

JOSÉ AUGUSTO MANNIS

**DESIGN DE DIFUSORES SONOROS A PARTIR
DE PROCESSO SERIAL: ADEQUAÇÃO ACÚSTICA DE
PEQUENAS SALAS À PERFORMANCE E AUDIÇÃO
MUSICAL**

Tese apresentada ao Instituto de Artes da
Universidade Estadual de Campinas, para obtenção
do Título de Doutor em Música.

Área de concentração: Música (Fundamentos
Teóricos)

Orientador: Prof. Dr. Jonatas Manzolli

CAMPINAS

2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
Diretoria de Tratamento da Informação
Sistema de Bibliotecas da UNICAMP

Bibliotecário: Maria Lúcia Nery Dutra de Castro – CRB-8ª / 1724

M316d	<p>Mannis, José Augusto. Design de difusores sonoros a partir de processo serial : adequação acústica de pequenas salas à performance e audição musical / José Augusto Mannis. - Campinas, SP : [s.n.], 2008.</p> <p>Orientadores: Jonatas Manzolli, Stelamaris Rolla Bertoli. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Artes.</p> <p>1. Acústica (Música) 2. Acústica – Vibração. 3. Conforto ambiental. 4. Sonologia (Música) 5. Música – Interpretação. 6. Composição (Música) – Século XX. I. Manzolli, Jonatas. II. Bertoli, Stelamaris Rolla. III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Artes. IV. Título.</p>
-------	---

Título e subtítulo em inglês: Design of sound diffusers by serial procedure : acoustical adequacy of small rooms to musical performance and listening.

Palavras-chave em inglês (Keywords): Acoustic (Music), Acoustic-Vibration, Environmental Comfort, Sonology (Music), Music-performance, Composition (Music)-20th century

Área de Concentração: Música

Titulação: Doutor em Música

Banca examinadora: Jonatas Manzolli; Stelamaris Rolla Bertoli; Mauricio Alves Loureiro; Fernando Henrique Iazzetta; Silvio Ferraz de Mello Filho; Marcos Branda Lacerda; Ricardo Goldemberg

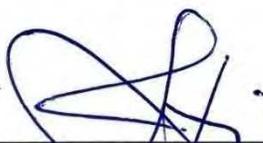
Data da Defesa: 22-02-2008.

Programa de Pós-Graduação em Música

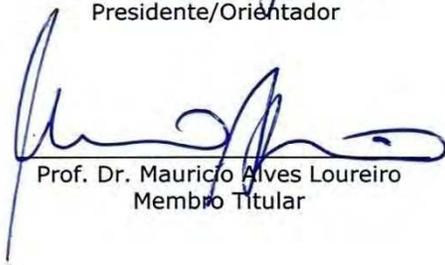
Instituto de Artes

Comissão de Pós-Graduação

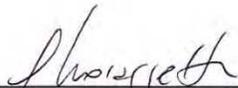
Defesa de Tese de Doutorado em Música, apresentada pelo Doutorando José Augusto Mannis - RA 22305 como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor, perante a Banca Examinadora:



Prof. Dr. Jônatas Manzelli
Presidente/Orientador



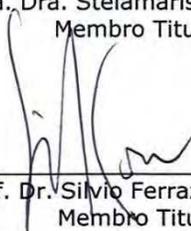
Prof. Dr. Maurício Alves Loureiro
Membro Titular



Prof. Dr. Fernando Henrique de Oliveira Iazzetta
Membro Titular



Profa., Dra. Stelamaris Rolla Bertoli
Membro Titular



Prof. Dr. Silvio Ferraz Mello Filho
Membro Titular

A Helena e Nicole.

In memoriam José Raphael, vô Beppe.

AGRADECIMENTOS

Alexander Mattioli Pasqual (FEM/Unicamp)
Amilcar Zani (ECA/USP)
Carlos Lima e Luca Raele (Estúdio Yb, SP)
Carole Gubernikoff (UNIRIO)
Conrado Silva (UnB)
Denise H. L. Garcia (IA/Unicamp)
Eduardo Guimarães (IEL/Unicamp)
Edson Ezequiel (SESC SP)
Fátima Fernandes
Fernando Iazzetta (ECA/USP), Fabio Kon (IME/USP) e à equipe do projeto *AcMus*
Giovana Bianchi (FEC/Unicamp)
Janaína César e Flávio Cicarelli Sanches (PIT/INOVA/Unicamp)
Jander e José Manoel Abreu (Tétis Ind. Com., RJ)
Janete El Haouli (CECA/UEL)
Jayme de Souza Filho, Magali Cordeiro, Vivien Ruiz, Joice Jane,IVALDO Luis Pessoa (CPG/IA/Unicamp)
Jonatas Manzolli (IA/Unicamp)
Jorge Coli (IFCH/Unicamp)
José Roberto de França Arruda (FEM/Unicamp)
Luiz Vicentini, Valéria S. G. Martins e Gilmar Vicente (SBU-BC/Projeto Petrobras Unicamp)
Marcello Bittencourt e Celso Filho (Rádio USP)
Marcio H. Avelar Gomes (Ecoacústica, SC)
Marcos Branda Lacerda (ECA/USP)
Maria Lucia Nery Dutra de Castro (BC/Unicamp)
Marianne Lyon, Laure Marcel-Berlioz e todo pessoal do CDMC-França (*Cité de la Musique*)
Matilde Perissinotto
Moyses Zindeluk (COPPE/UFRJ)
Raúl Minsburg e Jens Hedman (*North South Project*)
Régis Rossi Alves Faria (LSI/USP)
Renato Cipriano (WSDG-Brasil, MG)
Roberto de Alencar Lotufo, Rodrigo Guerra, Daniela de A. Manoel, Felipe de Castro Pereira, Ciro de la Cerda, Paulo Lemos (INOVA/Unicamp)
Sérgio e Andréa Mannis Gabriel
Silvio Ferraz (IA/Unicamp)
Stelamaris Rolla Bertoli (FEC/Unicamp)
Thiago Marcel Campi (FEC/Unicamp)
A colegas, amigos e parentes que incentivaram e contribuíram para que este trabalho se realizasse com sucesso
Ao Todo, pela luz e pelo aprendizado.

“Nada está em repouso, tudo se move, tudo vibra.”

O Caibalion

Resumo

Este trabalho é dirigido a soluções de conforto acústico para escuta e performance musical, considerando sobretudo aspectos psicoacústicos da escuta subjetiva de músicos e especialistas nesta área.

A partir de critérios de avaliação acústica de salas para música em Beranek e princípios de *design* e funcionamento dos difusores de Schroeder, a pesquisa apresenta soluções originais de concepção e *design* de difusores a partir da técnica de composição musical com 12 sons de Schoenberg, e pode ser qualificada como inovação tecnológica.

A escuta técnica e de apreciação musicais são ao mesmo tempo base, guia e eixo deste trabalho, assim como a melhoria de condições permitindo escutas de boa qualidade é seu objetivo. Perguntas como: “O que acontece no som que é importante para os músicos em performance?”, “Como e o que o músico ouve?” e “O que é importante para a escuta musical?” estão profundamente presentes tanto neste trabalho quanto nos trabalhos de Beranek que, por essa razão, foi, teoricamente, um dos pontos de partida adotados. A pesquisa aqui realizada, bem como este trabalho, situa-se na confluência de três grandes áreas do conhecimento: Artes e Humanidades (Música, Sonologia, Arquitetura), Ciência (Física: Acústica) e Tecnologia (Engenharia de áudio, Acústica aplicada, com alguns recursos de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica).

Na introdução é destacada a importância do som e do silêncio tanto na música quanto na acústica. Como fundamentação teórica há uma exposição ampla de princípios de acústica relacionados, tipologia das simetrias, elementos da técnica de composição musical serial, aspectos desejáveis e indesejáveis em auditórios, parâmetros de avaliação acústica de salas, princípios e funcionamento de difusores acústicos.

São propostas três soluções para novos tipos de difusores, bem como apresentados dois projetos detalhados de adequação acústica de salas para música onde são aplicados, com medição de resultados em um dos casos. É apresentada e discutida uma simulação de desempenho das superfícies seriais através de análise modal, verificando a qualidade e desempenho esperados dos difusores concebidos.

Abstract¹

This study is aimed at acoustic comfort solutions for music listening and performance by mainly considering psychoacoustic aspects related to subjective listening of musicians and specialists concerned with this field of knowledge.

