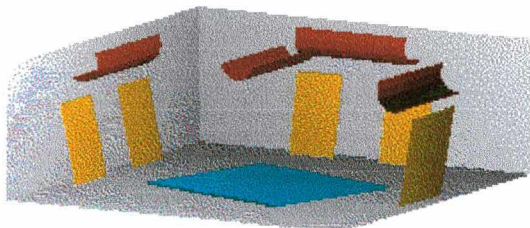


Figura 3.23 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores VII



Configuração VIII :

- 3 Difusores Suspensos nas laterais
- 1 Difusor Suspenso no centro
- 5 Difusores Inclinados nas laterais

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	9,69	8,23	0,04
125	9,07	7,30	0,06
160	8,16	4,87	0,18
200	7,54	4,11	0,24
250	6,20	2,91	0,39
315	5,36	2,45	0,47
400	5,39	2,15	0,60
500	5,11	1,80	0,77
630	5,01	1,73	0,81
800	5,18	1,67	0,87
1000	4,90	1,64	0,87
1250	4,80	1,57	0,92
1600	4,28	1,43	1,00
2000	4,01	1,46	0,93
2500	3,46	1,42	0,89
3150	3,04	1,34	0,90
4000	2,57	1,24	0,90
5000	2,13	1,12	0,91

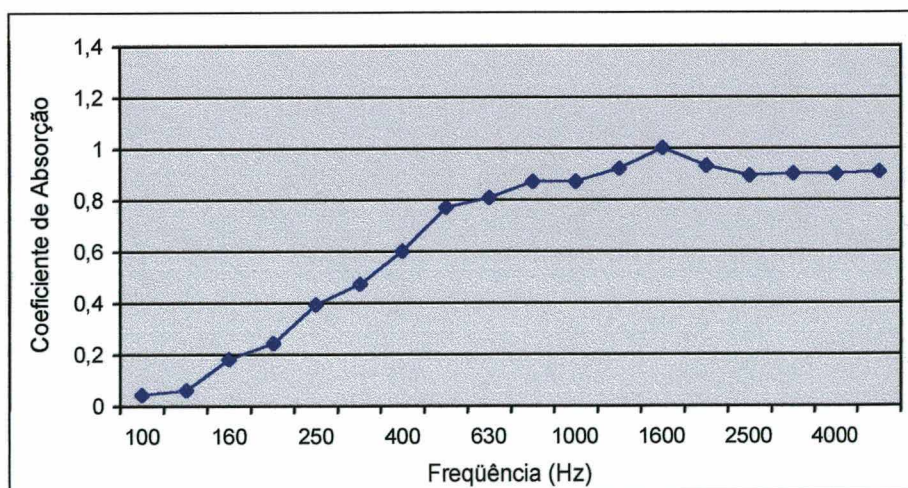
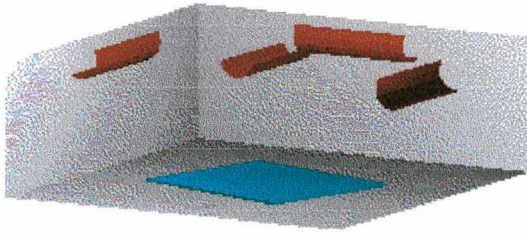


Figura 3.24 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores VIII



Configuração IX :

3 Difusores Suspensos nas laterais
1 Difusor Suspenso no centro

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	13,71	11,77	0,03
125	13,99	12,21	0,02
160	12,16	6,91	0,13
200	10,79	5,85	0,17
250	9,27	4,51	0,24
315	8,14	2,63	0,55
400	6,64	2,23	0,64
500	6,01	2,16	0,63
630	6,15	1,88	0,79
800	5,79	1,71	0,88
1000	5,52	1,67	0,90
1250	5,55	1,61	0,95
1600	4,94	1,53	0,97
2000	4,57	1,54	0,93
2500	3,91	1,49	0,89
3150	3,56	1,42	0,90
4000	2,96	1,35	0,87
5000	2,46	1,22	0,89

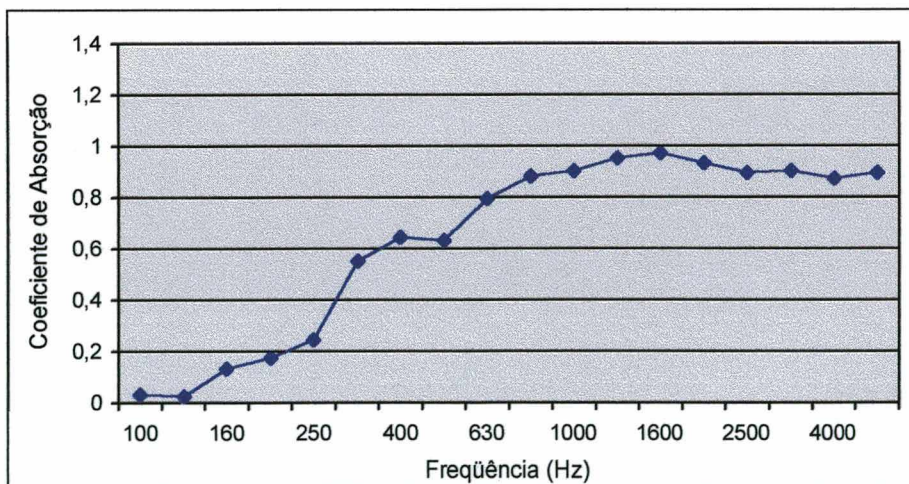
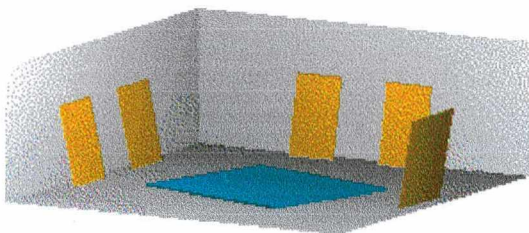


Figura 3.25 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores IX



Configuração X :

5 Difusores Inclinados nas laterais

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	14,16	9,33	0,08
125	12,32	10,52	0,03
160	13,06	8,61	0,08
200	11,79	6,31	0,16
250	10,67	3,94	0,34
315	7,98	2,94	0,46
400	7,66	2,29	0,66
500	6,74	2,18	0,66
630	6,46	2,35	0,58
800	6,23	2,27	0,60
1000	5,73	2,17	0,61
1250	5,33	2,02	0,66
1600	4,80	1,84	0,72
2000	4,45	1,70	0,78
2500	3,85	1,58	0,80
3150	3,45	1,53	0,78
4000	2,94	1,47	0,73
5000	2,45	1,32	0,75

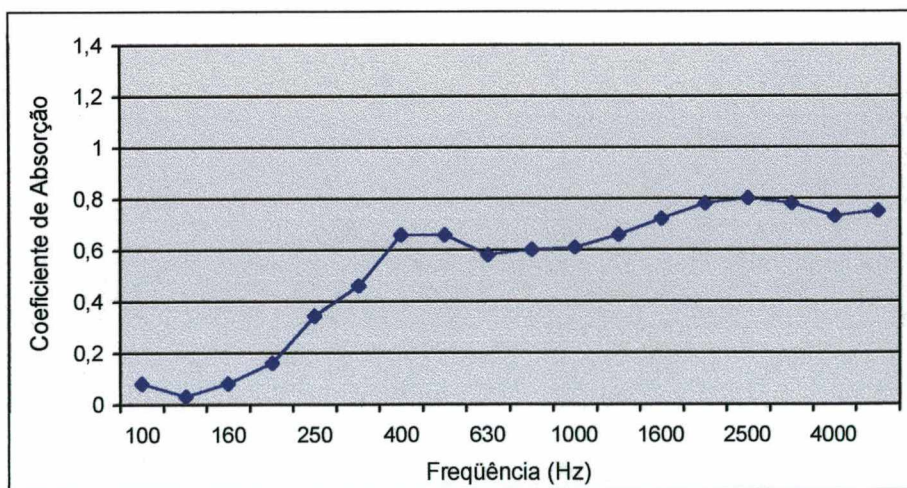
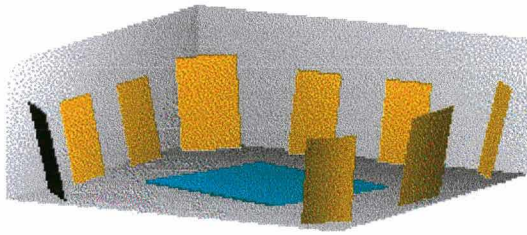


Figura 3.26 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores X



Configuração XI :

- 4 Difusores Inclinados nos cantos
- 5 Difusores Inclinados nas laterais

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	10,08	7,39	0,08
125	10,07	9,16	0,02
160	10,77	6,74	0,12
200	10,68	4,55	0,27
250	9,34	3,58	0,37
315	7,40	2,66	0,52
400	6,84	1,90	0,82
500	6,22	1,83	0,83
630	6,00	1,87	0,79
800	5,78	1,84	0,80
1000	5,33	1,82	0,78
1250	4,95	1,78	0,77
1600	4,41	1,65	0,81
2000	4,07	1,59	0,82
2500	3,46	1,47	0,84
3150	3,10	1,41	0,83
4000	2,64	1,30	0,83
5000	2,23	1,16	0,88

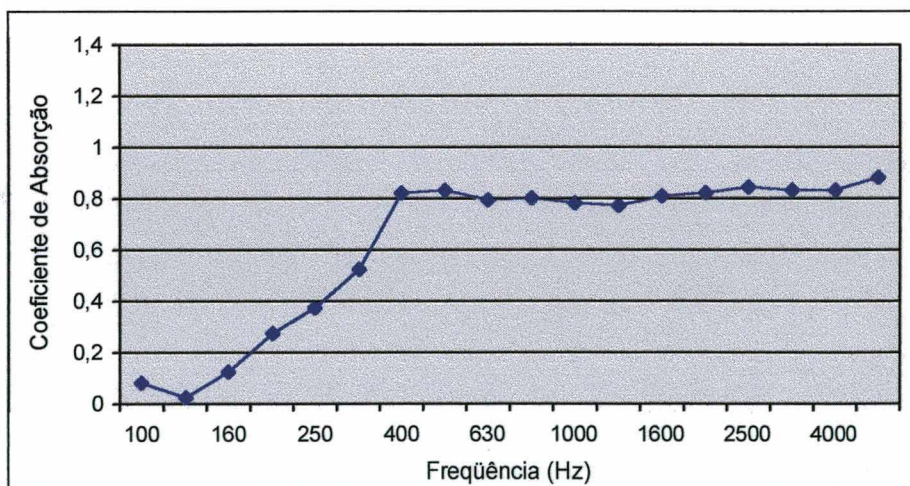
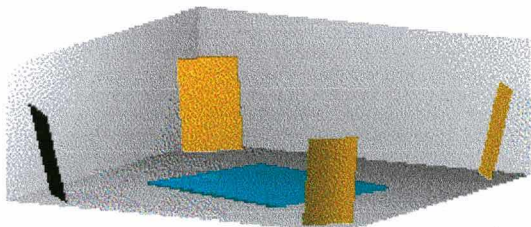


Figura 3.27 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores XI



Configuração XII :

4 Difusores Inclinados nos cantos

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coefficiente Absorção
100	14,69	8,02	0,12
125	20,33	10,82	0,09
160	15,13	7,84	0,13
200	13,99	5,68	0,22
250	13,05	4,12	0,36
315	8,97	2,80	0,53
400	8,30	2,12	0,75
500	7,53	2,02	0,78
630	7,22	1,83	0,88
800	6,79	1,92	0,80
1000	6,20	1,85	0,81
1250	5,82	1,82	0,81
1600	5,15	1,73	0,83
2000	4,72	1,68	0,82
2500	4,04	1,58	0,83
3150	3,57	1,48	0,85
4000	2,98	1,36	0,85
5000	2,48	1,27	0,82

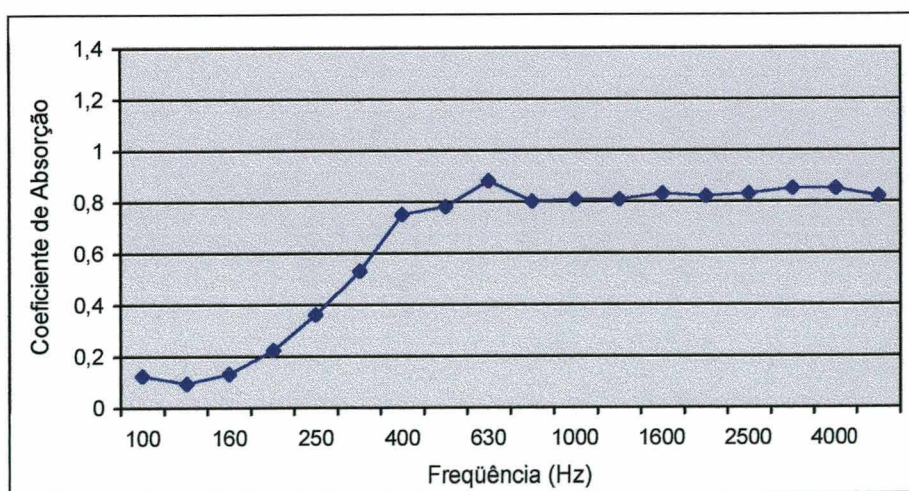


Figura 3.28 - Coeficientes de absorção sonora da amostra de referência para câmara reverberante com configuração de difusores XII

Abaixo são apresentados na Figura 3.29 os valores de coeficiente de absorção da amostra de referência medidos nas 12 configurações de difusores.