Starting from acoustic evaluation criteria of music rooms (opera houses and concert halls) in Beranek and principles of design and operation of Schroeder Diffusers, this piece of research presents original solutions and conception as well as design solutions for diffusers by taking Schoenberg's 12-sounds musical composition technique as a starting point. This research can be qualified as technological innovation.

Simultaneously, both technical listening and music appreciation listening stand for a basis, a guide, and a main point for this work, as well as the improving conditions that allow good quality listenings makes up its objective. Questions such as: "What is important in the sound for performing musicians?", "How and what does the musician listen to?" and "What is important for music listening?" are deeply present either in this research or in Beranek's works, which therefore have been theoretically deemed as one of the starting points in use. The research undertaken – as well as this work – lays within the confluence of three major fields of knowledge: Arts and Humanities (Music, Sonology, Architecture), Science (Physics: Acoustics), and Technology (Audio Engineering, Applied Acoustics, in addition to a few resources from Civil Engineering and Mechanical Engineering). The introduction emphasizes the importance of sound and silence either in music or acoustics.

The theoretical basis include an extensive exposition of related acoustic principles, symmetry types, elements of serial musical composition technique, desirable and undesirable aspects in auditoriums, acoustic evaluation parameters of rooms, principles and operation of acoustic diffusers.

Three solutions are proposed for new types of diffusers. Two detailed projects of acoustic appropriateness are presented for music rooms and concert halls, where they are applied and, in one of

¹ Título e subtítulo em inglês: Design of sound diffusers by serial procedure : acoustical adequacy of small rooms to musical performance and listening.

the cases, results therefrom are measured. A simulation of the performance obtained in serial surfaces through modal analysis by checking both quality and performance expected from the conceived diffusers is presented and discussed.

Resumé²

Ce travail est dirigé à des solutions de confort acoustique pour l'écoute et l'interprétation musicales, tenant compte surtout des aspects psicoacoustiques de l'écoute subjective des musiciens et spécialistes dans ce domaine.

A partir de critères d'évaluation acoustique des salles pour la musique d'après Beranek, ainsi que des principes de design et fonctionnement des diffuseurs de Schroeder, cette recherche présente des solutions originales pour la conception et le design des diffuseurs acoustiques à partir de la technique de composition musicale avec 12 sons de Schoenberg et pourrait être qualifiée comme innovation technologique.

Dans ce travail, l'écoute technique et l'écoute d'appréciation musicale constituent la base, le jalon et l'axe, ainsi que l'amélioration des conditions envisageant la bonne qualité d'écoute constituent son but. Des questions telles que: "Que se passe-t-il d'important au niveau du son pour les musiciens lors de l'interprétation?", "Qu'est-ce que le musicien écoute et comment écoute-t-il?" et "Qu'est-ce que c'est important pour l'écoute musicale?" ce sont des questions vraiment présentes dans ce travail, autant que dans ceux de Beranek que, pour cette raison, ont été l'un des points de départ théorique ici adopté. Cette recherche, ainsi que cette thèse, se situe à la confluence de trois grands domaines de la connaissance: Arts et Humanités (Musique, Sonologie, Architecture), Science (Physique: Acoustique) et Technologie (Génie et technologie audio, Acoustique appliquée, ressources de Génie Civil et Génie Mécanique).

² Título e subtítulo em francês: Conception de diffuseurs acoustiques par procédure sérielle: adéquation acoustique de petites salles à la performance et audition musicales.

Depuis l'introduction, l'importance du silence et du son pour la musique et pour l'acoustique est mise en évidence. À la partie de fondamentation théorique nous présentons une large exposition de principes d'acoustique impliqués, typologie des symétries, éléments de la technique de composition musicale sérielle, aspects désirables et indésirables dans les auditoriums et les salles de musique, paramètres d'évaluation acoustique des salles, principes et fonctionnement des diffuseurs acoustiques.

Trois nouvelles solutions de diffuseurs sont proposées, ainsi que deux projets d'adéquation acoustique de salles pour la musique sont présentés en détail, dont l'un des résultats avec mesure acoustique. Une simulation par analyse modale vérifie la qualité et la performance espérées pour ces diffuseurs.

Áreas de conhecimento

Artes (Música); Ciências Sociais Aplicadas (Arquitetura e Urbanismo (Adequação Ambiental)); Ciências Exatas e da Terra (Física(Acústica)); Engenharias (Engenharia Civil (Construção Civil, Controle Ambiental)).

Areas of knowledge

Arts (Music); Applied Social Sciences (Architecture and Urbanism (Environmental Adequacy)); Hard Science (Physics (Acoustics)); Engineering (Civil Engineering(Construction Engineering, Building Acoustics))

Domaines de la connaissance

Arts (Musique); Sciences Sociales Appliquées (Architecture et Urbanisme (Adéquation de l'environnement)); Sciences Exactes (Physique (Acoustique)); Génie (Génie Civil (Construction, Acoustique))

ERRATA: p. 164 – 1º parágrafo, 3ª linha: o que equivale a uma atenuação de **1,55 dB**

Palavras-chave

INDEXAÇÃO UNICAMP: Acústica (Música), Acústica-Vibração, Conforto ambiental, Sonologia (Música), Música-interpretação, Composição (Música)-Século XX

OUTRAS: Acústica de salas, Auditórios, Concerto (Música), Conforto acústico, Tratamento acústico, Adequação acústica, Critérios de avaliação acústica, Música e tecnologia, Música serial, Simetria, Composição musical, Reverberação, Preenchimento do som, Difusores acústicos, Superfícies difusoras acústicas, Estúdios de gravação, Análise modal, Modos normais, Modos de vibração.

Keywords

INDEX UNICAMP: Acoustic (Music), Acoustic-Vibration, Environmental comfort, Sonology (Music), Music-performance, Composition (Music)-20th century

OTHERS: Room acoustics, Auditorium, Music halls, Concert (Music), Acoustic comfort, Acoustic treatment, Acoustic adequacy, Acoustic criteria evaluation, Music and technology, Serial music, Symmetry, Musical composition, Reverberation, Fullness of tone, Acoustical diffusers, Diffusing acoustical surfaces, Modal analysis, Normal modes, Vibration modes.

Mots-clefs

INDEX UNICAMP: Acoustique (Musique), Acoustique-Vibrations, Confort de l'environnement, Sonologie (Musique), Musique-performance, Composition (Musique)-20ème siècle

AUTRES: Acoustique des salles, Auditorium, Salles de musique, Concert (Musique), Confort acoustique, Traitement acoustique, Adéquation acoustique, Critères d'évaluation acoustique, Musique et technologie, Musique sérielle, Symétrie, Composition musicale, Reverberation, Remplissement du son, Diffuseurs acoustiques, Surfaces acoustiques diffuseuses, Analyse modale, Modes normaux, Modes de vibration.

Lista das figuras

- Figura 2.1 – Imagem atual do *Fogg Art Museum Norton Lecture Hall, Harvard University* – *Massachusetts*, EUA, com capacidade para 373 pessoas. Fonte: <http://www.fas.harvard.edu/~ims/Class/foggnorton.html>59
- Figura 2.2 – *Symphony Hall, Boston*, EUA. Fonte: <http://www.bso.org/genC/genCThree.jhtml?id=cat20118&area=inf>.....59
- Figura 3.1 – (A) forma geométrica, (B) termos sequenciais e (C) frase musical, empregados para a realização dos exemplos de simetria.....64
- Figura 3.2 – Três exemplos de translação de um elemento geométrico: deslocamento num espaço onde as coordenadas são de grandezas idênticas.....65
- Figura 3.3 – *Simetria translacional ordinal*, aplicada em música no domínio do tempo: *Repetição*...66
- Figura 3.4 – *Simetria translacional de valores*, aplicada em música no domínio da frequência: *transposição*. No caso, a frase original foi transposta um intervalo de uma quinta justa abaixo.....66
- Figura 3.5 – *Simetria axial*: espelho.....67
- Figura 3.6 – *Simetria axial ordinal*: (A) *retrogradação (simetria axial em relação ao tempo)* (eixo de simetria no final do terceiro compasso) e (B) *simetria axial de valor inverso a um módulo (simetria axial em relação à frequência)*, tecnicamente denominada *inversão* (eixo de simetria na altura da nota Sol, considerando essa nota na segunda linha na clave de sol).....70
- Figura 3.7 – *Simetria rotacional*: elemento rodado.70
- Figura 3.8 – *Simetria rotacional*: *retrógrado da inversão*.71
- Figura 3.9 – Comparação dos gráficos resultantes das seqüências numéricas em diversos tipos de *simetrias*: (A) *translacional ordinal*, (B) *translacional de valores*, (C) *axial ordinal*, (D) *axial de inversão a um módulo*, (E) *rotacional*.....71
- Figura 3.10 – (A) Câmara Anecóica: campo livre ou campo direto; (B) Câmara Reverberante: campo difuso.77
- Figura 3.11 – *Som direto* e resíduo do *som reverberante*. *Tempo de reverberação*: intervalo de tempo para que o som reverberante decaia de 60dB.77

Figura 3.12 – Nível sonoro em função da distância em relação à uma fonte situada em uma sala possuindo reverberação. D_c é a <i>distância crítica</i> , na qual o som direto tem o mesmo nível que o som reverberante.	86
Figura 3.13 – <i>Som direto</i> (tom escuro) e <i>primeiras reflexões</i> (tom claro) recebidas pelo ouvinte.	90
Figura 3.14 – Som direto, <i>primeiras reflexões</i> e reverberação.	90
Figura 3.15 – As quatro regiões de uma sala: X , A , B e C . Fonte: Everest (1988b, p. 43, fig. 3-1)	92
Figura 3.16 – Representação do volume de uma sala retangular: L – largura; W – profundidade; H – altura (pé direito).....	94
Figura 3.17 – Tipos de <i>modos normais</i> em uma sala fechada: (A) axial, (B) tangencial e (C) oblíquo. Fonte: Cooper (1996, p. 52, fig. 2-17).....	95
Figura 3.18 – <i>Modo normal</i> tipo <i>axial</i> : ondas estacionárias entre duas superfícies paralelas.. Representação dos quatro primeiros harmônicos pela variação do âmbito de pressão sonora: (A) fundamental ou primeiro harmônico $f = c/2L$; (B) segundo harmônico $2f$; (C) terceiro harmônico $3f$; (D) quarto harmônico $4f$. Os vales, pontos nulos, são os nós das ondas estacionárias, com pressão igual a zero e onde as partículas atingem velocidade máxima.	96
Figura 3.19 – Análise pelo <i>critério de Bonello</i> correspondendo às medidas (A) 5,7 x 6,0 x 3,14m (L x W x H).	99
Figura 3.20 – Análise pelo <i>critério de Bonello</i> correspondendo às medidas (B) 5,0 x 6,0 x 4,0m. A acumulação de frequências modais é progressiva e uniforme.	99
Figura 3.21 – Análise pelo <i>critério de Bonello</i> correspondendo às medidas (C) com 1,5 x 8,0 x 2,3m. Resultado irregular e evolução descontínua da acumulação dos modos pelas bandas de frequência.	99
Figura 3.22 – <i>Diagrama de Bolt, Beranek e Newman</i> de proporções entre dimensões de uma sala ($L \times W \times H$). A partir da menor delas (Z) e da maior (Y) são calculadas as proporções: $z/z : y/z : x/z$ O resultado deve estar compreendido no interior da figura ao lado.	100

Figura 3.23 – Planilha desenvolvida por Edu Silva para obtenção do resultado de verificação pelo <i>diagrama de Bolt, Beranek e Newman</i> a partir das medidas <i>comprimento, largura e altura</i> do local.....	101
Figura 3.24 – Resultados de avaliação de proporções de salas pelo <i>critério de Bonello</i> e pelo <i>diagrama de Bolt, Beranek e Newman</i> : 15 x 8 x 22m (acima), 13 x 8 x 19m (ao centro), 14 x 11 x 19m (abaixo).	102
Figura 3.25 – Comparação dos campos sonoros resultantes de cálculos bidimensionais com elementos finitos de uma sala retangular e de outra irregular com a mesma área. Fonte: Nieuwland e Weber (1979).....	103
Figura 3.26 – Caimento da reverberação em sala tendo (A) Modos isolados nas bandas de freqüência; (B) <i>modos normais</i> com freqüências próximas na região grave; (C) Vários modos atuando numa mesma banda de freqüência. Fonte: Everest (1988b, p. 54).	105
Figura 3.27 – Zonas de <i>reflexão, difração</i> ou sem efeito em decorrência de obstáculo colocado no trajeto de uma onda plana – relação entre a dimensão do obstáculo e o comprimento de onda λ . N.B.: As linhas mais escuras marcam as mudanças do passo de avanço no eixo x.	107
Figura 3.28 – Som direto em campo livre.	108
Figura 3.29 – <i>Som direto</i> dos instrumentos de cordas com suas vibrações finais, após o término da excitação.	108
Figura 3.30 – Diferentes <i>tempos de reverberação</i> (RT_{60}) em importantes salas de concerto medidas com público. Aquelas que tiveram melhores resultados em diversos parâmetros de avaliação de Beranek estão evidenciadas. Fonte: Beranek (1996, p. 55-58).	109
Figura 3.31 – D_{50} – <i>definição</i> como proposto por Galindo (1999): A razão entre a energia nos primeiros 50ms do som e a energia total do som (em %).	112
Figura 3.32 – C_{80} – <i>clareza</i> como proposto por Galindo (1999): A razão logarítmica entre a energia nos primeiros 80ms e a energia de 80ms até a extinção do som (em dB).	112
Figura 3.33 – <i>Inteligibilidade</i> : grau de isolamento com que se pode perceber os sons discernindo uns dos outros. Os pontos da ilustração representam eventos sonoros. A prolongação de cada ponto representa a reverberação que o local lhe proporciona.	

Na linha superior temos um contexto onde há *inteligibilidade* e pouco *preenchimento do som*. Na linha mediana há *inteligibilidade* e bom *preenchimento do som*. Na linha inferior, há o mesmo *preenchimento do som* que na linha mediana, mas não há *inteligibilidade*, pois os eventos sonoros estão muito próximos e se fusionam. .113

- Figura 3.34 – Linha de tendência correlacionando $C_{80}(3)$ a RT_{60} (tempo de reverberação em 500Hz com a sala ocupada) a partir dos dados de importantes salas de concerto no mundo.116
- Figura 3.35 – Linhas de tendência correlacionando $C_{80}(3)$ (*linha escura*) e EDT (*linha cinza pontilhada*) ao RT_{60} (tempo de reverberação em 500Hz com a sala ocupada) em salas de música de câmara. Fonte: Beranek (2004, p. 551).....117
- Figura 3.36 – *Nível de pressão sonora* x *tempo* para indicação de leitura do parâmetro $(EDT/RT_{60})-1$118
- Figura 3.37 – Linhas de tendência correlacionando $C_{80}(3)$ (*linha escura*) e $(EDT/RT_{60})-1$ (*linha cinza pontilhada*) ao RT_{60} (tempo de reverberação em 500Hz com a sala ocupada) em salas de música de câmara. Fonte: Beranek (2004, p. 551).....119
- Figura 3.38 – *Intimidade*. A *primeira reflexão* chega ao ouvinte logo após o *som direto*. Quanto menor o intervalo de tempo entre ambos (IDT), melhor a *intimidade*. O IDT pode ser previsto e controlado pela diferença entre as trajetórias do som direto e da primeira reflexão.....120
- Figura 3.39 – Resposta típica do *tempo de reverberação* em função da frequência quando uma sala reverberante (RT_{60} acima de 1,8s) tem um bom parâmetro *calor*.....124
- Figura 3.40 – Âmbito de tolerância em função da frequência do *Tempo de Reverberação* RT em relação ao $RT_{recomendado}$ para música (A) e para a fala (B). Fonte: AHNERT e SCHMIDT (s.d.) (Fig. 1-2, p. 9; Fig. 1-3, p.10) <http://www.renkus-heinz.com/easera/EASERAAppendixUSPV.pdf>133
- Figura 3.41 – Incômodo (em %) produzido pelo *eco* em função da intensidade e do atraso do som refletido. Fonte: Haas (1972, p. 156, fig. 12).....134
- Figura 3.42 – Coeficientes de absorção de painéis de compensado de 1/8 inch (1) firmemente montado nas bordas, e (2) com as bordas sobre material resiliente. Fonte: P. E. Sabine e Ramer (1948, p. 269, fig. 4).....140