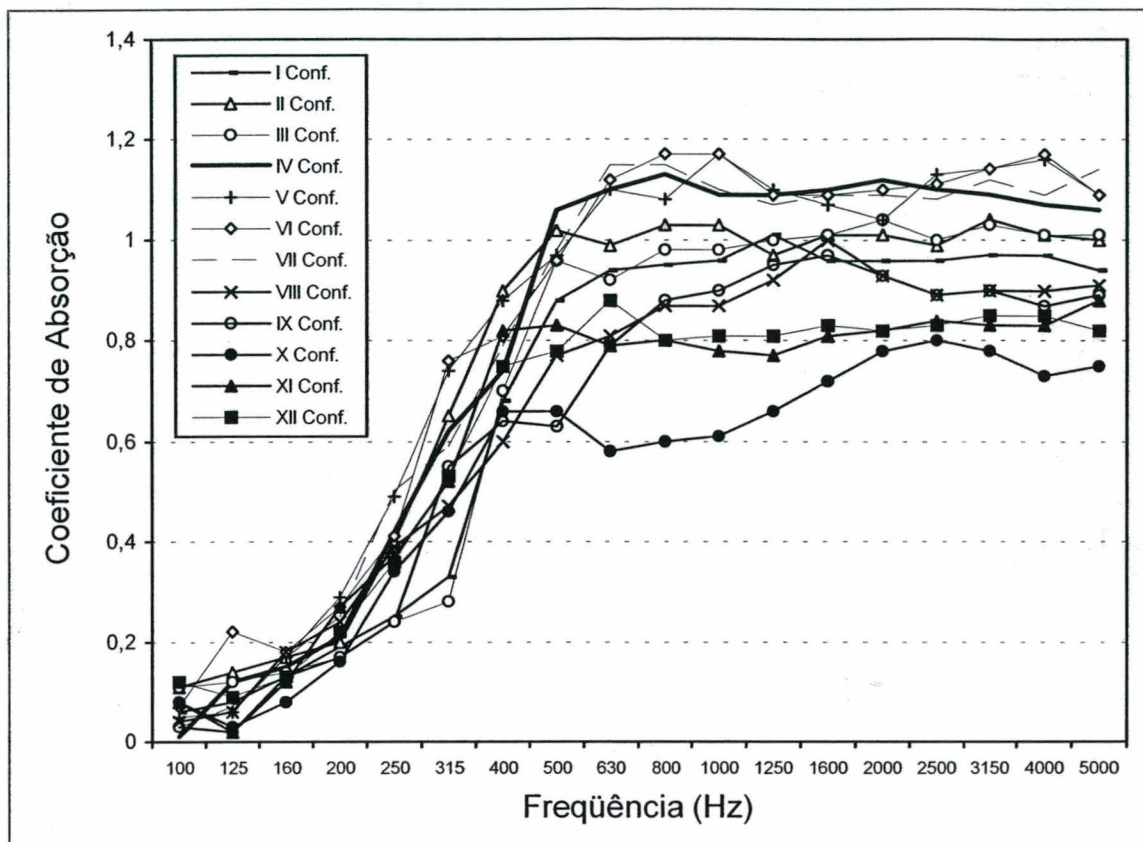


Figura 3.29 - Coeficientes de absorção sonora, em função da frequência, para as 12 configurações de difusores

Analisando-se o desempenho dos dois tipos de difusores nas diversas disposições pela câmara, observa-se que os quatro difusores suspensos posicionados nos cantos são os de maior relevância na difusividade do campo. Verifica-se pela curva de coeficiente de absorção da configuração de difusores I, que esta, com apenas 4 difusores, já obteve um nível de coeficiente próximo ao patamar de estabilização. Comprovando esta afirmação, observa-se que a curva do coeficiente da configuração IX (difusores suspensos laterais e central) tem valores muitos baixos e de forma irregular ao longo do espectro; mesmo para a configuração VIII, esta com todos os difusores laterais (tanto suspensos como inclinados) e o central suspenso, há valores baixos de coeficiente. Também, nota-se, pela curva da configuração II, que o acréscimo dos 4 difusores inclinados colocados nos cantos, junto com os quatro difusores suspensos, tiveram pouca influência na curva do coeficiente.

Outra análise importante é o baixo desempenho dos difusores inclinados. Examinando os valores de coeficiente das configurações X, XI e XII, apenas com difusores inclinados, verifica-se que estes encontram-se (nas médias e altas frequências) na faixa próxima a 0,8, valor este bem menor que o do patamar.

A análise mais importante a ser feita para as diversas configurações avaliadas é determinar a melhor configuração de difusores. Analisando a Figura 3.29, observa-se que há quatro curvas situadas no nível de patamar, correspondentes às configurações IV, V, VI e VII.

Como as quatro configurações possuem valores semelhantes entre si, pode-se afirmar que elas têm semelhante eficiência no processo de difusão do campo sonoro. Pelo princípio da estabilização do coeficiente de absorção, mencionado na norma ISO 354 (1985), a melhor configuração de difusores será aquela que, com menor quantidade, atingir primeiro o nível de estabilização do coeficiente. Como a configuração IV é a configuração com menor número de difusores (apenas 8 difusores suspensos) e as configurações V, VI e VII uma associação entre difusores suspensos e inclinados, pode-se afirmar que a configuração IV é a que, dentre as doze, melhor atende as necessidades de difusividade e funcionalidade no campo sonoro da câmara reverberante em estudo.

Na Figura 3.30 é mostrada a curva de coeficiente da configuração IV juntamente com os valores medidos nos outros 5 laboratórios, já descritos no item 3.1.1.

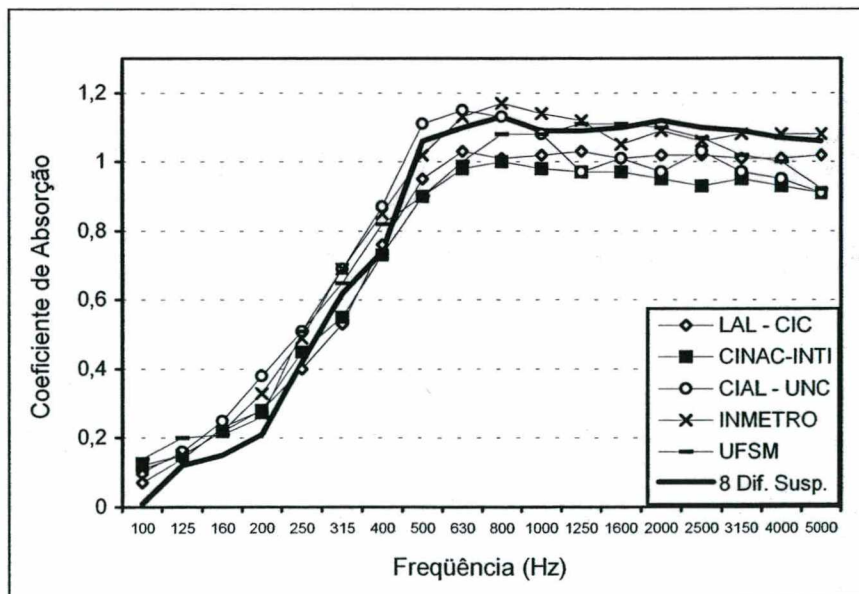


Figura 3.30 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora medidos na câmara com 8 difusores suspensos, com os outros 5 laboratórios.

3.2.6 Repetibilidade do Método

A repetibilidade é determinada pela realização de repetidos ensaios em um pequeno intervalo de tempo, com a mesma amostra, seguindo os procedimentos especificados na norma ISO 354 (1985), como executada no laboratório (usando o mesmo número de posições de microfone, excitação da câmara, registro das curvas de decaimento e a mesma avaliação do tempo de reverberação para cada ensaio).

Para a determinação da repetibilidade, 5 medições do coeficiente de absorção sonora da amostra de referência foram realizadas em pequenos intervalos de tempo na câmara reverberante contendo 8 difusores suspensos. Os resultados do cálculo dos valores de "r" são mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Repetibilidade do coeficiente de absorção sonora

Frequência (Hz)	1 ^a medição	2 ^a medição	3 ^a medição	4 ^a medição	5 ^a medição	" r "
100	0,04	0,03	0,00	0,06	0,00	0,105
125	0,12	0,11	0,12	0,15	0,12	0,065
160	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15	0,034
200	0,24	0,21	0,17	0,20	0,21	0,112
250	0,43	0,40	0,42	0,43	0,45	0,066
315	0,62	0,62	0,62	0,60	0,64	0,058
400	0,77	0,71	0,73	0,75	0,73	0,095
500	0,99	1,07	1,09	1,08	1,07	0,156
600	1,16	1,12	1,09	1,04	1,11	0,172
800	1,19	1,11	1,11	1,14	1,10	0,147
1000	1,10	1,12	1,13	1,04	1,05	0,155
1250	1,13	1,07	1,08	1,08	1,07	0,110
1600	1,11	1,10	1,09	1,11	1,09	0,031
2000	1,14	1,13	1,12	1,08	1,13	0,090
2500	1,11	1,10	1,07	1,13	1,08	0,101
3150	1,09	1,09	1,11	1,08	1,09	0,047
4000	1,05	1,08	1,06	1,09	1,08	0,068
5000	1,08	1,04	1,05	1,07	1,05	0,062

CAPÍTULO 4

DIFUSIVIDADE DO CAMPO SONORO NA CÂMARA REVERBERANTE

Com a configuração de difusores definida no Capítulo 3, o próximo passo é avaliar experimentalmente o campo sonoro da câmara reverberante e assim, verificar o nível de difusividade alcançado no ambiente estudado.

Como descrito na revisão bibliográfica, existem muitas formas de avaliar a difusividade de um campo sonoro de uma câmara reverberante. Para este trabalho foram escolhidos três métodos: estabilização da curva de coeficiente de absorção sonora de um material absorvedor (recomendado pela norma ISO 354 (1985) Anexo A), distribuição espacial do nível de pressão sonora e densidade modal.

Posteriormente é calculada a frequência de corte de Schroeder, adicionando a avaliação da câmara, este critério comumente utilizado.

4.1 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

A Norma ISO 354 (1985) indica um método para se avaliar a difusividade do campo sonoro em câmara reverberante, através do qual são acrescentados difusores à câmara em quantidades aproximadas de 5 m^2 . A cada configuração de difusores é feita a medição do coeficiente de absorção de um material absorvedor. Será visto que o coeficiente de absorção sonora médio aproxima-se de um valor máximo e permanece constante, mesmo com o aumento do número de difusores. Segundo a norma, no momento em que a curva

característica de coeficiente de absorção do material se estabilizar, estará indicado que o campo sonoro é difuso e que a configuração de difusores, para qual a curva se estabilizou, é a adequada e suficiente para a câmara em estudo.

Sendo assim, foi determinado o coeficiente de absorção da amostra de referência, para a câmara contendo três configurações de crescentes quantidades de difusores suspensos:

- Câmara com 4 difusores suspensos
- Câmara com 8 difusores suspensos
- Câmara com 10 difusores suspensos

Os valores dos coeficientes de absorção de cada configuração são mostrados na Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3, respectivamente. As curvas dos coeficientes de absorção das três medições são mostradas na Figura 4.4.

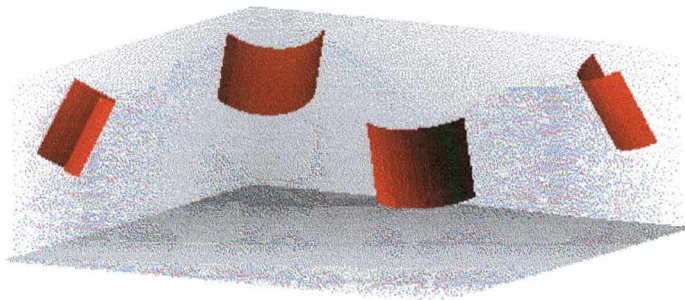


Figura 4.1 - Câmara com 4 difusores suspensos

Tabela 4.1 - Coeficiente de Absorção para câmara com 4 difusores suspensos

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coeficiente Absorção
500	7,17	1,83	0,88
630	7,07	1,73	0,94
800	6,63	1,69	0,95
1000	5,99	1,63	0,96
1250	5,74	1,55	1,01
1600	5,11	1,55	0,96
2000	4,67	1,52	0,96
2500	3,96	1,42	0,96
3150	3,47	1,35	0,97
4000	2,89	1,25	0,97

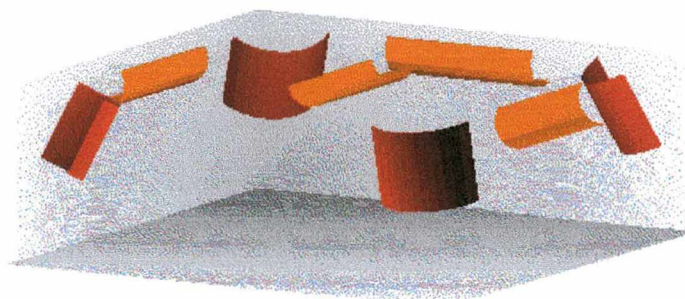


Figura 4.2 - Câmara com 8 difusores suspensos

Tabela 4.2 - Coeficiente de Absorção para câmara com 8 difusores suspensos

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coeficiente Absorção
500	4,96	1,43	1,06
630	4,87	1,38	1,10
800	4,95	1,36	1,13
1000	4,79	1,39	1,09
1250	4,54	1,37	1,09
1600	4,03	1,30	1,10
2000	3,81	1,27	1,12
2500	3,31	1,22	1,10
3150	3,00	1,18	1,09
4000	2,60	1,12	1,07

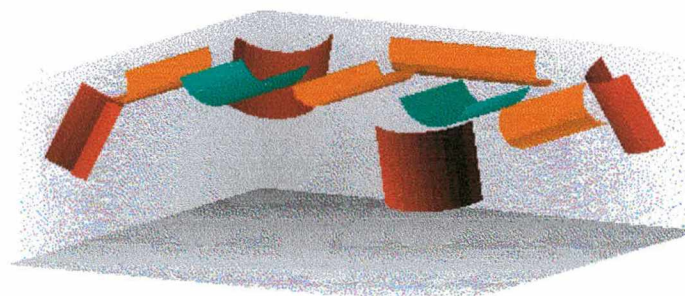


Figura 4.3 - Câmara com 10 difusores suspensos

Tabela 4.3 - Coeficiente de Absorção para câmara com 10 difusores suspensos

Freq. (Hz)	TR (s) s/ amostra	TR (s) c/ amostra	Coeficiente Absorção
500	4,38	1,49	0,94
630	4,41	1,34	1,10
800	4,59	1,34	1,11
1000	4,45	1,30	1,15
1250	4,27	1,34	1,08
1600	3,86	1,30	1,07
2000	3,56	1,24	1,12
2500	3,14	1,20	1,09
3150	2,88	1,16	1,09
4000	2,48	1,10	1,07

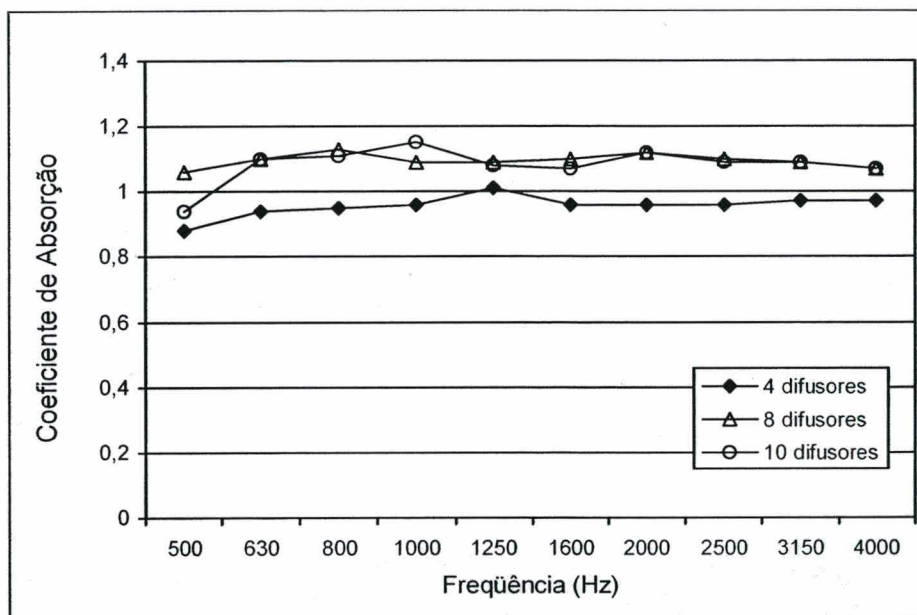


Figura 4.4 - Estabilização da curva de coeficiente de absorção em função do número de difusores

Pelos coeficientes de absorção mostrados na Figura 4.4, observa-se que houve um aumento dos valores de coeficiente da configuração de 4 difusores para a configuração com 8 difusores. Este aumento nos coeficientes de absorção não mais ocorreu quando do acréscimo de 2 difusores aos oito existentes. Este fato demonstra, pelo critério da norma ISO 354, que houve uma estabilização nos valores de coeficiente de absorção e, por conseguinte, que a câmara reverberante

contendo os 8 difusores suspensos possui uma boa difusividade do campo sonoro.

4.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

A distribuição espacial do nível de pressão sonora, também conhecida e referida por SCHULTZ (1971) e NÉLISSE e NICOLAS (1997) como uniformidade espacial de pressão, é um método pelo qual avalia-se a difusividade (ou uniformidade, um dos conceitos de difusão) do campo sonoro em câmara reverberante.

Para a avaliação do campo em estudo foram locados 20 pontos, distribuídos aleatoriamente pelo volume da câmara, para a medição dos níveis de pressão sonora. Metade destes pontos foram posicionados a uma altura de 1,20 m e o restante a 1,50m. As posições dos pontos são mostradas na Figura 4.5 e listadas na Tabela 4.4.

Os níveis de pressão sonora foram medidos para a câmara com 8 difusores suspensos e sem difusores. Dos níveis medidos, são calculados os desvios padrão para cada banda de frequência, mostrados a seguir na Tabela 4.5 e Figura 4.6 para a câmara sem difusores e na Tabela 4.6 e Figura 4.7 para a câmara com difusores.

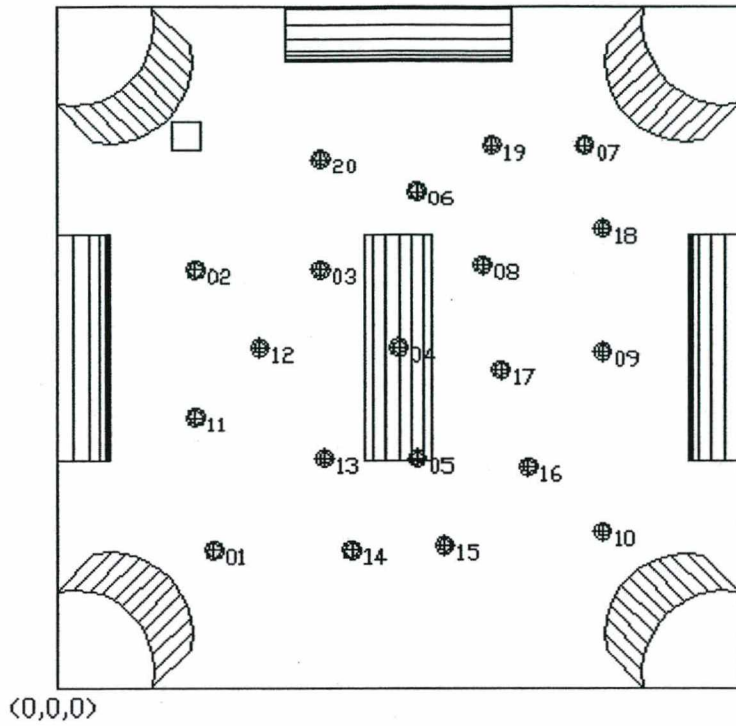


Figura 4.5 - Distribuição dos pontos de medição do NPS

Tabela 4.4 - Coordenadas Cartesianas dos pontos de medição do NPS

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1,70	1,50	1,20
2	1,50	4,54	1,20
3	2,85	4,54	1,20
4	3,695	3,695	1,20
5	3,895	2,495	1,20
6	3,89	5,39	1,20
7	5,69	5,89	1,20
8	4,59	4,59	1,20
9	5,89	3,65	1,20
10	5,89	1,70	1,20
11	1,50	2,94	1,50
12	2,195	3,695	1,50
13	2,895	2,495	1,50
14	3,19	1,50	1,50
15	4,19	1,55	1,50
16	5,09	2,40	1,50
17	4,79	3,45	1,50
18	5,89	4,99	1,50
19	4,69	5,89	1,50
20	2,85	5,74	1,50
Fonte Sonora	1,20	6,19	0,00

Tabela 4.5 - Desvio Padrão dos NPS medidos na câmara reverberante sem difusores

Frequência (Hz)	Média do NPS (dB) para os 20 pontos	Desvio Padrão
100	71,02	4,04
125	76,67	2,14
160	74,39	1,52
200	73,20	1,43
250	70,52	1,76
315	69,49	1,34
400	68,63	1,31
500	70,59	1,01
630	72,72	0,84
800	75,08	0,72
1000	74,44	0,74
1250	71,61	0,54
1600	71,44	0,34
2000	67,80	0,31
2500	67,66	0,31
3150	67,41	0,29
4000	66,96	0,29
5000	66,45	0,29

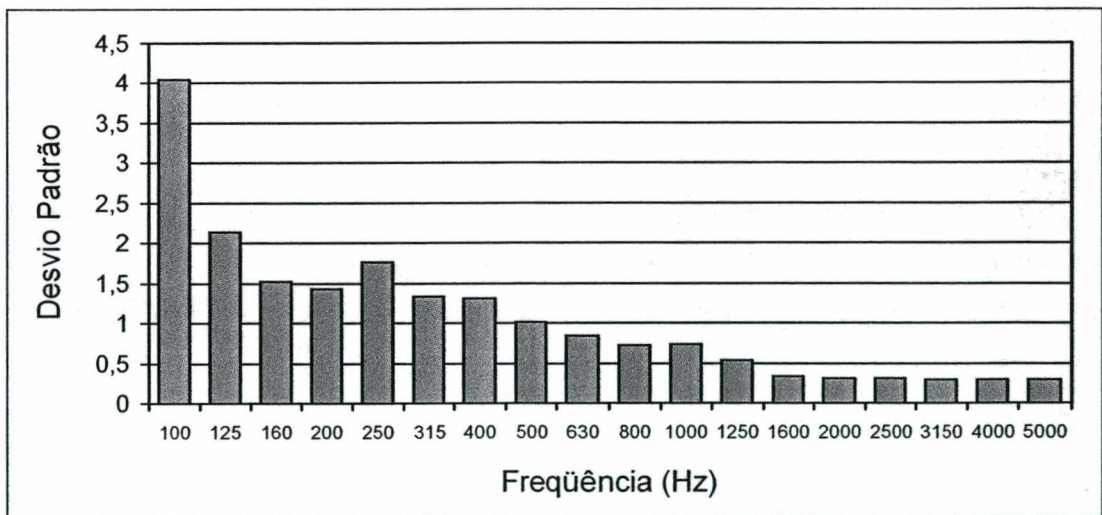


Figura 4.6 - Desvio Padrão em função da frequência da Distribuição Especial do NPS na câmara reverberante sem difusores

Tabela 4.6 - Desvio Padrão dos NPS medidos na câmara reverberante com difusores

Freqüência (Hz)	Média do NPS (dB) para os 20 pontos	Desvio Padrão
100	62,28	2,34
125	69,49	2,35
160	69,59	1,74
200	68,03	1,39
250	64,54	1,45
315	64,42	1,08
400	63,38	1,10
500	66,11	0,69
630	68,61	0,68
800	71,06	0,57
1000	70,40	0,77
1250	67,70	0,74
1600	67,46	0,79
2000	63,89	0,87
2500	63,75	0,81
3150	63,66	0,95
4000	63,37	0,98
5000	62,79	0,97

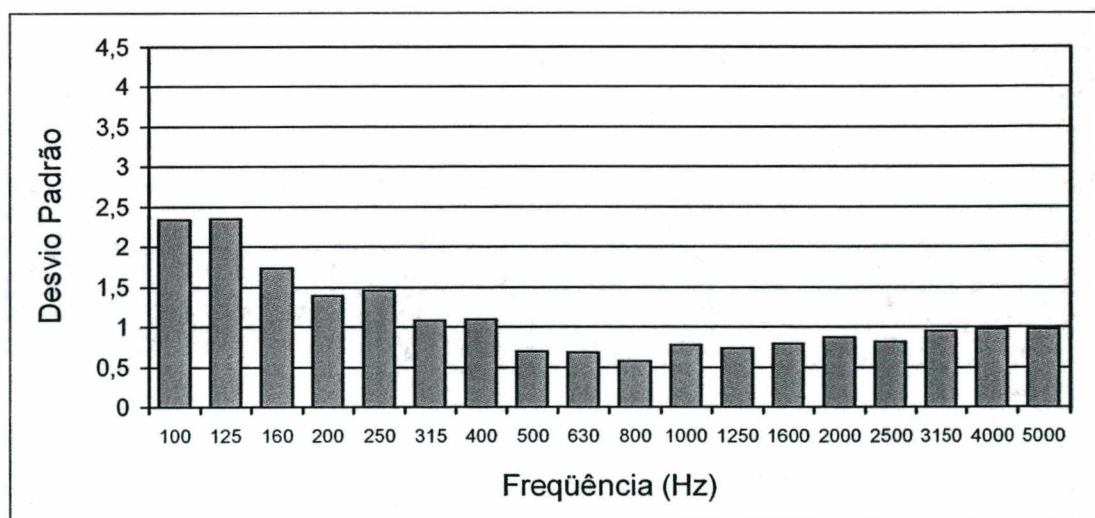


Figura 4.7 - Desvio Padrão em função da freqüência da Distribuição Especial do NPS na câmara reverberante com difusores

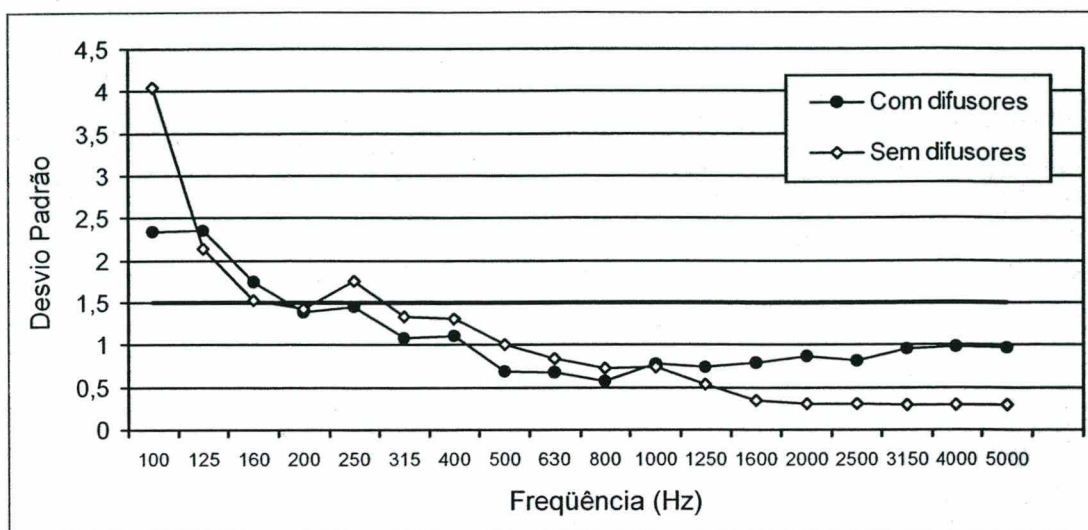


Figura 4.8 - Desvios Padrão do NPS em função da frequência para câmara com e sem difusores

NÉLISSE e NICOLAS (1997) comentam que uma câmara reverberante é considerada como tendo um campo acústico qualificado e uma adequada difusividade se o desvio padrão σ da uniformidade espacial de pressão permanecer abaixo de 1,5. Analisando-se a Figura 4.8 observa-se que a câmara reverberante sem difusores é qualificada, por este critério, a partir da frequência de 315 Hz. Já a câmara contendo os 8 difusores suspensos é considerada qualificada a partir da frequência de 160 Hz.

Também pela Figura 4.8 observa-se que, devido ao acréscimos dos difusores, houve uma diminuição de σ nas baixas frequências resultando numa melhora da difusividade; nas altas frequências houve um pequeno aumento de σ , mantendo-se menor que 1,5, talvez devido a uma direcionalidade das ondas sonoras de menor comprimento de onda.

4.3 DENSIDADE MODAL

Uma das formas de se estudar o comportamento acústico de uma sala é através da análise modal. Segundo GERGES (1992), na análise modal,

uma sala pode ser tratada como um ressonador complexo, tendo vários modos acústicos, cada um com sua frequência característica de ressonância livre e de amortecimento.

A expressão para uma onda plana dentro de uma sala retangular com dimensões L_x , L_y , L_z é dada por:

$$\underline{p} = \underline{A} e^{i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)} \quad (4.1)$$

As constantes k_x , k_y e k_z são dadas por:

$$k = \frac{\omega}{c} = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2} \quad (4.2)$$

onde k_x/k , k_y/k e k_z/k representam as direções da onda em relação aos eixos x , y e z .

Em geral há oito ondas, simultaneamente, na equação (4.1), com todas as combinações possíveis dos sinais de x , y e z . Então, a equação geral da pressão dentro de uma sala é a soma das oito ondas planas, dada por:

$$p = A \cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) e^{i\omega t} \quad (4.3)$$

As combinações de contorno para a sala retangular com paredes rígidas (absorção zero) são velocidade de partícula nulas nas paredes, isto é:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{i\omega\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = 0 && \text{para } x = 0 \text{ e } x = L_x \\ v &= -\frac{1}{i\omega\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} = 0 && \text{para } y = 0 \text{ e } y = L_y \\ w &= -\frac{1}{i\omega\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} = 0 && \text{para } z = 0 \text{ e } z = L_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

Substituindo-se a equação (4.3) em (4.4), tem-se:

Sendo $\text{sen}(k_x \cdot L_x) = \text{sen}(k_y \cdot L_y) \text{sen}(k_z \cdot L_z)$

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \quad \text{onde } n_x = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$k_y = \frac{n_y \pi}{L_y} \quad \text{onde } n_y = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.5)$$

$$k_z = \frac{n_z \pi}{L_z} \quad \text{onde } n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Portanto, a freqüência característica de cada modo acústico tem três componentes, sendo dada por:

$$f = \frac{w}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (4.6)$$

As ondas estacionárias em salas retangulares são de três tipos:

- 1) Grupo de ondas axiais onde dois dos n são zeros; a onda se move paralela ao eixo x ou y ou z .
- 2) Grupo de ondas tangenciais para as quais um dos n é zero; estas se movem paralelas a um plano (xy ou yz ou zx).
- 3) Grupo de ondas oblíquas para as quais nenhum n é zero; a onda de move nas três direções (x , y e z).

A equação (4.3) indica que a amplitude da pressão sonora de todas as ondas em uma sala retangular será máxima no canto da sala. Portanto, se a fonte estiver no canto, será possível excitar todos os modos em sua extensão completa. Analogamente, se o microfone estiver no canto, estar-se-á medindo os picos de pressão sonora de todos os modos excitados. Em contraste, se a fonte estiver numa posição de pressão nula, esse modo não será excitado.