Figura 3.43 – Absorção sonora de painéis de compensado com absorventes por trás. (2A) com absorvente não fixado; (2B) com absorvente fixado ao compensado. Fonte: P. E. Sabine e Ramer (1948, p. 268, fig. 2).....	140
Figura 3.44 – Absorção característica de uma membrana, conforme Kuttruff (2000).....	141
Figura 3.45 – Modelo elementar de um sistema de membrana composto por um painel de madeira e camada de ar.	141
Figura 3.46 – Vista superior de parede lateral com irregularidades constantes.	142
Figura 3.47 – <i>Flutter echo</i> : rebotes entre superfícies paralelas.	143
Figura 3.48 – Configurações de superfícies gerando <i>flutter echo</i> . Fonte: Long (2006, p. 752, fig.21-8).....	143
Figura 3.49 – Sobreposição de um sinal a ele mesmo (pressão sonora x tempo) defasado de Δt	144
Figura 3.50 – Alteração típica do nível de pressão sonora em decibels (em função da frequência) de um sinal que passou por um processo de filtragem tipo <i>comb filter</i>	145
Figura 3.51 – Convergência de reflexões em um foco devido a superfície reflexiva côncava. Fonte: Cooper (1996, p. 57, fig. 2-21).....	145
Figura 4.1 – Esquema básico de um difusor por <i>reflexão com interferência de fase</i> . – (A) e (B) cavidades ; – (C) largura W da cavidade; – (D) período de seqüenciamento das cavidades; – (E), (F) e (G) profundidades das cavidades $[d_n]$	146
Figura 4.2 – Largura das cavidades W , delimitadas por lâminas separadoras. A figura mostra o corte transversal de um difusor.	148
Figura 4.3 – Incidência de onda : (A) $\lambda < \lambda_{min}$; (B) $\lambda = \lambda_{min} = 2W$	148
Figura 4.4 – Imagens de difusores unidimensionais: (A) com separadores de cavidades e (B) com saliências.	155
Figura 4.5 – Difusores bidimensionais: (A) com saliências e (B) com separadores de cavidades.	159
Figura 4.6 – Predição e medição de coeficiente de absorção de um QRD bidimensional, $N=7$. Fonte: Fujiwara (1995, p. 214, fig. 21.3).....	163
Figura 4.7 – Distribuição das velocidades de partícula ao redor de um QRD unidimensional. Fonte: Ando e Noson (1997, p. 216, fig. 21.5).....	163

Figura 4.8 – Características espaciais da dissipação de energia. Fonte: Onitsuka e Kawakami (1997, p. 207, fig. 20.3).....	164
Figura 4.9 – Vetores das velocidades de partícula e contornos em três instantes diferentes : 4,65ms 6,15ms e 6,90ms. Modelo 1 - QRD(sic) ($W = 180\text{mm}$, $d = 120-540\text{mm}$); Modelo 2 – cavidades iguais ($d = 300\text{mm}$); Modelo 3 – superfície plana. Fonte: Onitsuka e Kawakami (1997, p. 205, fig. 20.1).	165
Figura 4.10 – Espalhamento produzido por dois QRD em 1KHz, um com $W=3\text{cm}$ e outro com $W=10\text{cm}$. A largura de ambos permanece a mesma, aumentando-se o número de períodos. A superfície plana tem a mesma extensão. Fonte: Cox e D’Antonio (2003, p. 6, fig. 6).....	166
Figura 4.11 – QRD com $N=7$ em 3KHz com diferentes números de períodos. Fonte: Cox e D’Antonio (2003, p. 7, fig. 8)	167
Figura 4.12 – Corte vertical de difusor QRD com modulação entre $N=5$ e $N=7$ e seqüência de modulação $\{1,0,0,1,0,1\}$. Fonte: Cox e D’Antonio (2003, p. 15, fig. 13)	169
Figura 4.13 – Seqüências de resíduos quadráticos originais e invertidos ($N=5$). Fonte Angus (1995a, p. 7 fig. 5).....	170
Figura 4.14 - <i>Sequence inversion keying</i> (SIK) : S = seqüência original e SI = inversão.	170
Figura 4.15 - Energia refletida em função ângulo comparando um difusor periódico, um difusor com um único período e um difusor modulado. Fonte: Angus (1995, p. 9, fig. 7)	171
Figura 4.16 - Alinhamento modulado de $N=5$ períodos para a seqüência de Barker e QRD $N=7$. Fonte: Cox e D’Antonio (2003, p. 16, fig. 14).....	171
Figura 4.17 - Dispersão polar de um QRD com um único período, comparado a um arranjo periódico e uma modulação com seqüência de Barker combinando original e sua inversão. Fonte: Cox e D’Antonio (2003, p. 17, fig. 15)	172
Figura 4.18 – Performance de difusão de um difusor por interferência de fase QR em função da freqüência em comparação com uma superfície plana. Fonte: Angus (op. cit., p. 147, fig. 2).....	174
Figura 4.19 – Elementos do gráfico da <i>Figura 4.18</i> fragmentados para comparação, evidenciando assim a similaridade e o padrão de repetição.	174

Figura 5.1 – Difusor de arcos cilíndricos. Fonte: Fujiwara (1995a, p. 212).....	177
Figura 5.2 – Difusores de Schroeder (QRD) na parede ao fundo do Carnegie hall. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 24, fig. 2.1).....	179
Figura 5.3 – Difusores curvos otimizados (OptiCurve™) no Hummingbird Centre, Toronto. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 25, fig. 2.2).....	179
Figura 5.4 – Exemplo de difusor OptiCurve™. Fonte: RPG Diffusor Systems http://www.rpginc.com/products/opticurve/index.htm	180
Figura 5.5 – Elementos de uma superfície híbrida fabric: material absorvente, máscara e tecido e uma superfície híbrida curva concluída DigiWave™. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 314-315, fig. 11.1 e 11.4).....	181
Figura 5.6 – Superfície híbrida plana (BAD panel) em um home theater (painéis quadrados à esquerda dos ouvintes e à direita da ilustração.	181
Figura 5.7 – Sala de prática musical tratada com difusores de Schroeder bi-dimensionais (teto) e unidimensionais (parede ao fundo). Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 40, fig. 2.14) e site RPG Diffusor Systems http://www.rpginc.com/	182
Figura 5.8 – <i>Cinerama Theatre, Seattle, WA</i> , com difusores OptiCurve™ no teto, minimizando colorações produzidas pelas primeiras reflexões. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p.46, fig. 2.21) Foto: University of Salford.....	183
Figura 5.9 – Quarteto de cordas Cavani em execução diante de rebatedores VAMPS® no <i>Cleveland Institute of Music</i> . Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 50, fig. 2.26)	184
Figura 5.10 – Difusores no palco do <i>Corning Glass Centre</i> , em Nova Iorque. Acima de cada elemento, após os difusores, pode-se observar uma aba a 45°. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 52, fig. 2.28) Foto © Paul Warchol Photography, www.warcholphotography.com	185
Figura 5.11 – Difusores de curvas otimizadas (OptiCurve™) no Edwina Palmer Hall. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 54, fig. 2.30) Foto: Arup Acoustics.....	185
Figura 6.1 – 11 notas do total cromático (<i>do</i> a <i>si</i> = 1 a 12). Intervalos constantes e iguais a 1 semitom (segunda menor)	187
Figura 6.2 – Série com vários intervalos.....	188