GERGES (1992) atenta para o fato de que, pela equação (4.6), observa-se que cada frequência de ressonância f pode ser considerada como um vetor no espaço de frequências com componentes $n_x c/2L_x$, $n_y c/2L_y$ e $n_z c/2L_z$. Cada ponto no diagrama do espaço de frequências, na Figura 4.9, representa um modo característico da sala. Portanto, pode-se obter o número N de modos normais abaixo da frequência f através de:

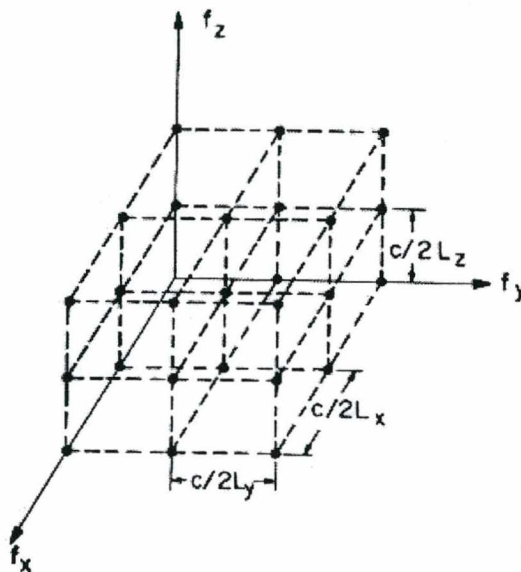


Figura 4.9 - Distribuição de frequências no espaço

$$N = \frac{\text{Volume de um oitavo de esfera de raio } f}{\text{Volume de um bloco retangular } (c/2L_x, c/2L_y, c/2L_z)}$$

ou
$$N = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 \tag{4.7}$$

Para obter-se uma forma mais correta que a equação 4.7 deve-se, também, levar em consideração os modos tangenciais (em qualquer plano) e os modos axiais (em qualquer eixo), resultando em:

$$N = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 + \frac{\pi S}{4c^2} f^2 + \frac{L}{8c} f \tag{4.8}$$

onde: S é a área da superfície das paredes, $S = 2(L_x L_y + L_y L_z + L_z L_x)$
 L é a soma dos comprimentos das arestas da sala, $L = 4(L_x + L_y + L_z)$

Tabela 4.7 Frequências de Ressonância teóricas da câmara reverberante em estudo calculadas de acordo com a equação (4.6)

Nx	Ny	Nz	Freq. (Hz)
0	1	0	23,2
1	0	0	23,2
1	1	0	32,8
0	2	0	46,4
2	0	0	46,4
1	2	0	51,9
2	1	0	51,9
0	0	1	65,0
2	2	0	65,6
0	1	1	69,0
1	0	1	69,0
0	3	0	69,6
3	0	0	69,6
1	1	1	72,8
1	3	0	73,4
3	1	0	73,4
0	2	1	79,8
2	0	1	79,8
1	2	1	83,1
2	1	1	83,1
2	3	0	83,7
3	2	0	83,7
2	2	1	92,4
0	4	0	92,8
4	0	0	92,8
0	3	1	95,2
3	0	1	95,2
1	4	0	95,7
4	1	0	95,7
1	3	1	98,0
3	1	1	98,0
3	3	0	98,5
2	4	0	103,8
4	2	0	103,8
2	3	1	105,9
3	2	1	105,9
0	4	1	113,3
4	0	1	113,3
1	4	1	115,7
4	1	1	115,7
3	4	0	116,0

4	3	0	116,0
0	5	0	116,0
5	0	0	116,0
3	3	1	118,0
1	5	0	118,3
5	1	0	118,3
2	4	1	122,4
4	2	1	122,4
2	5	0	125,0
5	2	0	125,0
0	0	2	129,9
4	4	0	131,3
0	1	2	132,0
1	0	2	132,0
0	5	1	133,0
3	4	1	133,0
4	3	1	133,0
5	0	1	133,0
1	1	2	134,0
1	5	1	135,0
5	1	1	135,0
3	5	0	135,3
5	3	0	135,3
0	2	2	138,0
2	0	2	138,0
0	6	0	139,2
6	0	0	139,2
1	2	2	139,9
2	1	2	139,9
2	5	1	140,8
5	2	1	140,8
1	6	0	141,2
6	1	0	141,2
2	2	2	145,6
4	4	1	146,5
2	6	0	146,8
6	2	0	146,8
0	3	2	147,4
3	0	2	147,4
4	5	0	148,6
5	4	0	148,6
1	3	2	149,2
3	1	2	149,2
3	5	1	150,1
5	3	1	150,1
0	6	1	153,7
6	0	1	153,7
2	3	2	154,5

3	2	2	154,5
1	6	1	155,4
6	1	1	155,4
3	6	0	155,7
6	3	0	155,7
0	4	2	159,7
4	0	2	159,7
2	6	1	160,5
6	2	1	160,5
1	4	2	161,4
4	1	2	161,4
4	5	1	162,2
5	4	1	162,2
0	7	0	162,4
7	0	0	162,4
3	3	2	163,0
1	7	0	164,1
7	1	0	164,1
5	5	0	164,1
2	4	2	166,3
4	2	2	166,3
4	6	0	167,3
6	4	0	167,3
3	6	1	168,7
6	3	1	168,7
2	7	0	168,9
7	2	0	168,9
0	5	2	174,2
3	4	2	174,2
4	3	2	174,2
5	0	2	174,2
0	7	1	175,0
7	0	1	175,0
1	5	2	175,7
5	1	2	175,7
1	7	1	176,5
5	5	1	176,5
7	1	1	176,5
3	7	0	176,7
7	3	0	176,7
4	6	1	179,5
6	4	1	179,5
2	5	2	180,3
5	2	2	180,3
2	7	1	181,0
7	2	1	181,0
5	6	0	181,3
6	5	0	181,3

4	4	2	184,7
0	8	0	185,7
8	0	0	185,7
1	8	0	187,1
4	7	0	187,1
7	4	0	187,1
8	1	0	187,1
3	5	2	187,6
5	3	2	187,6
3	7	1	188,3
7	3	1	188,3
0	6	2	190,4
6	0	2	190,4
2	8	0	191,4
8	2	0	191,4
1	6	2	191,9
6	1	2	191,9
5	6	1	192,5
6	5	1	192,5
0	0	3	194,9
2	6	2	196,0
6	2	2	196,0
0	1	3	196,3
1	0	3	196,3
0	8	1	196,7
8	0	1	196,7
6	6	0	196,9
4	5	2	197,4
5	4	2	197,4
1	1	3	197,6
1	8	1	198,1
4	7	1	198,1
7	4	1	198,1
8	1	1	198,1
3	8	0	198,3
8	3	0	198,3
5	7	0	199,6
7	5	0	199,6
0	2	3	200,3
2	0	3	200,3
1	2	3	201,7
2	1	3	201,7
2	8	1	202,1
8	2	1	202,1
3	6	2	202,8
6	3	2	202,8
2	2	3	205,6
0	3	3	206,9

3	0	3	206,9
6	6	1	207,4
4	8	0	207,6
8	4	0	207,6
0	7	2	208,0
7	0	2	208,0
1	3	3	208,2
3	1	3	208,2
3	8	1	208,7
8	3	1	208,7
0	9	0	208,9
9	0	0	208,9
1	7	2	209,3
7	1	2	209,3
5	5	2	209,3
5	7	1	209,9
7	5	1	209,9
1	9	0	210,1
9	1	0	210,1
4	6	2	211,9
6	4	2	211,9
2	3	3	212,1
3	2	3	212,1
2	7	2	213,1
7	2	2	213,1
2	9	0	214,0
6	7	0	214,0
7	6	0	214,0
9	2	0	214,0
0	4	3	215,9
4	0	3	215,9
1	4	3	217,1
4	1	3	217,1
4	8	1	217,5
8	4	1	217,5
3	3	3	218,3
0	9	1	218,7
9	0	1	218,7
5	8	0	218,9
8	5	0	218,9
3	7	2	219,4
7	3	2	219,4
1	9	1	220,0
9	1	1	220,0
3	9	0	220,2

9	3	0	220,2
2	4	3	220,8
4	2	3	220,8
5	6	2	223,0
6	5	2	223,0
2	9	1	223,6
6	7	1	223,6
7	6	1	223,6
9	2	1	223,6
0	8	2	226,6
8	0	2	226,6
0	5	3	226,8
3	4	3	226,8
4	3	3	226,8
5	0	3	226,8
1	8	2	227,8
4	7	2	227,8
7	4	2	227,8
8	1	2	227,8
1	5	3	228,0
5	1	3	228,0
5	8	1	228,4
8	5	1	228,4
4	9	0	228,6
9	4	0	228,6
3	9	1	229,5
9	3	1	229,5
7	7	0	229,7
2	8	2	231,3
8	2	2	231,3
2	5	3	231,5
5	2	3	231,5
6	8	0	232,1
8	6	0	232,1
0	10	0	232,1
10	0	0	232,1

NÉLISSE e NICOLAS (1997) também recomendam uma densidade modal mínima para caracterizar um campo sonoro difuso. Eles mencionam que uma câmara reverberante é considerada como tendo um campo sonoro difuso se houver pelo menos 20 a 30 modos na largura de banda de medição.

Como a câmara reverberante têm formato retangular e paredes planas, o equacionamento da teoria modal descrito anteriormente torna-se válido para o caso em estudo. Sendo assim, a análise da densidade modal do campo acústico da câmara sem difusores é realizada aplicando as equações 4.6 e 4.8.

Pelos resultados mostrados na Tabela 4.8, observa-se que a densidade modal calculada para a câmara reverberante alcança um valor maior que 30 a partir da banda de terça de oitava de 125 Hz, satisfazendo a partir desta frequência a condição de difusividade.

Tabela 4.8 - Densidade Modal calculada em bandas de terça de oitava

Frequência (Hz)	Número de modos (equação 4.6)	Número de modos (equação 4.8)
5,6 - 7,1	0	0
7,1 - 9	0	0
9 - 11,2	0	0
11,2 - 14	0	0
14 - 18	0	0
18 - 22,4	0	1
22,4 - 28	2	1
28 - 35,5	1	1
35,5 - 45	0	2
45 - 56	4	3
56 - 71	6	5
71 - 90	9	10
90 - 112	14	16
112 - 140	34	30
140 - 180	61	63
180 - 224	108	104
224 - 280		197

Para a câmara reverberante com difusores, o equacionamento teórico (equações 4.6 e 4.8) não mais representa o campo sonora da câmara, visto que a presença dos difusores altera o comportamento modal do campo sonoro.

Para analisar a densidade modal da câmara reverberante na presença dos difusores foram realizadas medições da função de transferência entre dois pontos, um localizado próximo à fonte sonora em um dos cantos da câmara e o outro no canto oposto.

Na Figura 4.10 são mostrados os modos obtidos para a câmara sem difusores. Em seguida, a Figura 4.11 apresenta os modos da câmara com difusores.

Observando-se as duas curvas, nota-se o aparecimento de alguns modos intermediários na curva da câmara com difusores. Esse acréscimo mostra um aumento da densidade modal na faixa de frequências analisada, indicando um aumento na difusividade. Também observa-se que com a adição dos difusores as variações de máximo e mínimo dos picos de ressonância diminuíram, representando uma melhor distribuição do campo sonoro.

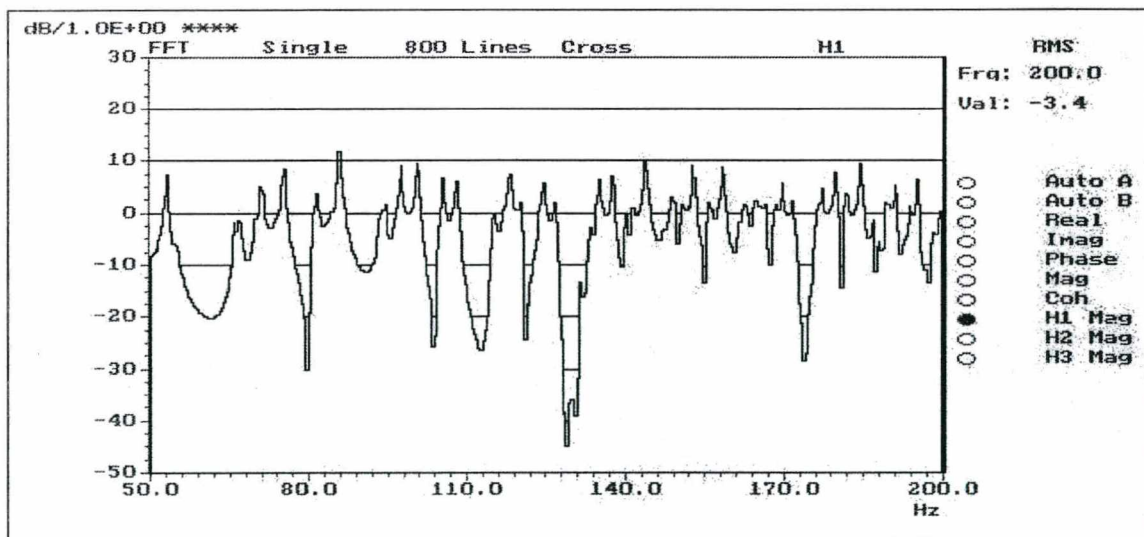


Figura 4.10 - Resposta da câmara reverberante sem difusores

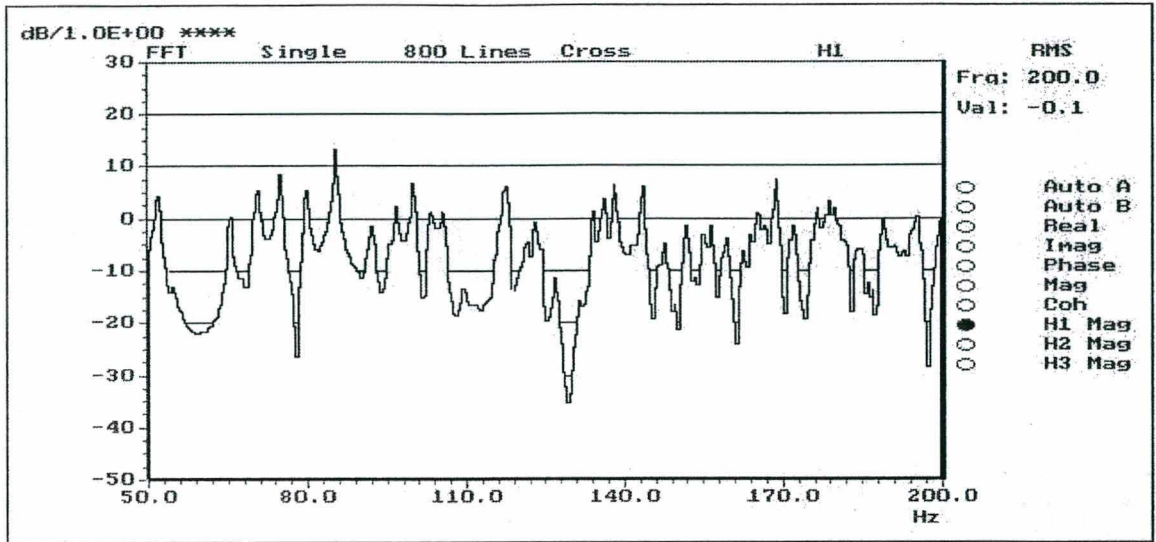


Figura 4.11 - Resposta da câmara reverberante com difusores

4.4 FREQUÊNCIA DE SCHROEDER

Como já explicitado na seção 2.2, a frequência de Schroeder é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$f_{sch} = 2000 \left(\frac{T_{60}}{V} \right)^{1/2}$$

onde: T_{60} é o tempo de reverberação, em s

V é o volume da câmara, em m^3

Utilizando a equação acima, são mostradas na Tabela 4.9 as frequências de Schroeder (f_{Sch}) calculadas, utilizando os tempos de reverberação da câmara vazia e com oito difusores suspensos e com o volume de $144,18 m^3$.