Figura 6.3 - Série com <i>simetria axial</i> no domínio das alturas musicais de tipo <i>inversão</i> . O eixo vertical, de 1 a 12, representa as notas musicais, indicadas no eixo das abscissas na ordem em que aparecem na série exposta na pauta musical acima desta ilustração: 1° (C#=2), 2° (C=1), 3° (F=6), 4° (D=3), 5° (G#=9), 6° (E=5), 7° (Bb=11), 8° (B=12), 9° (F#=7), 10° (A=10), 11° (Eb=4) e 12° (G=8).....	189
Figura 6.4 – Série da <i>Sinfonia op.21</i> de Webern: <i>simetrias</i> no domínio das alturas musicais: <i>axial</i> (retrogradação) e <i>translacional</i> (transposição) da retrogradação, 6 semitons acima, ou seja, de A (lá) para Eb (mi bemol). As alturas da série estão indicadas no eixo das abscissas na ordem em que aparecem na série exposta na pauta musical desta ilustração: 1° (F=11), 2° (Ab=14), 3° (G=1), 4° (F#=12), 5° (Bb=4), 6° (A=15), 7° (Eb=21), 8° (E=10), 9° (C=18), 10° (C#=7), 11° (D=20) e 12° (B=17). Observe que a nota mais grave G (Sol) leva, neste exemplo, o número 1 (um).....	190
Figura 6.5 – Quadro com a série <i>original</i> , séries derivadas e todas as transposições.	192
Figura 6.6 – Série <i>original</i> da <i>Figura 6.5</i>	192
Figura 6.7 – Série <i>retrograda</i> (<i>simetria axial</i> no domínio do tempo) à série <i>original</i> da <i>Figura 6.5</i>	193
Figura 6.8 – <i>Inversão</i> (<i>simetria axial</i> no domínio da freqüência) da série <i>original</i> da <i>Figura 6.5</i>	193
Figura 6.9 – <i>Retrogrado da inversão</i> (<i>simetria rotacional</i>) da série <i>original</i> da <i>Figura 6.5</i>	193
Figura 6.10 – Primeira <i>transposição</i> (<i>simetria translacional</i> no domínio da freqüência) da série <i>original</i> da <i>Figura 6.5</i>	193
Figura 6.11 – Ditado latino: “O semeador Arepo mantém a obra num movimento circular.” (WEBERN, 1980, p. 145).....	194
Figura 7.1 – Seqüência numérica gerada por raiz primitiva em base 3, módulo 17. (Cf. <i>Figura 7.16</i> , p. 222).....	203
Figura 7.2 – Vista geral da planilha de cálculo gerada para a concepção de superfícies assistida por computador.....	207
Figura 7.3 – A partir da situação da <i>Figura 7.2</i> : <i>Inversão</i> (de -1 para +1) (o gráfico passou para o lado positivo do eixo das ordenadas) e alteração do ângulo de incremento γ de 8° para 6° (em cima à esquerda), prolongando e abrindo o todo.	208

- Figura 7.4 – Alteração do ângulo de incremento γ de 6° para 3° (em cima à esquerda), prolongamento do comprimento geral, abertura e atenuação dos ângulos. Tendo três inclinações idênticas de -15° este resultado não é muito interessante.209
- Figura 7.5 – Mudança ângulo θ inicial de $30,29^\circ$ para $60,29^\circ$, causando leve rotação no sentido anti-horário em relação à origem; alteração do código de embrião da superfície de (0,1,4,7,2,3,10,1,0,9,6,11,6,1,12) para (0,1,4,5,8,7,2,11,12,5,8,9,8,13,8) (segunda coluna à esquerda “incr”).....209
- Figura 7.6 – Mudança do código de embrião da superfície de (0,1,4,5,8,7,2,11,12,5,8,9,8,13,8) para (0,1,6,3,4,7,8,5,6,17,2,5,10,7,12) (segunda coluna à esquerda “incr”).....210
- Figura 7.7 – Alteração do fator de incremento de crescimento da superfície da figura anterior β de 1,07 para 1,02 (em cima à esquerda), gerando encolhimento.....210
- Figura 7.8 – Alteração do fator de incremento de crescimento da superfície da figura anterior β de 1,02 para 1,10 (acima à esquerda).....211
- Figura 7.9 – O contraste entre o comprimento dos segmentos (que representam largura dos painéis formadores da superfí) pode ser aumentado modificando os valores $F1 - F2 - F3$ de 0,30 – 0,88 – 0,45 para 0,25 – 1,40 – 0,50. Compensando o aumento de comprimento do conjunto, o fator de incremento β é diminuído para 1,05. Observa-se que a angulação dos segmentos é a mesma que na Figura 7.8, porém os elementos estão mais contrastados entre si.....211
- Figura 7.10 – Imagem ilustrando a visão da textura de tubos. Fonte:
http://centros5.pntic.mec.es/ies.carpe.diem/foto_comenius/2004-05/el%20cielo%20por%20tubos%20de%20acero.jpg acessada em 10/01/2008 18:25.....212
- Figura 7.11 – Elementos semicilíndricos dispostos com organização serial dos diâmetros e centros alinhados em eixo inclinado.213
- Figura 7.12 – Ilustração da evolução dos intervalos entre os elementos (alturas) da série de 12 notas mostrada na *Figura 6.3*. Nota-se uma *simetria rotacional* com *pivot* (ponto quadrado ao centro) no intervalo de trítono (4^a aumentada ou 5^a diminuída).218
- Figura 7.13 – Ilustração da evolução dos intervalos entre os elementos (alturas) da série de 12 notas mostrada na *Figura 6.4*. Nota-se igualmente à figura anterior uma *simetria*

<p><i>rotacional com pivot</i> (ponto quadrado ao centro) no intervalo de trítono (4ª aumentada ou 5ª diminuída).....</p>	219
<p>Figura 7.14 – <i>QRD</i> $N=17$: seqüência σ_n : <i>simetria axial</i> no tempo (<i>retrogradação</i>). Na seqüência das diferenças entre as profundidades ($\sigma_{n+1} - \sigma_n$) uma <i>simetria rotacional</i>.....</p>	220
<p>Figura 7.15 – <i>PR₂D</i> $N=17$: a seqüência σ_n é literalmente repetida (<i>simetria translacional</i> no tempo) a partir da metade (9ª profundidade). Porém, na seqüência das diferenças entre as profundidades ($\sigma_{n+1} - \sigma_n$) : mesma simetria – <i>translacional</i>.....</p>	221
<p>Figura 7.16 – <i>PR₃D</i> $N=17$: Seqüência σ_n : a partir da metade (9ª profundidade) a seqüência inicial (da 1ª à 8ª profundidade) se repete <i>invertida</i>, portanto, com <i>simetria axial</i>. Seqüência das diferenças entre as profundidades ($\sigma_{n+1} - \sigma_n$) : mesma simetria – <i>inversão</i>. ..</p>	222
<p>Figura 7.17 – (esq.) Sala de captação de som do estúdio do LAMI (USP) com uma das superfícies difusoras ao fundo; (dir.) Palco da Sala Villa-Lobos (UNIRIO) em reforma executando o projeto elaborado.....</p>	223
<p>Figura 7.18 – Vista em perspectiva da sala de captação de som do Estúdio do LAMI/ECA/USP.</p>	224
<p>Figura 7.19 – Espaço de captação de som do Estúdio do LAMI/ECA/USP: (A) Planta (Vista Superior) (B) Vista Lateral.</p>	225
<p>Figura 7.20 – Elevação e planta da Sala Villa-Lobos da Uni-Rio ao ser visitada antes da elaboração do projeto.</p>	230
<p>Figura 7.21 – <i>Auditório</i>, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Resultado com proporções de Bolt, Beranek e Newman: (A) não adequadas; (B) adequadas.....</p>	232
<p>Figura 7.22 – <i>Auditório</i>, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Diagrama do <i>critério de Bonello</i>: (A) Ligeira perda em 40Hz e reforço m 50 e ligeiro em 80Hz; (B) Ligeiro reforço em 32Hz, reforço em 80Hz e ligeira perda em 40Hz.</p>	232
<p>Figura 7.23 – <i>Cabine</i>, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Resultado com proporções de Bolt, Beranek e Newman: (A) fora da área e mesmo fora do quadro – não adequada; (B) próxima ao limite.</p>	233
<p>Figura 7.24 – <i>Cabine</i>, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Diagrama do <i>critério de Bonello</i>: (A) Perda em 202Hz; (B) Perda em 101Hz e ligeira em 202Hz.</p>	233
<p>Figura 7.25 – Painéis justapostos.....</p>	238