Tabela 4.9 - Frequências de Schroeder por bandas de terça de oitava

Freq. (Hz)	TR (s)	f_{Sch} (Hz)
100	9,30	508
125	10,96	551
160	8,69	491
200	7,32	451
250	7,01	441
315	5,31	384
400	5,22	381
500	4,96	371
630	4,87	368
800	4,95	371
1000	4,79	365
1250	4,54	355
1600	4,03	334
2000	3,81	325
2500	3,31	303
3150	3,00	288
4000	2,60	269
5000	2,24	249

De acordo com o método, a frequência de Schroeder é a menor frequência, acima da qual, a câmara reverberante é qualificada.

Analisando a Tabela 4.9, observa-se que a frequência de corte da câmara em estudo é de 400 Hz, ou seja, é a partir desta frequência que a f_{Sch} calculada é menor que a frequência medida.

Observa-se que a frequência de 400 Hz é relativamente alta para uma frequência de corte de uma câmara reverberante. Este fato, provavelmente ocorreu devido aos altos tempos de reverberação nas baixas frequências, o que pode ser corrigido com a adição de absorvedores para essas frequências. Todavia, este critério da frequência de corte de Schroeder não é definido como um critério limite na medição do coeficiente de absorção sonora de materiais em câmaras reverberante, mas sim, sendo utilizado na determinação dos níveis de potência sonora de fontes sonoras em câmaras reverberantes.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE RAIOS ACÚSTICOS

Tendo sido determinada e verificada como sendo a melhor configuração de difusores para a difusividade da câmara reverberante do LVA-UFSC, a configuração com 8 difusores suspensos foi definida como o modelo de simulação a ser executado.

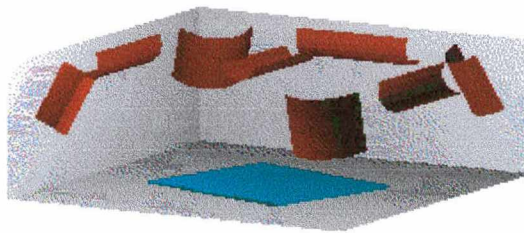


Figura 5.1 - Modelo da câmara reverberante simulado

A simulação foi realizada para dois modelos: o primeiro com a câmara sem a amostra de referência e o outro contendo a amostra. Destas simulações foram obtidos os tempos de reverberação e, através destes, calculado os coeficientes de absorção. As posições e condições dos equipamentos e materiais utilizado dentro da câmara na medição foram fielmente representados nos modelos.

Para a simulação do modelo, foi utilizado o software comercial RAYNOISE[®] versão 3.0, da LMS Numerical Technologies.

A simulação consistiu, basicamente, de quatro etapas:

⇒ Construção do modelo da câmara, atribuições das variáveis envolvidas nos parâmetros de entrada requeridas pelo software e processamento da simulação;

⇒ Convergência dos valores de entrada principais, a saber, número de raios e ordem de reflexão;

⇒ Ajuste dos tempos de reverberação medido e simulado, através dos coeficientes de absorção dos materiais.

⇒ Simulação dos modelos e comparação com as medições.

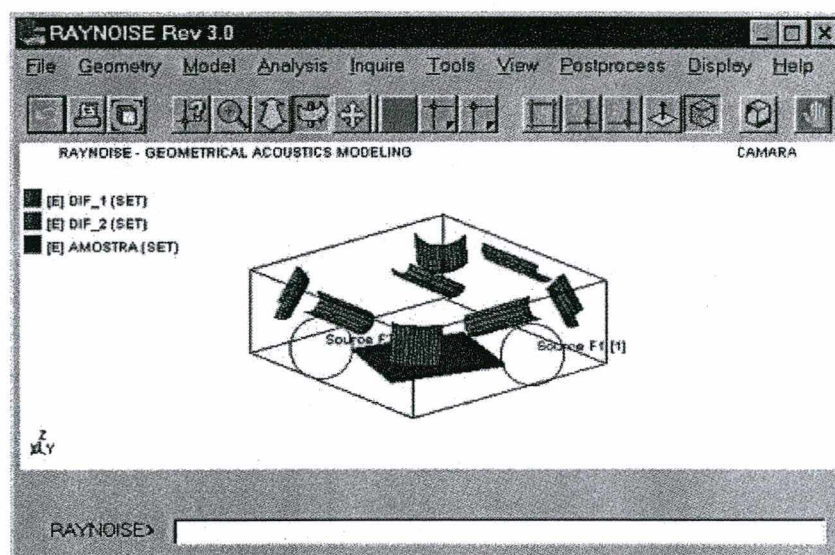


Figura 5.2 - Ambiente do software Raynoise

5.1 CONSTRUÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO

5.1.1 Construção do Modelo

Para realizar-se uma simulação numérica, é necessário primeiramente construir a malha dos elementos, superfícies e objetos que comportaram o modelo a ser simulado. No caso da câmara reverberante, o modelo foi construído utilizando o software AutoCAD[®], com o qual, foi

projetado as malhas da câmara reverberante, das amostras e dos difusores suspensos.

Com a malha construída no CAD, esta é exportada para um arquivo DXF. Através deste arquivo, importou-se as malhas e todos seus elementos para o Raynoise, obtendo assim, os modelos da câmara a serem simulados

Todo o processo de construção da malha no AutoCAD, sua exportação para o arquivo DXF e finalmente a importação para o Raynoise é explicitada em detalhes no Apêndice I.

5.1.2 Dados do Modelo

Antes de dar-se início ao cálculo da simulação do modelo construído, deve-se atribuir propriedades e características, explanadas a seguir. Os valores dos dados atribuídos aos modelos da câmara reverberante simulados são explicitados no Apêndice II.

Propriedades do meio:

Deve-se definir as propriedades do meio através das quais a onda acústica se propagará, tais como: velocidade do som, densidade de massa, temperatura, umidade relativa e coeficiente de absorção do ar.

As propriedades do meio podem ser atribuídas por dois modos:

- se o meio for ar, determinando-se os dados acústicos baseado nas condições atmosféricas.
- para qualquer meio, atribuindo-se os dados acústicos diretamente.

Propriedades do material

Um material deve ser definido pelas suas propriedades acústicas de absorção, difusão e perda de transmissão. Estas propriedades podem ser atribuídas em banda de oitava ou por intermédio de tabelas.

Quando um arquivo é processado com uma nova geometria (isto é, uma malha), um material padrão é criado tendo 0,0 de coeficiente de absorção, nenhuma difusão e nenhuma propriedade de transmissão.

Pelo princípio da acústica geométrica, as ondas sonoras comportam-se como "raios" sonoros. Raios acústicos são refletidos por superfícies sólidas e perdem parte de sua energia a cada reflexão. Sendo assim, nas propriedades de absorção e perda de transmissão, são consideradas as porcentagens de energia que serão absorvidas e transmitidas, respectivamente.

O coeficiente de difusão "d" de uma superfície é definido como a razão entre a potência sonora refletida em direções não especulares e a potência sonora total refletida.

$$P_{\text{difusão}} = dP_{\text{refletida}} = d(1 - \alpha)P_{\text{incidente}}$$

onde: d é o coeficiente de difusão

α é o coeficiente de absorção

O método usado pelo software para trabalhar com a reflexão difusa procede da seguinte forma:

Primeiro, o método dos raios é usado para achar a porção especular de todas as reflexões. As partes especulares são calculadas por:

$$P_{\text{especular}} = (1 - d)(1 - \alpha)P_{\text{incidente}}$$

Isto é feito para todas as frequências simultaneamente.

Em um segundo passo, as reflexões difusas são manejadas. A cada vez que um raio atinge uma superfície, um número aleatório entre 0 e 1 é gerado. Há, então, duas possibilidades:

- Se o número é menor que o coeficiente de difusão da superfície, um raio é irradiado em uma direção randômica.

- Se o número é maior que o coeficiente de difusão da superfície, o raio é refletido em uma direção especular.

Uma vez que os coeficientes de difusão são dependentes da frequência, e as paredes de reflexão difusa são processadas por reflexões de raios randômicos, um novo processo de traçado de raios tem de ser iniciado para cada valor de frequência.

Fonte Sonora

Antes de iniciar-se o cálculo, pelo menos uma fonte sonora deve ser definida. Toda fonte é caracterizada por sua posição em um sistema de coordenadas cartesianas, nível de potência sonora, orientação, padrão de diretividade e zona de emissão.

Uma fonte pontual é definida como um único monopólo em um determinado ponto no espaço. Suas características conformam com uma fonte esférica de campo livre, podendo ser modificada por alguma diretividade e/ou limitado por um ângulo de emissão.

Microfone

Pontos de detecção são equivalentes a microfones e indicam os pontos onde o campo sonoro deverá ser calculado.

Uma malha de pontos de detecção é composta por uma série de pontos nos quais os resultados serão calculados e uma área onde estes resultados poderão ser visualizados. Algumas vezes esta malha é referida como uma rede de receptores ou microfones, podendo ter forma arbitrária, com múltiplas superfícies e não apenas uma simples grade. Uma malha de pontos de detecção é considerada transparente ao processo de traçado dos raios e não tem influência na trajetória ou perda de energia dos raios.

Ruído de Fundo

É o ruído que permanece audível quando todas as fontes sonoras controladas estão desligadas. Através do menu "Modelo", escolhe-se o ruído de fundo e entra-se com os valores em bandas de oitava ou através de tabela. Como padrão é atribuído 0,0 dB de ruído de fundo para todas as frequências.

5.1.3 Parâmetros de Cálculo

Os parâmetros de cálculo estabelecem várias diretrizes relativas ao modelo de propagação de feixes, precisão nos resultados, quantidade de detalhes nos resultados, etc.

Tais parâmetros possuem quatro áreas, a saber: Propagação, Ecograma, Histograma e Geral.

Parâmetros de Propagação

Número de Raios (NR) por fonte = número de raios emitidos por uma esfera completa.

Para delimitar-se quando a propagação de um cone/pirâmide será abandonada e quando deverá ser iniciado o traçado de um novo, três critérios têm maior influência.

- **Ordem de Reflexão (OR)**
- **Tempo de Propagação**
- **Faixa Dinâmica**

Parâmetros do Ecograma

Ordem de reflexão registrado no ecograma: indica até que ordem as reflexões serão armazenadas explicitamente no ecograma como reflexões discretas, com tempos de chegada precisos e amplitudes das frequências dependentes. Acima desta ordem as reflexões são "integradas" dentro do histograma.

Ordem de reflexão registrado na trajetória do raio: indica até que ordem a trajetória do raio de uma reflexão individual (isto é, as coordenadas da interseção do raio com a superfície refletora) é armazenada explicitamente no ecograma. Este número deve ser sempre menor ou igual a ordem de reflexão registrada no ecograma e menor ou igual a 10 em termos absolutos.

Parâmetros do Histograma

Intervalo do Histograma: largura das faixas do histograma, em milisegundos, tipicamente, 10 ms a 20 ms.

Comprimento do Histograma: número de intervalos de tempo (faixas) para cobrir todo o comprimento da resposta transiente.

Se o comportamento temporal não é de particular interesse, histogramas podem ser omitidos no banco de dados, salvando-se muita memória RAM e espaço em disco.

Parâmetros Gerais

Os parâmetros de cálculo gerais relacionam-se aos procedimentos opcionais no algoritmo a ser utilizado.

Difusão: quando selecionada, o programa modela reflexões difusas por meio do método randômico hídrico determinístico.

Difração: quando selecionada, o programa compensa por difração, pela aplicação do inverso da atenuação de Kurze-Anderson, na borda de difração definida pelo usuário.

Compensação na trajetória: aplica a compensação contínua, estatística, ou nenhuma.

Método dos feixes: seleciona entre o traçado de feixes cônico ou triangular.

5.1.4 Procedimento de Cálculo

Para calcular a contribuição da pressão sonora nos pontos de detecção em função do tempo, espaço, frequência e ângulo de incidência, o cálculo do mapeamento é utilizado através dos métodos de raios cônicos ou triangulares. Para a análise do mapeamento é necessário a seleção de uma fonte e frequências de interesse. Para cada fonte selecionada, um cálculo de traçado cone ou pirâmide é realizado. Todas as frequências são processadas em paralelo (desde que os caminhos dos raios sejam independentes da frequência), exceto quando uma reflexão difusa é requerida. Neste caso, um cálculo baseado no traçado de raios será iniciado para cada frequência separadamente, em adição ao cálculo determinístico do traçado de raios com modelos simultâneos de reflexão especular para todas as frequências.

O cálculo do pós-processamento deriva de resultados, isto é, parâmetros acústicos tais como SPL, STI e EDT, dos resultados do mapeamento registrados na base de dados. Naturalmente, resultados apenas podem ser derivados nas frequências e para as fontes cujos resultados do mapeamento estão disponíveis. O comando do pós-processamento necessita da especificação da fonte e da definição das frequências pelo usuário.

5.2 CONVERGÊNCIA DOS RAIOS E REFLEXÕES

Usualmente, a convergência do número de raios (NR) e da ordem de reflexões (OR) para um determinado modelo é realizada através de um processo pelo qual fixa-se um determinado valor de ordem de reflexão (estima-se este valor baseado em procedimentos semelhantes) e simula-se o modelo variando o número de raios. Após um determinado patamar, o número de raios manter-se-á constante, sendo este seu valor de convergência. Com este valor de raios, simula-se o modelo, variando-se agora a ordem de reflexão até que este também estabilize, encontrando-se assim, seu valor de convergência.

Em seu artigo, MENG et al. (1995) realizaram processo semelhante de convergência utilizando como variável na simulação o NPS.

5.2.1 Convergência da Ordem de Reflexão

Devido à imensa ordem de reflexão existente em uma câmara reverberante, o método de convergência descrito anteriormente torna-se praticamente inviável. As diversas simulações necessárias, com altos valores de OR, seriam muito demoradas, mesmo com os computadores mais recentes¹.

~

¹ O computador utilizado nas simulações configura-se de um PC com processador Intel Pentium II 400 MHz, e memória RAM de 128 MB.

Tendo sido contatada a empresa LMS *Numerical Technologies*, autora do software RAYNOISE, foi recomendada, como forma de determinar o valor adequado de Ordem de Reflexão, a utilização da equação:

$$OR = \frac{TR \cdot c}{MFP} \quad (5.1)$$

onde: TR = Tempo de Reverberação
 c = velocidade do som
 MFP = Caminho Médio Livre (Mean Free Path)

Analisando-se a equação acima, percebe-se que ela, basicamente, calcula quantas reflexões ocorreriam para um raio que permanece propagando-se na câmara durante o Tempo de Reverberação (TR) e percorre "n" vezes a distância do Caminho Médio Livre (*Mean Free Path* - MFP).