Figura 7.26 – Superfície $\sigma_{g,15} A$ – vista superior de uma superfície LNSS e na tabela acima detalhamento das coordenadas e ângulos da mesma. A superfície LNSS pode ser comparada a um biombo com abas de diferentes tamanhos. Vista de cima seu aspecto é de segmentos que se articulam por um eixo de rotação.	239
Figura 7.27 – Superfície $\sigma_{g,15} A$ – aspecto concluído da superfície gerada: (A) solução linear e (B) solução arredondada.	240
Figura 7.28 – (A) $\beta = 1,0$; (B) $\beta = 1,15$	242
Figura 7.29 – (A) $\phi = -1$ e (B) $\phi = 1$	243
Figura 7.30 – (A) $\gamma = 9^\circ$ e (B) $\gamma = 5^\circ$	243
Figura 7.31 – Superfície $\sigma_{g,15} B$ – superfície gerada com outra seqüência, agora com 15 termos e $N=14 : (0,1,4,3,6,9,10,5,4,13,2,7,6,5,10)$ – (A) solução linear; (B) solução arredondada.	244
Figura 7.32 – LNSS2: série geral composta.	246
Figura 7.33 – Vista superior do estudo das inclinações esquerdo-direita das placas da superfície. (A) primeira fileira – inclinações de 10° ; (B) segunda fileira – inclinações de 20° ; (C) terceira fileira – o eixo da fileira com inclinação de 20° , foi modulado mais uma vez, dando inclinações a blocos inteiros de elementos solidários.	247
Figura 7.34 – (A) superfície de placas com inclinação lateral: elevação da superfície após procedimento mostrado na <i>Figura 7.33</i> ; (B) as mesmas placas, porém acrescentando inclinação frente-trás.	247
Figura 7.35 – Exemplo de placa triangular para fechamento dos vãos.	248
Figura 7.36 – Placas de fechamento (A) e (B) separadas por uma distância l coincidindo na orientação formam superfícies paralelas podendo favorecer o aparecimento de ondas estacionárias.	249
Figura 7.37 – Conjunto de três placas triangulares (PLT_1, PLT_2 e PLT_3) em (B) substituindo em (A) a placa retangular PLR e suas duas placas laterais de fechamento (FV_e e FV_d).	250
Figura 7.38 – Exemplo de uma superfície serial LNSS2 com duas rotações. Em (A), (B) e (C) elementos com espaços já preenchidos por placas triangulares. À direita ainda permanecem vãos produzidos pela inclinação frente-trás.	251

Figura 7.39 – LNSS2 com algumas medidas (m).	251
Figura 7.40 – SCSS: visualização da variação entre os diâmetros dos tubos correspondendo aos elementos semicilíndricos dispostos lado a lado.	254
Figura 7.41 – Segmento inicial do seqüenciamento elementos semicilíndricos da <i>Figura 7.40</i>	254
Figura 7.42 – Análise modal: <i>sala de referência</i> com estrutura de malhas.	255
Figura 7.43 – Análise modal: sala com uma superfície modificada – <i>superfície serial linear</i> (LNSS).	256
Figura 7.44 – Análise modal: sala de referência tendo uma superfície modificada com <i>superfície serial com elementos semicilíndricos</i> (SCSS).	256
Figura 7.45 – Análise modal: sala modificada com SCSS reduzida a modelo linear, contendo somente com os eixos unindo os centros dos círculos que seccionam os cilindros (RLN SCSS).	257
Figura 7.46 – Avaliação: análise segundo o <i>critério de Bonello</i> da <i>sala de referência</i>	258
Figura 7.47 – Avaliação das dimensões da <i>sala de referência</i> pelo <i>diagrama de Bolt, Beranek e Newman</i>	259
Figura 7.48 – Análise modal: modos 1 a 5. (16 a 47Hz) Melhorias em relação aos modos M_{QUAD02} , 03 e 04 e, para LNSS, em relação ao modo M_{QUAD05}	260
Figura 7.49 – Análise modal: melhorias em relação aos modos M_{QUAD06} a 10 (50 a 66Hz) Destaque para a quebra do modo M_{QUAD07} pelas superfícies difusoras e do modo M_{QUAD10} , pela superfície LNSS.	261
Figura 7.50 – Análise modal: melhorias em relação aos modos axiais horizontais: M_{QUAD11} , 14, 21 e 36 (50 a 136Hz) A periodicidade horizontal de variação de pressão tende a tornar-se irregular com o aumento da frequência..	262
Figura 7.51 – Análise modal: melhorias em relação aos modos M_{QUAD36} , 37 e 38 (134 a 141Hz) Destaque no modo M_{QUAD37} para ventres de pressão que desaparecem nas proximidades da superfície SCSS e, no modo M_{QUAD38} , redução de 77 a 87% do número de ventres de pressão pela ação das superfícies difusoras.	263
Figura 7.52 – Análise modal: influência da série de elementos semicilíndricos em SCSS independentemente da inclinação das superfícies. Comparação M_{SCSS52} a 57 e M_{RLN_SCSS51} a 58 | (169 a 179Hz) (obs.: tabela em duas colunas)	264

Figura 7.53 – Análise modal: atuação dos elementos semicilíndricos independentemente da inclinação das superfícies. Comparação $M_{SCSS}58$ a 63 e $M_{RLN_SCSS}59$ a 63 |(179 a 189Hz) (obs.: tabela em duas colunas).....	265
Figura 7.54 – Análise modal: atuação dos elementos semicilíndricos independentemente da inclinação das superfícies. Coluna da esquerda: Comparação $M_{SCSS}66$ a 68 e $M_{RLN_SCSS}66$ a 68 |(192 a 197Hz) Coluna da direita: Comparação $M_{SCSS}72$ a 74 e $M_{RLN_SCSS}71$ a 73 |(202 a 205Hz)	266
Figura 7.55 – Análise modal: seqüência dos modos (QUAD, LNSS e SCSS) entre 352 e 354Hz.	267
Figura 7.56 – Análise modal: quebra do modo tangencial $M_{QUAD}12$ (70,8Hz) pela superfície LNSS.	268
Figura 7.57 – Análise modal: quebra do modo axial $M_{QUAD}15$ (85,0Hz) pelas superfícies LNSS, SCSS e RLN_SCSS.	269
Figura 7.58 – Análise modal: quebra dos modos tangenciais $M_{QUAD}17$ e 18 (87,8 e 88,5Hz) pelas superfícies LNSS, SCSS e RLN_SCSS.....	270
Figura 7.59 – Análise modal: quebra do modo tangencial $M_{QUAD}20$ (98,8Hz) pelas superfícies SCSS e RLN_SCSS.	271
Figura 7.60 – Análise modal: modos onde se pode observar a tendência dos ventres com máximos e mínimos de pressão em se concentrarem próximos às <i>superfícies seriais difusoras</i>	272
Figura 7.61 – Análise modal: modos na frequência de 1001,8Hz em QUAD (acima), LNSS (centro), SCSS (abaixo). Em LNSS e SCSS (ao centro e abaixo) os maiores valores máximos e os menores valores mínimos estão junto às superfícies seriais.	273
Figura 7.62 – Análise modal: maiores valores máximos e menores valores mínimos em dois modos da sala com tratamento SCSS em 2KHz estão próximos à superfície serial difusora.	274
Figura 8.1 – <i>Superfície serial difusora</i> LNSS2 em gesso duplo acartonado sobre a parede ao fundo da Sala de Gravação do Estúdio do LAMI/ECA/USP. Embaixo de um dos elementos centrais, nota-se abertura para entrada natural de ar.....	284

Figura 8.2 – Coordenadas para instalação da <i>superfície serial difusora</i> LNSS2 em gesso duplo acartonado. À esquerda, para referência, parte da parede de madeira lateral...	285
Figura 8.3 – Dimensões de elementos da <i>superfície serial difusora</i> LNSS2 projetada para o LAMI em gesso duplo acartonado.....	286
Figura 8.4 – Sala Villa-Lobos, UNI-RIO (RJ): corte lateral. (A) superfície serial ao fundo do palco; (B) rebatedores de teto;.....	295
Figura 8.5 – Sala Villa-Lobos, UNIRIO (RJ): vista superior. (A) superfície serial ao fundo do palco; (B) rebatedores de palco; (C) superfícies laterais de madeira; (D) superfícies laterais de gesso; (E) superfícies laterais com placas de azulejos; (F) superfície de gesso ao fundo da sala, nível platéia.....	296
Figura 8.6 – Palco visto da <i>cabine de controle de gravação</i> : ao fundo superfície LNSS.....	297
Figura 8.7 – Rebatedores de palco, Parede lateral reflexiva em ‘V’; Superfície serial ao fundo.	298
Figura 8.8 – Vista frontal da <i>cabine de controle de gravação</i> (a partir da platéia na altura do mezanino).	301
Figura 8.9 – <i>Superfície serial difusora – SCSS</i> ao fundo da <i>cabine</i> . Tubos em meia cana dispostos lado a lado seguindo desdobramento de seqüência como na <i>Tabela 7-5, Eq. 7-9 (p. 254), Figura 7.40 (p. 254)</i> . Vista frontal e vista superior. Apesar de serem aplicados em meia cana, os tubos estão representados em forma de cilindro para praticidade da medição dos diâmetros.....	302
Figura 8.10 – Vista superior: dimensões das partições e aberturas e ângulos das inclinações. (A) <i>cabine de controle de gravação</i> ; (B) escada de acesso ao mezanino; (C) reservado técnico; (D) superfície de base para fixação dos tubos em meia cana da superfície SCSS; (E) superfície sobre a parede dianteira da cabine projetando as ondas incidentes ao solo; (F) parede externa da <i>cabine</i> dando para o Auditório.....	303
Figura 8.11 – Vista lateral: medidas das três partições dianteiras; inclinação do teto e da parede dianteira interna.....	304
Figura 8.12 – Vistas em perspectiva sem superfícies internas laterais. Vê-se a estrutura do teto vazada.....	305
Figura 8.13 – Vistas em perspectiva superior e inferior com todas as superfícies.	306