KUTTRUFF, H. (1979) define MFP como o comprimento total (ct) percorrido por uma "partícula sonora" durante o tempo t, dividido pelo número de reflexões ocorridas no intervalo t. Segundo ele, o MFP pode ser definido em função da geometria do sala como:

$$MFP = \frac{4V}{S} \quad (5.2)$$

onde: V é o volume da câmara (m³)
 S é a área das superfícies das paredes da câmara (m²)

Para a câmara reverberante simulada, a equação (5.2) fornece o valor a seguir:

$$MFP = \frac{4 \cdot 144,18}{187,26} \quad MFP = 3,08 \text{ m}$$

Com a velocidade do som (c) calculada como:

$$c = 331 + 0,6.t \quad (\text{para } t = 28 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$c = 348 \text{ m/s}^2$$

A ordem de reflexão, de acordo com a equação (5.1), será obtida de acordo com:

$$OR = \frac{TR.348}{3,08} \quad (5.3)$$

A Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam os valores de ordem de reflexão, calculados de acordo com a equação (5.3), para a câmara vazia e com amostra

Tabela 5.1 - Ordem de Reflexão para câmara vazia

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
TR(s)	7,01	4,96	4,74	3,81	2,60
OR calculado	792	560	535	430	293
OR adotado	800	600	600	600	600

Tabela 5.2 - Ordem de Reflexão para câmara com amostra

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
TR(s)	2,92	1,43	1,39	1,27	1,12
OR calculado	330	162	157	143	127
OR adotado	350	200	200	200	200

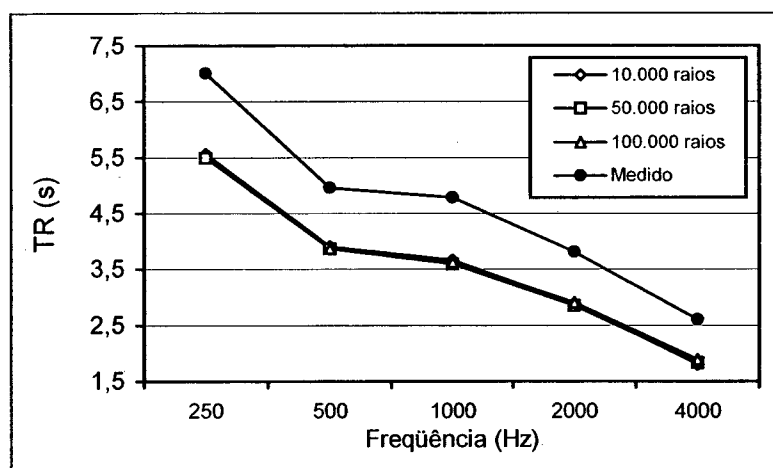
Os tempos de reverberação utilizados nas tabelas Tabela 5.1 e Tabela 5.2 foram obtidos por medição descrita no capítulo 3.

5.2.2 Convergência do Número de Raios

Apesar da câmara reverberante ser um ambiente específico e extremo, quando comparada a salas fechadas encontradas na maioria dos ambientes, o número de raios necessários para preencher todo seu volume não difere de uma sala comum com dimensões semelhantes. Sendo assim, o número de raios utilizado para simular uma câmara reverberante não é muito alto quando comparado a salas comuns, possibilitando a determinação do número de raios pelo método da convergência.

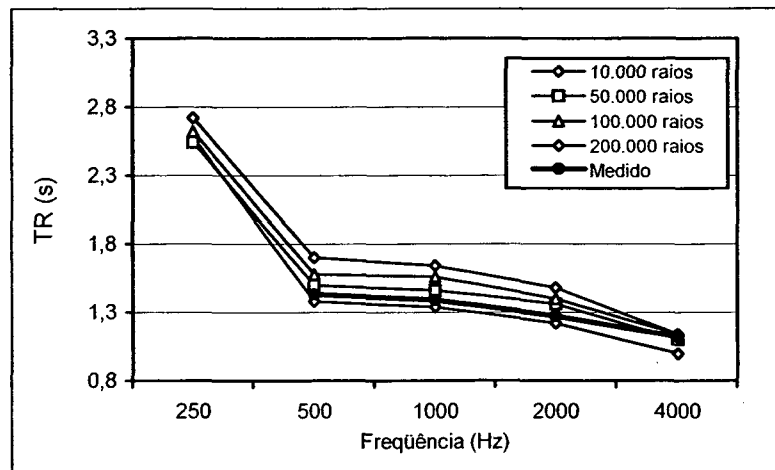
Utilizando os valores de OR determinados na seção 5.2.1, a câmara reverberante foi simulada, tendo sido variado o número de raios até que este se estabilizasse, encontrando-se assim seu valor de convergência.

A Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam a convergência do número de raios para a câmara sem e com amostra, respectivamente:



Ordem de Reflexão: 600 para (500, 1000, 2000 e 4000 Hz) e 800 para (250 Hz)

Figura 5.3 - Convergência do número de raios para câmara sem amostra



Ordem de Reflexão: 200 para (500, 1000, 2000 e 4000 Hz) e 350 para (250 Hz)

Figura 5.4 - Convergência do número de raios para câmara com amostra

5.3 AJUSTE DO MODELO

Utilizando-se os valores de ordem de reflexão calculados teoricamente e o número de raios obtidos pelo método de convergência, de acordo com o apresentado na seção 5.2, a câmara reverberante (com e sem amostra) é simulada e os tempos de reverberação obtidos. Destes resultados é feita a comparação com os valores de medição, averiguando-se a aproximação dos resultados simulados com os medidos. Havendo necessidade, um ajuste é feito nos valores de coeficiente de absorção do modelo para a calibração das curvas.

Na Tabela 5.3 são apresentados os coeficientes de absorção atribuídos ao modelo sem amostra (vide apêndice II); os valores de tempo de reverberação simulados deste modelo são mostrados na Figura 5.5

Tabela 5.3 - Parâmetros de entrada do modelo simulado para câmara sem amostra

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Propriedades de Propagação					
Número de Raios	10.000				
Ordem de Reflexão	800	600	600	600	600
Coeficientes de Absorção					
concreto	0,018	0,025	0,026	0,032	0,048
difusor	0,018	0,025	0,026	0,032	0,048

Tabela 5.4 - Tempos de Reverberação Simulados x Medidos para Câmara sem amostra

Freq. (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	7,01	4,96	4,79	3,81	2,6
Simulado (s)	5,56	3,9	3,66	2,88	1,8

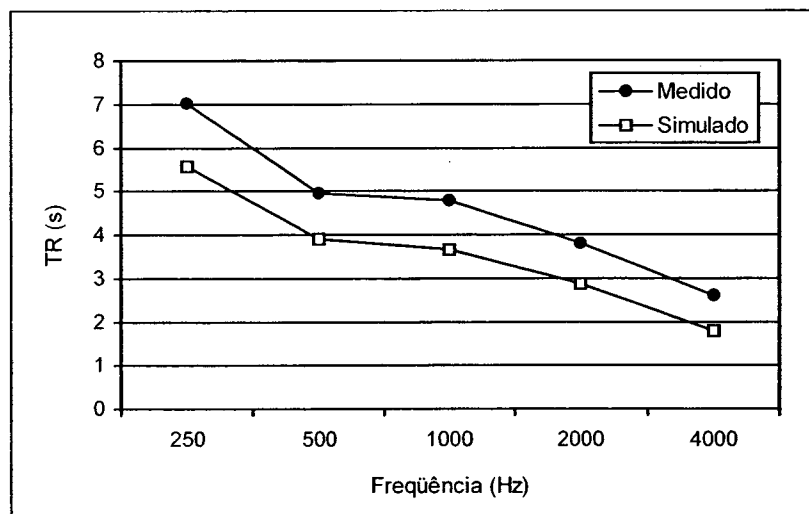


Figura 5.5 - Tempos de reverberação Simulados x Medidos para câmara sem amostra

Posteriormente são apresentados na Tabela 5.5 os coeficientes de absorção atribuídos ao modelo com amostra (vide apêndice II); os valores de tempo de reverberação simulados deste modelo são mostrados na Figura 5.6.

Tabela 5.5 - Parâmetros de entrada do modelo simulado para câmara com amostra

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Propriedades de Propagação					
Número de Raios	10.000				
Ordem de Reflexão	350	200	200	200	200
Coefficientes de Absorção					
concreto	0,018	0,025	0,026	0,032	0,048
difusor	0,018	0,025	0,026	0,032	0,048
amostra	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 5.6 - Tempos de Reverberação Simulados x Medidos para Câmara com amostra

Freq. (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	2,92	1,43	1,39	1,27	1,12
Simulado (s)	2,58	1,38	1,34	1,22	1,00

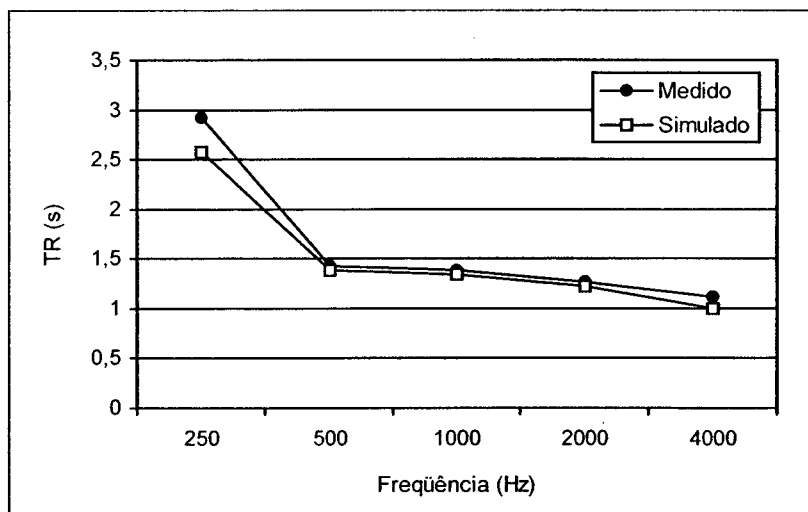


Figura 5.6 - Tempos de reverberação Simulados x Medidos para câmara com amostra

Analisando-se os gráficos de comparação obtidos, nota-se que os valores de TR simulados são menores que os valores medidos. Sendo assim, o ajuste dos modelos é feita pela diminuição dos coeficientes de absorção dos materiais utilizados na simulação, aumentando-se os tempos de reverberação e

ajustando-se o modelo. Os modelos ajustados, com seus respectivos coeficientes de absorção, são mostrados na Tabela 5.7 e Figura 5.7, e na Tabela 5.9 e Figura 5.8 a seguir.

Tabela 5.7 - Parâmetros de entrada do modelo ajustado para câmara sem amostra

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Propriedades de Propagação					
Número de Raios	10.000				
Ordem de Reflexão	800	600	600	600	600
Coeficientes de Absorção					
concreto	0,014	0,019	0,019	0,023	0,028
difusor	0,014	0,019	0,019	0,023	0,028

Tabela 5.8 - Tempos de Reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara sem amostra

Freq. (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	7,01	4,96	4,79	3,81	2,60
Simulado calibrado (s)	7,04	5,01	4,83	3,78	2,61

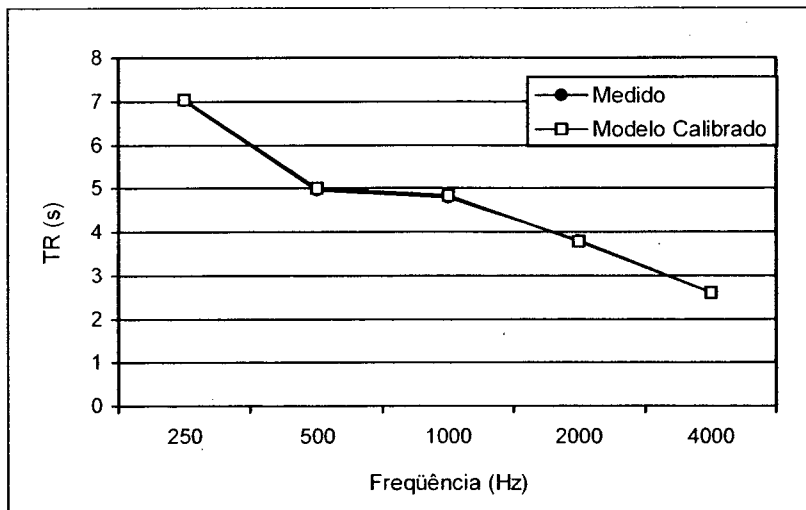


Figura 5.7 - Tempos de reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara sem amostra

Tabela 5.9 - Parâmetros de entrada do modelo ajustado para câmara com amostra

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Propriedades de Propagação					
Número de Raios	10.000				
Ordem de Reflexão	350	200	200	200	200
Coeficientes de Absorção					
concreto	0,014	0,019	0,019	0,023	0,028
difusor	0,014	0,019	0,019	0,023	0,028
amostra	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 5.10 - Tempos de Reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara com amostra

Freq. (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	2,92	1,43	1,39	1,27	1,12
Simulado (s)	2,86	1,50	1,46	1,36	1,16

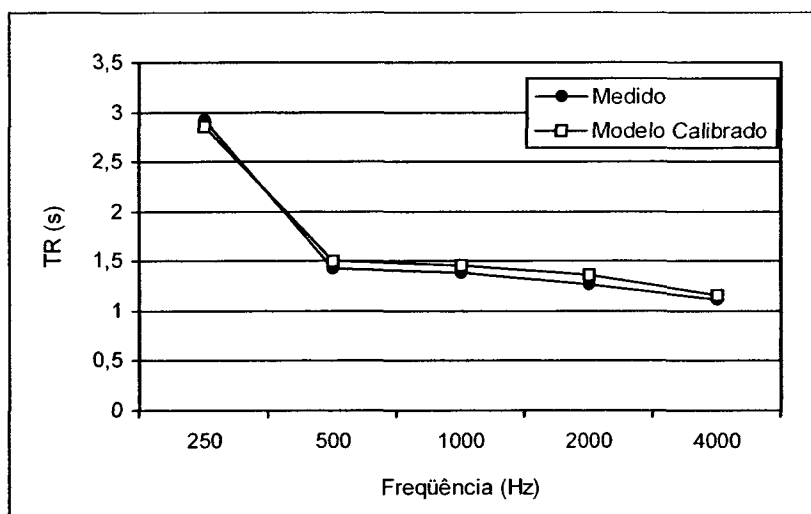


Figura 5.8 - Tempos de reverberação do modelo Ajustado x Medidos para câmara com amostra

5.4 SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS MEDIDOS NA CÂMARA

Com os valores ajustados, é mostrada na Figura 5.9 a simulação da câmara reverberante (com e sem amostra) com seus respectivos tempos de reverberação. Os coeficientes de absorção da amostra são calculados utilizando-se os valores de TR simulados e mostrados na Figura 5.10.