Figura 8.14 – Pontos de medição no <i>auditório</i> da Sala Villa-Lobos. Fonte sonora no palco. Microfone: platéia (1 a 4) e palco (5 a 7)	310
Figura 8.15 – Pontos de medição na <i>cabine de controle de gravação</i> da Sala Villa-Lobos.....	311
Figura 8.16 – Medições <i>auditório</i> : RT_{60} a partir de T_{30} (avg 500 e 1Khz). No eixo das abcissas: pontos de medição na platéia (1 a 4) e no palco (5 a 7).	312
Figura 8.17 – Medições <i>auditório</i> : EDT em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Linhas pontilhadas em vermelho indicando valores máximo e mínimo dentre os valores usuais praticados.....	313
Figura 8.18 – Medições <i>auditório</i> : razão entre EDT e RT_{60} em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Linha pontilhada indicando média de valores obtidos por Beranek (2004, p. 506) em 500-1KHz.	313
Figura 8.19 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 1 (platéia)...	314
Figura 8.20 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 2 (platéia)...	314
Figura 8.21 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 3 (platéia)...	314
Figura 8.22 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 4 (platéia)...	315
Figura 8.23 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 5 (palco).....	315
Figura 8.24 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 6 (palco).....	315
Figura 8.25 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 7 (palco).....	316
Figura 8.26 – Comparação entre EDT (A) e T_{40} (B) obtidos em todos os pontos de medição. As setas no gráfico abaixo mostram a movimentação das curvas obtidas em cada ponto de medição em relação ao gráfico superior.	316
Figura 8.27 – Medições <i>auditório</i> : média dos desvios do RT_{60} de cada ponto de medição em cada banda de frequência em relação à média geral do RT_{60} na mesma banda. (N.B.: O Ponto 3 foi suprimido destes cálculos por estar demasiadamente próximo à parede ao fundo da platéia).....	317
Figura 8.28 – Medições <i>auditório</i> : <i>clareza</i> $C_{80}(3)$ em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Pontos de medição: platéia (1 a 4) e palco (5 a 7).....	319
Figura 8.29 – Medições <i>auditório</i> : Relação entre $C_{80}(3)$ e RT_{60} . Linhas pontilhadas : faixa de valores obtidos por Beranek (2004, p. 551). Temos elevados valores de <i>clareza</i> em relação ao RT_{60}	320

Figura 8.30 – Medições <i>auditório</i> : $(EDT/RT_{60})-1$, $C_{80}(3)$ e RT_{60} . Curvas der tendência de $C_{80}(3)$ x RT_{60} (azul e continua) e de $(EDT/RT_{60})-1$ x RT_{60} (pontilhado e rosa). Apesar de ter valores elevados do parâmetro <i>clareza</i> (Cf. Figura 8.29) o <i>EDT</i> é fraco.....	320
Figura 8.31 – Medições <i>auditório</i> : <i>intimidade</i> (<i>ITDG</i>) em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores usuais máximo e mínimo.	321
Figura 8.32 – Medições <i>auditório</i> : <i>calor</i> (<i>BR</i>) em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores usuais.....	321
Figura 8.33 – Medições <i>auditório</i> : <i>fator de suporte</i> (<i>ST1</i>) em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Retorno que os músicos recebem do que tocam. Apesar de estar medido em todos os pontos, só se aplica ao palco. Em vermelho valores usuais.....	322
Figura 8.34 – Medições <i>auditório</i> : <i>tempo central</i> (<i>CT</i>) em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores de referência máximo e mínimo para música. Pontos de medição: platéia (1 a 4) e palco (5 a 7).	323
Figura 8.35 – Medições <i>auditório</i> : <i>balanço tonal</i> (<i>TB</i>) em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores de referência.	323
Figura 8.36 – Medições <i>cabine de controle de gravação</i> : <i>tempo de reverberação</i> (RT_{60}) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).	325
Figura 8.37 – Medições <i>cabine de controle de gravação</i> : <i>EDT</i> em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).....	325
Figura 8.38 – Medições <i>cabine de controle de gravação</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 1	326
Figura 8.39 – Medições <i>cabine de controle de gravação</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 2.	326
Figura 8.40 – Medições <i>cabine de controle de gravação</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 3	327
Figura 8.41 – Medições <i>cabine de controle de gravação</i> : <i>tempo de reverberação</i> por banda de oitava. Ponto 4	327
Figura 8.42 – Medições <i>cabine</i> : média em cada banda de freqüência dos desvios do RT_{60} de cada ponto de medição em relação à média do RT_{60} na mesma banda. (N.B.: O Ponto 3	

foi suprimido destes cálculos por estar demasiadamente próximo à superfície serial difusora ao fundo da cabine).....	328
Figura 8.43 – Medições <i>cabine: clareza</i> $C_{80}(3)$ em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal). Em pontilhado, valores usuais para auditórios.....	330
Figura 8.44 – Medições <i>cabine: intimidade</i> (ITDG) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).....	330
Figura 8.45 - Medições <i>cabine: calor</i> (BR) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).	331
Figura 8.46 – Medições <i>cabine: fator de suporte</i> (STI) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal). O retorno dos sons emitidos no interior da cabine tem mais energia do que o ataque.....	331
Figura 8.47 – Medições <i>cabine: tempo central</i> (CT) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).....	332
Figura 8.48 – Medições <i>cabine: balanço tonal</i> (TB) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).....	332
Figura 8.49 – Previsão aproximada do RT_{60} do <i>auditório</i> da Sala Villa-Lobos vazia com poltronas provisórias: 1,28s. Aplicativo: ACMUS (ECA/USP)	334
Figura 11.1 – Alturas dos rebatedores de palco.	358
Figura 11.2 – Superfícies laterais da platéia em relação ao palco e ao fundo da sala em perspectiva.	359
Figura 11.3 – Vista superior e vista lateral das superfícies laterais da platéia, em contexto com o palco, rebatedores de palco e superfície ao fundo no nível do piso e na entrada platéia. Detalhamento de medidas e ângulos.	360
Figura 11.4 – Superfície de gesso ao fundo do auditório: segunda porta de entrada do público e inclinações projetando o som às laterais e ao piso.	361
Figura 11.5 – Rebatedores de teto vistos em perspectiva.	362
Figura 11.6 – Vista geral da sala em <i>vol d’oiseau</i>	363
Figura 11.7 – Reflexões especulares na parede serial ao fundo no palco e nos rebatedores de teto e laterais. Vistas superior e lateral. A maioria dos posicionamentos possíveis dos	

músicos no palco permite reflexões nos rebatedores abrangendo eficientemente toda a platéia.	364
Figura 11.8 – Proposta de isolamento alternativo do forro do auditório em função de restrições orçamentárias.	365
Figura 11.9 – Características de dois materiais de revestimento recomendados para atenuação na banda de frequência de 2KHz.	365
Figura 11.10 - Coordenadas em vista superior para instalação das superfícies de madeira nas laterais. (A) e (B) alinhadas face a face e (C) em oposição à porta de acesso ao auditório.	366
Figura 11.11 – Coordenadas em vistas frontal e lateral para instalação da superfície de madeira ao redor da janela de vidro externa, em face da porta de acesso ao auditório.	367
Figura 11.12 – Coordenadas em vistas frontal e lateral da superfície de madeira à esquerda e ao fundo da <i>sala de captação de som</i> , constituída de dois blocos.	368
Figura 11.13 – Conjunto formado pelas duas superfícies de madeira instaladas lado a lado sobre a parede lateral esquerda da Sala de Gravação.	369
Figura 11.14 – Vistas superior e diagonal da superfície de madeira à direita e ao fundo da Sala de Gravação, constituída de um único bloco.	370
Figura 11.15 – Teto de gesso: coordenadas para instalação.	371
Figura 11.16 – Estrutura metálica onde serão penduradas as placas de gesso através de tirantes com amortecedor.	372
Figura 11.17 – Conjunto das superfícies de madeira e a superfície serial de gesso ao fundo.	373
Figura 11.18 – Desenho vazado do teto em <i>vol d'oiseau</i> e vista por baixo do teto com o conjunto de paredes projetadas.	374
Figura 11.19 – Várias vistas em 3D das paredes e do teto projetados.	375
Figura 11.20 – Paredes e teto vazado mostrando todas as paredes atuais e traçado correspondente à caixa de alvenaria envolvendo a <i>sala de tomada de som</i>	376
Figura 11.21 – Vista inferior em diagonal e vista da <i>cabine de controle de gravação</i> do conjunto de elementos projetados.	377