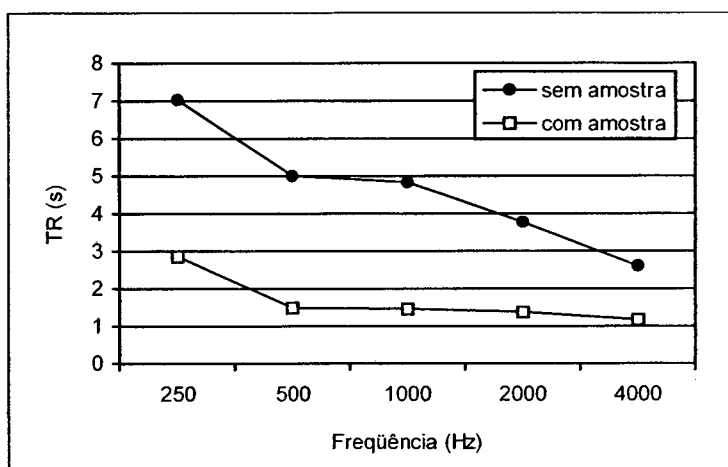


Figura 5.9 - Tempos de reverberação do Modelo Calibrado da Câmara Reverberante

Tabela 5.11 - Coeficientes de Absorção simulados da amostra de referência

Freq. (Hz)	250	500	1000	2000	4000
coef. de absorção	0,441	0,991	1,014	0,999	1,017

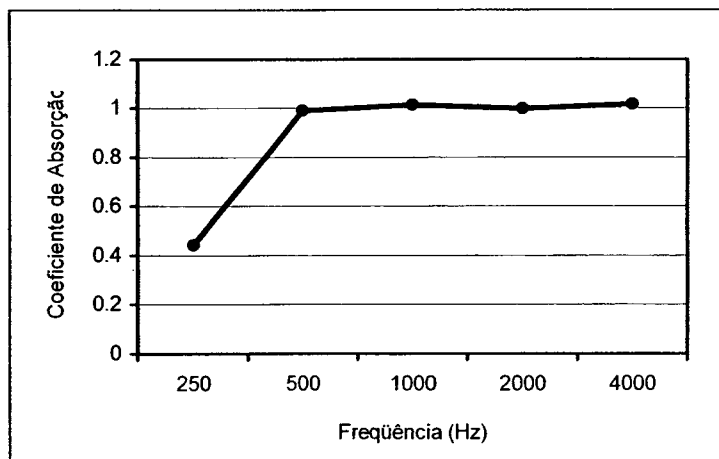
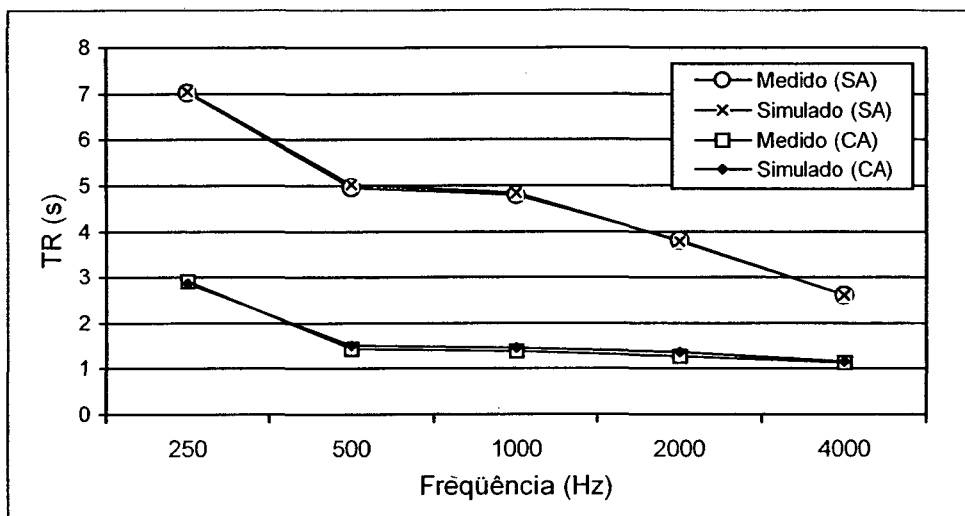


Figura 5.10 - Coeficientes de absorção simulados da amostra de referência

Com os valores de TR e α obtidos pela simulação do modelo ajustado, é feita a comparação com os valores medidos na câmara reverberante. Na Figura 5.11 e Figura 5.12 são mostradas as comparações dos TR e α , respectivamente.



SA: sem amostra; CA: com amostra

Figura 5.11 - Tempos de reverberação Medidos x Simulados para câmara com e sem amostra

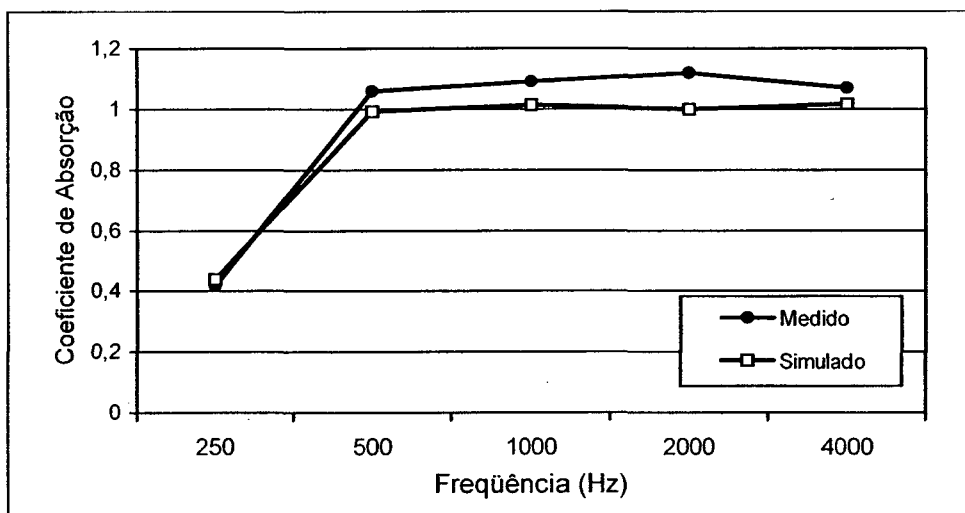


Figura 5.12 - Coeficientes de absorção da amostra de referência medidos x simulados

Pelos resultados da Figura 5.11, observa-se que os tempos de reverberação simulados resultaram muito próximos dos valores medidos. Esta

boa aproximação dos resultados decorreu-se, primeiro, devido ao procedimento de convergência dos raios e reflexões que conseguiu qualificar e otimizar os traçados dos raios no processo de simulação, e posteriormente, pelos ajustes dos dados de entrada nas variáveis da simulação (coeficientes de absorção). Através destes processos de otimização e ajustes, conseguiu-se obter um modelo de simulação numérico muito próximo do modelo real, qualificando a simulação e possibilitando a correta determinação dos valores requeridos.

Calculando os coeficientes de absorção através dos tempos de reverberação simulados, obteve-se, como mostra a Figura 5.12, valores também próximos aos coeficientes calculados através dos tempos de reverberação medidos. Apesar dos coeficientes de absorção simulados serem próximos de 1,0 nas frequências acima de 500 Hz, em detrimento dos coeficientes medidos estarem próximos de 1,2, os coeficientes simulados encontram-se na faixa de variação dos valores de coeficiente medidos pelos outros 5 laboratórios, validando assim esses coeficientes.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Apesar de ser uma técnica conhecida há várias décadas, a utilização de difusores no espalhamento do campo sonoro em câmaras reverberantes ainda é uma das melhores maneiras de se aperfeiçoar a difusividade do campo sonoro e, por conseguinte, aprimorar a medição da absorção sonora.

As várias configurações de difusores avaliadas no Capítulo 3 mostraram que o campo sonoro e o coeficiente de absorção sonora são fortemente influenciados pelo tipo e posição de difusores utilizados. Sua configuração e distribuição pelo volume da câmara influenciam na distribuição do campo sonoro.

Através dos resultados de coeficientes de absorção obtidos com os novos difusores suspensos, pode-se afirmar que o campo sonoro da câmara reverberante encontra-se com níveis de difusividade adequados para uma correta medição de absorção.

No modelo estudado, das 12 configurações estipuladas, 4 obtiveram os níveis de coeficientes desejados. Dentre estas, a configuração com 8 difusores suspensos foi a que melhor atendeu aos objetivos e recomendações estabelecidas. Com esses difusores, conseguiu-se aproximar os níveis de coeficientes de absorção da amostra medidos na câmara reverberante do LVA-UFSC com a média dos outros 5 laboratórios e aprimorar a difusividade do campo sonoro da câmara.

Das frequências medidas, a câmara obteve boa resposta nos valores de coeficiente de absorção a partir de 125 Hz, havendo variações apenas em algumas baixas e altas frequências. Esse fato vem comprovar a recomendação da norma ISO 3741 (1988) que estabelece a frequência de 125 Hz como a mínima para medições em câmaras de 150 m³.

Por esse resultado demonstra-se que câmaras reverberantes de paredes paralelas e volumes menores que os recomendados pela norma ISO 354 (1985) podem possuir as características e propriedades necessárias para medir, com precisão, o coeficiente de absorção sonora de materiais.

Na análise teórica do campo sonoro da câmara, a simulação numérica pelo método de raios acústicos mostrou-se uma ferramenta útil, mas que ainda requer muitos cuidados nas variáveis de entrada. O software Raynoise apresentou demasiadas variações nos resultados simulados devido a pequenas mudanças nos coeficientes dos materiais ou a alterações do número de raios e ordem de reflexões. Essa grande sensibilidade a estes parâmetros dificulta a precisa avaliação dos resultados obtidos e exige elevado esforço do usuário na correta calibração do modelo.

6.1 SÍNTESE DOS RESULTADOS

6.1.1 Coeficiente de Absorção Sonora

Observando-se o desempenho dos difusores inclinados, anteriormente usados na câmara, constatou-se que estes não são eficientes no espalhamento do campo sonoro. Os coeficientes de absorção da amostra medidos com estes difusores estavam, nas médias e altas frequências, abaixo dos valores obtidos pelos outros laboratórios.

Os difusores suspensos empregados na câmara em estudo mostraram-se eficientes, tendo levado os coeficientes de absorção da amostra de referência a níveis próximos aos encontrados nos outros laboratórios. Como a câmara reverberante possui pouca altura, os difusores suspensos não puderam ser posicionados aleatoriamente ao longo de toda área do teto. Apesar de terem sido instalados, na maioria, apenas nos cantos e arestas superiores da câmara, praticamente impossibilitando uma distribuição aleatória, seus desempenhos na difusão do campo parecem não terem sido prejudicados.

Analisando-se as diversas medições de coeficiente de absorção observou-se que para a câmara contendo todos os 17 difusores, tanto inclinados como suspensos, obteve-se uma curva nos níveis desejados. Não obstante, os mesmos níveis foram encontrados para a câmara contendo apenas 8 difusores suspensos, comprovando-se que estes são suficientes para nivelar a curva de coeficiente de absorção da amostra de referência ao patamar dos resultados dos outros 5 laboratórios e mostrando que é a melhor configuração, entre as testadas, para prover a difusividade do campo sonoro da câmara.

6.1.2 Simulação pelo método de raios acústicos

Ficou evidente pela experiência que a construção do modelo torna-se muito mais simples e prática utilizando-se o software AutoCAD. Como este software é próprio para a confecção de projetos arquitetônicos, o modelamento das diversas superfícies é realizado com muita facilidade e simplicidade. Sua integração com o Raynoise requer poucos procedimentos e o processamento é praticamente instantâneo.

Ainda há uma grande dificuldade na entrada dos dados iniciais requeridos pelo software, principalmente as propriedades dos materiais como coeficientes de absorção, coeficientes de difusão e perda de transmissão. Como essas variáveis possuem certa imprecisão, torna-se de difícil obtenção, sem o

procedimento da calibração, resultados próximos aos medidos em campo. O próprio procedimento da calibração é dificultado pelo fato de ocorrerem consideráveis variações nos valores simulados, mesmo havendo uma pequena variação nos coeficientes.

A convergência dos valores de ordem de reflexão e número de raios mostrou-se um processo penoso e demorado, requerendo inúmeras simulações. Essa problemática deveria ser resolvida pelo próprio software Raynoise que, possuindo as propriedades dos materiais e a geometria do modelo, teria condições de fornecer, através de algoritmos, os valores de convergência.

As simulações dos modelos mostraram-se razoáveis, tendo sido encontrados valores de TR, em ambos os casos, com e sem amostra, pouco abaixo dos valores medidos. Com o ajuste, conseguiu-se elevar os valores simulados, praticamente igualando-os aos medidos. Calculados os coeficientes de absorção através dos Tempos de Reverberação simulados e ajustados, obteve-se valores na ordem de 1,0 nas frequências acima de 500 Hz, que são próximos dos valores medidos e dentro da faixa de variação dos valores de coeficiente encontrados pelos outros 5 laboratórios.

6.1.3 Difusividade do Campo Sonoro da Câmara Reverberante

Seguindo-se recomendações da Norma ISO 354 (1985), foram realizadas medições de absorção sonora de uma amostra com áreas de difusores sendo acrescentadas à câmara em etapas de aproximadamente 5 m². Medições com 4, 8 e 10 difusores foram realizadas. Pelas curvas de coeficiente de absorção determinadas, observou-se que as curvas estabilizam-se a partir da configuração com 8 difusores. Por este critério, conclui-se que a câmara reverberante contendo os 8 difusores possui uma boa difusividade do campo sonoro.

Pela medição da distribuição espacial da pressão sonora notou-se que, devido a colocação dos difusores, houve uma diminuição dos desvios padrão

nas baixas frequências, justamente na região da frequência onde era mais precária a difusão do campo sonoro. Nas altas frequências ocorreram pequenas pioras, com maiores desvios padrão, talvez devida a uma direcionalidade das ondas sonoras de menor comprimento de onda, provocadas pelos difusores.

Em alguns artigos é mencionado que desvios padrão da distribuição da pressão sonora em câmaras reverberantes menores que 1,5 indicam uma adequada difusividade do campo. Pelos resultados obtidos observou-se que a menor frequência para a qual $\sigma < 1,5$ (condição de câmara vazia) passou de 315 Hz para 160 Hz com a introdução dos difusores, aumentando assim, a faixa de frequências que atendem a esse critério.

A análise da densidade modal para a câmara sem difusores foi efetuada, teoricamente, utilizando-se o equacionamento para salas retangulares. Seguindo-se recomendações que indicam a menor densidade modal como sendo de 30 modos para a banda de frequência de interesse, os modos foram calculados e as densidades modais determinadas em bandas de terça de oitava. Através dos resultados determinou-se que a menor banda de frequência com densidade modal maior que 30 modos é a de 125 Hz, sendo a partir desta frequência o campo considerado difuso.

Já para a câmara com difusores, medições da resposta modal da câmara mostraram que, através dos difusores, houve um acréscimo de modos intermediários, além de uma menor variação dos máximos e mínimos dos picos de ressonância. Esse fatos indicaram uma melhora na distribuição modal e, por conseqüência, um aumento da difusividade do campo.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No trabalho apresentado foram estudados difusores com dois tipos de materiais e duas configurações características (difusores de madeira

compensada apoiadas nas paredes e difusores de madeira MDF curvadas e suspensas no teto). Mesclando-se esses dois tipos de difusores, 12 configurações foram testadas e, entre estas, determinada a melhor configuração.

Para ampliar a abrangência da análise, novas medições de coeficientes de absorção poderiam ser feitas utilizando-se outros materiais como difusores, aplicando-se diferentes curvaturas às placas e testando-se outras configurações de distribuição ao longo da câmara, analisando-se, assim, um possível aprimoramento da difusão do campo.

Poderia-se, também, utilizar as ferramentas de avaliação do campo reverberante (distribuição da pressão sonora, densidade modal, entre outras) paralelamente às medições de coeficiente de absorção, não limitando-se a análise de cada configuração de difusores ao comportamento da curva de coeficiente.

Um estudo mais aprofundado do campo sonoro de câmaras reverberantes poderia ser feito para caracterizar-se melhor seu comportamento, principalmente nas baixas frequências. Uma ferramenta interessante a esse fim é o coeficiente de correlação da pressão sonora.

Quanto à simulação numérica, esta poderia ser utilizada para avaliar não só modelos já medidos na câmara mas, também, modelos de câmara em fase de estudo de implantação, com diferentes difusores e configurações, analisando-se previamente seus desempenhos na difusão do campo.

Grandes cuidados deverão ser tomados com os valores de entrada do software. Variáveis como o coeficiente de difusão ainda não são perfeitamente compreendidas, sendo alvo de várias pesquisas incluindo-se projetos de doutorado. Coeficientes de absorção e perda de transmissão dos materiais normalmente não são conhecidos e determiná-los resulta em maiores dificuldades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALACHANDRAN, C. G. Random sound field in reverberation chambers. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 31, n. 10, p. 1319-1321, Oct. 1959.
- BALACHANDRAN, C. G., ROBINSON, D. W. Diffusion of the decaying sound field. *Acustica*, v. 19, n. 5, 1967.
- BENEDETTO, G., BROSIO, E., SPAGNOLO, R. The effect of stationary diffusers in the measurement of sound absorption coefficients in a reverberation room: an experimental study. *Applied Acoustics*, v.14, p.49-63, 1981.
- BERANEK, Leo Leroy. *Concert and opera halls: how they sound*. Woodbury, NY: Acoustical Society of America, 1996.
- COOK, Richard K., et al. Measurement of correlation coefficients in reverberant sound fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 27, n. 6, p. 1072-1077, Nov. 1955.
- COPS, A., VANHAECHT, J., LEPPENS, K. Sound absorption in a reverberation room: causes of discrepancies on measurement results. *Applied Acoustics*, v. 46, n. 3, p. 215-232, 1995.
- DÄMMIG, P. Model investigations into sound fields in reverberation rooms. *Acustica*, v. 75, p. 105-120, 1991.
- DÄMMIG, P. Model investigations to determine the sound absorption coefficient in reverberation rooms. *Acustica*, v. 81, p. 412-415, 1995.

- DODD, S. D., DOAK, P. E. Some aspects of the theory of diffusion and diffusers. *Journal of Sound and Vibration*, v. 16, n. 1, p. 89-98, 1971.
- DUANQI, Xiang, ZHENG, Wang, JINJING, Chen. Acoustic design of a reverberation chamber. *Applied Acoustics*, v. 32, n. 2, p. 83-91, 1991.
- FORSBERG, Per-Anders. Fully discrete ray tracing. *Applied Acoustics*, v. 18, p. 393-397, 1985.
- GERGES, Samir N. Y. Ruído: fundamentos e controle. Florianópolis: 1992. 600 p. ISBN 85-900046-01-X.
- GIULIANO, H. G., VELIS, A. G., MÉNDEZ, A. M. The reverberation chamber at the laboratorio de acústica y luminotecnia of the Comisión de Investigaciones Científicas. *Applied Acoustics*, v. 49, n. 1, p. 71-83, 1996.
- GOMES, Márcio H. A. Obtenção de parâmetros para a avaliação da qualidade acústica de salas através da técnica MLS e acústica de raios. Florianópolis, 1998. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina.
- HIDAKA, Takayuki, BERANEK, Leo L., OKANO, Toshiyuki. Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low and high frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 98, n. 2, Aug. 1995.
- HODGSON, Murray. On measures to increase sound-field diffuseness and the applicability of diffuse-field theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.95, n. 6, p. 3651-3653, June 1994.
- ISO R 354. - Measurement of absorption coefficients in a reverberation room. 1963.
- ISO 354. Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. 1985.

- ISO 3741. Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms. 1988.
- KUTTRUFF, Heinrich. Room Acoustics. 2. ed. London: Applied Science, 1979. ISBN 0-85334-813-8.
- LEHNERT, Hilmar. Systematic errors of the ray-tracing algorithm. Applied Acoustics, v. 38, p. 207-217, 1993.
- LMS INTERNATIONAL. Raynoise Rev 3.0 Building acoustics & industrial noise simulation: User's manual. Leuven, [199-].
- MALING, G. C. Jr. Computer studies of mode-spacing statistics in reverberation rooms. Journal of Sound e Vibration, v. 16, n. 1, p. 79-87, 1971.
- MENG, X. W., BORGER, G. De., OVERMEIRE, M. Van. Numerical simulation of the acoustical behaviour of rooms using raynoise. In: EURO-NOISE, 1995, Lyon. Proceedings... Senlis: CETIM, 1995. 1074 p. p. 121-126.
- MORROW, C. T. Point-to-point correlation of sound pressures in reverberation chambers. Journal of Sound and Vibration, v.16, n.1, p.29-42, 1971
- NABUCO, Marco A. *et al.* Medición de absorción acústica de una misma muestra en aarios laboratorios (Norma ISO 354). In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA, I, 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis: SOBRAC, 1998. 686 p. 667-670.
- NÉLISSE, H., NICOLAS, J. Characterization of a diffuse field in a reverberant room. Journal of the Acoustical Society of America, v. 101, n. 6, p. 3517-3524, June 1997.
- PIERCE, Allan D. Acoustics: An introduction to its physical principles and applications. New York: McGraw-Hill, 1981.
- REYNOLDS, Douglas D. Engineering principles of acoustics. Boston: Allyn and Bacon, 1981.

- SCHROEDER, Manfred R. Measurement of sound diffusion in reverberation chambers. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 31, n. 11, p. 1407-1414, 1959.
- SCHROEDER, Manfred R. The "Schroeder frequency" revisited. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 99, n. 5, p. 3240-3241, May 1996.
- SCHULTZ, T. J. Diffusion in reverberation rooms, *Journal of Sound and Vibration*, v.16, n.1, p.17-28, 1971.
- SEKIGUCHI, Katsuaki, KIMURA, Sho, HANYUU, Toshiki. Analysis of sound field on spatial information using a four-channel microphone system based on regular tetrahedron peak point method. *Applied Acoustics*, v. 37, p. 305-323, 1992.
- SOUZA, Mauricy C. R. Previsão do ruído em salas por raios acústicos e ensaios experimentais. Florianópolis, mar. 1997. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- TOHYAMA, M., SUZUKI, A., YOSHIKAWA, S. Correlation coefficients in a rectangular reverberant room - experimental results. *Acustica*, v. 42, 1979.
- VERMEIR, G., MEES, P. Evaluation of room acoustical predictions using ray-tracing. In: EURO-NOISE, 1995, Lyon. Proceedings... Senlis: CETIM, 1995. 1074 p. p. 109-114.
- VORLÄNDER, Michael. Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing / image-source algorithm. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 86, n. 1, p. 172-178, July 1989.
- WATERHOUSE, R. V., COOK, R. K. Diffuse sound field: Eigenmode and free-wave models. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 59, n. 3, p. 576-581, Mar. 1976.

APÊNDICES

APÊNDICE I

CONSTRUÇÃO DO MODELO DA CÂMARA REVERBERANTE PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

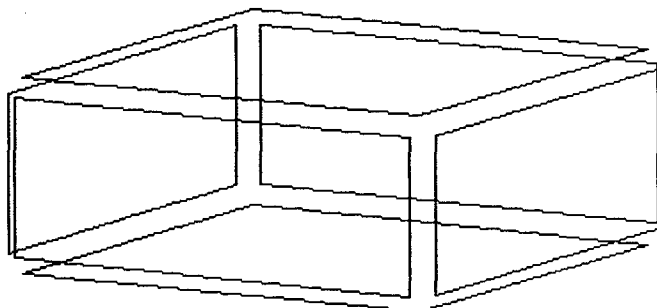
O software RAYNOISE possui duas formas de interface que trabalham com qualquer programa de projeto que suporte o formato DXF (Drawing eXchange File). Importar modelos criados em um programa CAD para o RAYNOISE pode economizar muito tempo e esforço, especialmente quando modelos complexos ou uma série de variantes são acrescentados.

O software AutoCAD[®] da Autodesk é amplamente usado em projetos arquitetônicos. Para assistir o intercâmbio entre os desenhos AutoCAD e outros programas, a Autodesk definiu o formato DXF. Um arquivo DXF é um arquivo de formatado em ASCII e geralmente possui a extensão .dxf.

As seções *ENTITIES*, que fazem parte do arquivo DXF, contêm as entidades do desenho, tais como *LINE*, *POINT*, *CIRCLE* e etc. Estas entidades são descritas pelo grupo que introduz o item, dando seus tipos, e/ou nomes, seguidos pelos grupos múltiplos, que fornecem os valores associados com o item.

Não são todas as entidades que são suportadas pelo RAYNOISE. Apenas aquelas que podem ser interpretadas como parte de um modelo geométrico associado ao RAYNOISE são consideradas. Por exemplo, as entidades *CIRCLE* são omitidas quando lidas pelo RAYNOISE em um arquivo DXF, mas as entidades *3DFACE* são reconhecidas. O modelo da câmara reverberante e dos difusores, no software AutoCAD, foi construído apenas com o uso da entidade *3DFACE*.

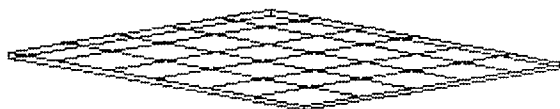
Como a câmara reverberante possui apenas faces planas, sua construção no modelo DXF deu-se com relativa facilidade, apenas empregando-se as coordenadas respectivas às dimensões das superfícies da câmara.



Câmara Reverberante

Figura I.1 - modelo da câmara reverberante construído no arquivo DXF

As placas de espuma utilizadas como amostra de referência na medição do coeficiente de absorção, são de superfícies planas. Em suas bordas superiores a placa possui em pequeno chanfrado que foi desconsiderado no modelo. Como as placas são posicionadas adjacentes entre si, a amostra foi considerada no modelo DXF como uma única placa de 3,00 x 3,60 x 0,045 m representando a união das 30 unidades posicionadas na câmara.



Amostra

Figura I.2 - modelo da amostra construído no arquivo DXF

Como mencionado anteriormente, as entidades *CIRCLE* não são reconhecidas pelo RAYNOISE. Como os difusores suspensos são placas encurvadas de madeira, estes não possuem faces planas. Tendo em vista a limitação do software RAYNOISE em reconhecer curvas e tendo-se adotado como principal entidade no AutoCAD o *3DFACE*, optou-se pela discretização

dos encurvamentos dos difusores em segmentos de reta que configuraram, estes sim, um somatório de faces planas.

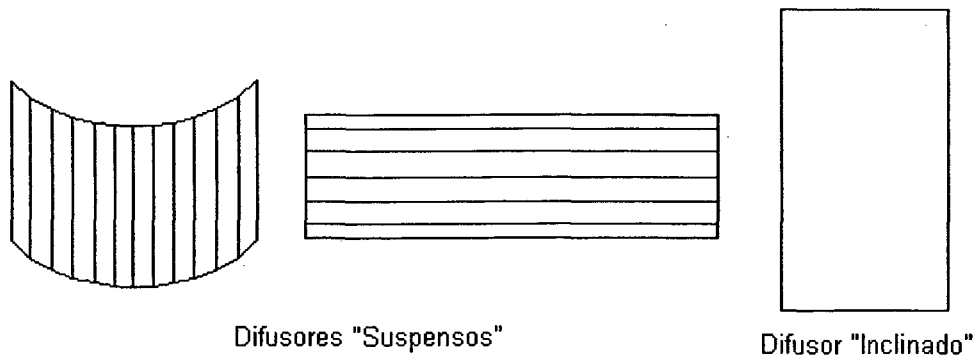


Figura I.3 - modelos dos difusores construídos no arquivo DXF

Terminada a construção do modelo da câmara reverberante no software AutoCAD e a conversão deste para o padrão DXF, a próxima etapa foi a importação deste arquivo pelo RAYNOISE.

Um superfície *3DFACE* no arquivo DXF é importada pelo RAYNOISE como 1 elemento adicional e 4 nós adicionais. Após todas as entidades (ou *3DFACES*) terem sido importadas pelo RAYNOISE, a lista dos nós é checada por coincidência. Todos os nós coincidentes são unidos em apenas um nó. Nós isolados, isto é, aqueles que não ocorrem em nenhum dos elementos da lista de conectividade são detectados e desconsiderados.

Com o modelo importado pelo RAYNOISE e com os nós e elementos verificados, resta a esses elementos a atribuição dos materiais e suas propriedades.

É muito vantajoso o uso de camadas (*layers*) no AutoCAD. Cada conjunto de superfícies no modelo do AutoCAD pode ser colocado em uma camada nomeada, que depois tem seu nome associado a um material.

A camada nomeada de cada entidade pode ser importada pelo RAYNOISE e interpretada como uma série (*set*) de elementos. Isso faz com que a atribuição dos tipos de materiais para os elementos apropriados seja mais fácil.

A importação das camadas no arquivo DXF deve ser feita depois da importação da malha geométrica correspondente, no mesmo arquivo.

A importação das séries (*sets*) somente é possível se elas existirem como definições de camadas (ou *layers*, usando a terminologia do AutoCAD) no arquivo de formato DXF.

Por esse princípio, as 3DFACES projetadas no AutoCAD para a construção dos modelos foram agrupadas em camadas (*layers*) de materiais, que posteriormente, estarão definidas no arquivo DXF.

A partir do arquivo DXF, as camadas são lidas e as séries de elementos criadas, usando nomes de séries automaticamente geradas pelos nomes das camadas (*layers*) no arquivo DXF.

Tabela I.1 - Séries, Elementos e Materiais associados ao modelo de simulação

Série	Elemento	Descrição	Material
1	1 a 6	Câmara	Concreto
2	7 a 12	Amostra	Amostra
3	13 a 24 31 a 66	Difusores I	Difusor
4	25 a 30 67 a 84	Difusores II	Difusor

Com todos os elementos associados em séries e com seus respectivos nomes, a atribuição dos materiais aos elementos, pelo RAYNOISE, dar-se-á muito mais facilmente, bastando atribuir o material já especificado com suas propriedades a série respectiva e, não mais, a cada elemento do material correspondente.

APÊNDICE II

DADOS DE ENTRADA PARA OS MODELOS SIMULADOS

I) Propriedades do Meio

Temperatura:	28 °C
Umidade Relativa:	50%

II) Coeficiente de Absorção

Nas simulações dos modelos da câmara reverberante contendo a amostra de referência e vazia foram definidos 3 materiais:

Material	Elemento Atribuído
Concreto	Câmara Reverberante
Difusor	Difusores
Amostra	Amostra de Referência

Concreto e Difusores

Os coeficientes de absorção das paredes da câmara (material concreto) e dos difusores (material difusor), foram determinados através dos tempos de reverberação medidos para a câmara vazia (sem amostra), utilizando-se a equação do tempo de reverberação de Sabine [$TR = (0,161.V)/(S.\alpha)$].

Tempo de Reverberação médio medido para câmara sem amostra e com 8 difusores suspensos

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
TR (s)	7,01	4,96	4,79	3,81	2,60

$$TR = \frac{0,161.V}{S.\alpha} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{0,161.V}{S.TR}$$

Para

$$V = 144,18 \text{ m}^3 \quad \text{e} \quad S = 187,26 \text{ m}^2$$

$$\alpha = \frac{0,161 \times 144,18}{187,26 \times TR}$$

Tabela II.1 - Coeficientes de Absorção atribuídos aos materiais: concreto e difusor

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
TR	7,01	4,96	4,79	3,81	2,60
α	0,018	0,025	0,026	0,032	0,048

Amostra

Os coeficientes de absorção da amostra foram determinados através das medições de coeficiente de absorção realizadas com a câmara contendo a configuração de difusores simulada (oito difusores suspensos).

Tabela II.2 - Coeficientes de Absorção atribuídos ao material: amostra

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	4000
TR sem amostra	7,01	4,96	4,79	3,81	2,60
TR com amostra	2,92	1,43	1,39	1,27	1,12
α	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00

Valores obtidos do Figura 3.20

III) Fonte Sonora

Foi utilizada uma fonte sonora, com irradiação onidirecional, com potência sonora de 90 dB.

IV) Ruído de Fundo

Não foi atribuído nenhum valor de ruído de fundo.