Figura 11.22 – Medições acústicas da <i>sala de captação de som</i> do Estúdio do LAMI/ECA/USP: pontos de posicionamento da Fonte Sonora FS1, FS2 e FS3 e do Microfone de 1 a 20 (com), de 1 a 7 (nos), de 1 a 5 (reb).....	379
Figura 11.23 – <i>Tempo de reverberação</i> médio geral, <i>Tempos de reverberação</i> médios nas posições E, F e G e <i>Nível de pressão sonora</i> geral por 1/3 de oitava.	380
Figura 11.24 – <i>Tempo de reverberação</i> por 1/3 de oitava nos pontos E, F e G.....	381
Figura 11.25 – <i>Ruído de fundo</i> no local logo antes do início das medições.....	382
Figura 11.26 - Desvios do <i>tempo de reverberação médio</i> da cada grupo de posições (E, F e G) em relação ao <i>tempo de reverberação médio geral</i> . Como cada grupo possuía posições distintas, isso permitiu a observação de variações em função da mudança de posição dos microfones em locais de prováveis ventre de onda (com) – E; de prováveis ventres (nos) – F; e sob o rebaixamento (reb) – G.	385
Figura 11.27 – Estúdio do LAMI. Resultados de análise pelo <i>diagrama de Bolt, Beranek e Newman</i> : (A) não adequadas; (B) adequadas.	387
Figura 11.28 – Estúdio do LAMI. Análise pelo <i>critério de Bonello</i> das dimensões equivalentes: (A) 5,7 x 6,0 x 3,14 m. (B) 4,9 x 6,0 x 3,14m. As frequências de 63Hz e de 32Hz em proeminência, indicam irregularidade na acumulação de <i>modos normais</i> e são as mesmas frequências que se destacaram na planilha de cálculo de parciais dados.	388
Figura 11.29 – Alturas reforçadas pelo <i>modo axial</i> de 60Hz.....	389
Figura 11.30 - Alturas inibidas pelo <i>modo axial</i> de 60Hz.	389
Figura 11.31 – Alturas reforçadas pelo <i>modo axial</i> de 30Hz.....	390
Figura 11.32 – Alturas inibidas pelo <i>modo axial</i> de 30Hz.....	390

Lista das tabelas

Tabela 3-1 – <i>Modos normais</i> em um volume de ar retangular fechado.....	97
Tabela 3-2 – Melhores proporções encontradas por Bolt, Beranek e Newman. Fonte: Davis (op. cit.).....	100

Tabela 3-3 – Correlação entre dimensões de obstáculos e os decorrentes efeitos sobre ondas planas incidentes em função de seu comprimento de onda λ .	106
Tabela 3-4 – Salas secas e salas vivas. Fonte: Beranek (1962, p. 426-427)	123
Tabela 4-1 – Seqüenciamento das profundidades num QRD unidimensional. À direita representação das profundidades de acordo com os resultados obtidos, onde se pode observar a <i>simetria axial</i> da mesma.	156
Tabela 4-2 – Seqüenciamento das profundidades num PR_2D unidimensional. No esquema representativo das profundidades à direita, destaque para a <i>simetria translacional</i> .	157
Tabela 4-3 – Seqüenciamento das profundidades num PR_3D unidimensional. Seqüência de profundidades à direita com <i>simetria rotacional</i> .	158
Tabela 4-4 – Procedimento para obter as profundidades num difusor bidimensional a partir de uma série de profundidades original.	159
Tabela 4-5 – Resultado do desdobramento da série QR original em seqüências complementares para obter o difusor bidimensional.	160
Tabela 4-6 – Profundidades em centímetros e representação proporcional.	160
Tabela 4-7 – Resultado do desdobramento da série PR_2 original em seqüências complementares para obter o difusor bidimensional.	161
Tabela 4-8 – Profundidades em centímetros e representação proporcional.	161
Tabela 4-9 – Série desdobrada e profundidades de um difusor QRD bidimensional tendo $N=7$.	162
Tabela 6-1 – Relação estabelecida entre notas musicais e números neste trabalho.	186
Tabela 7-1 – Seqüências σ_n com $N=17$ para Difusores QR , PR_2 e PR_3 .	215
Tabela 7-2 – Seqüências σ_n empregadas no <i>design</i> de difusores (QRD , PR_2D , PR_3D) e na modelagem de música serial (<i>série 1</i> , <i>série 2</i>), comparativamente.	216
Tabela 7-3 – Resultados obtidos na planilha de cálculo para a <i>superfície</i> $\sigma_{g_{15}} A$.	239
Tabela 7-4 – Distribuição dos diâmetros dos tubos em meia cana associados a termos de uma série de números inteiros, no caso de 1 a 9. Evidentemente trata-se somente de uma tabela de associação, sendo a série empregada estabelecida logo a seguir.	253
Tabela 7-5 – Seqüência de oito termos com <i>simetria axial de Valor Inverso a um Módulo</i> .	253
Tabela 7-6 – As quatro regiões características da <i>sala de referência</i> .	259

Tabela 11-1 – Relação dos pontos de medições da <i>sala de captação de som</i> do Estúdio do LAMI/ECA/USP.....	378
--	-----

Lista de abreviaturas e siglas

(com).....	pontos de medição na região normal de uso (comum) do Estúdio do LAMI
(nos)	pontos de medição em locais onde deve haver influência dos modos normais (ventres e nós de pressão) do Estúdio do LAMI
(reb).	pontos de medição na região de rebaixamento do teto do Estúdio do LAMI
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas (http://www.abnt.com.br/)
<i>ACMUS</i>	Aplicativo desenvolvido no âmbito do Projeto <i>AcMus</i> (USP).
<i>AcMus</i>	Projeto interdisciplinar de pesquisa desenvolvido na USP (financiamento FAPESP), concentrado na investigação de questões relacionadas a concepção/ <i>design</i> , controle e tratamento acústico de ambientes destinados a atividades musicais (http://gsd.ime.usp.br/acmus/projeto.html);
ECA	Escola de Comunicações e Artes (USP) (http://www.eca.usp.br/)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (http://www.fapesp.br)
<i>FV</i>	denominação de <i>fechamento de um vão</i> entre placas da superfície difusora empregada na concepção de <i>superfícies seriais difusoras</i> LNSS2
LAMI	Laboratório de Acústica Musical e Informática (ECA/USP) (http://www.eca.usp.br/nucleos/lami/)
LEDE®.....	<i>Live end dead end</i>
<i>PLR</i>	denominação de <i>placa retangular</i> empregada na concepção de <i>superfícies seriais difusoras</i> LNSS2

PLT.....denominação de *placa triangular* empregada na concepção de *superfícies
seriais difusoras LNSS2*
 PR.....Seqüência numérica gerada por raiz primitiva e difusores gerados a partir
dela
 PR₂.....Seqüência obtida por *raiz primitiva 2* e difusores gerados a partir dela
 PR₃.....Seqüência obtida por *raiz primitiva 3* e difusores gerados a partir dela
 PRD.....Difusores gerados através de Sequências obtidas por Raiz Primitiva
 QR.....Sequencia numérica gerada através de resíduos quadráticos
 QRD.....Difusores gerados através de Sequencias obtidas por Resíduo Quadrático
 RFZTM.....*Reflection free zone*
 RPG®.....*RPG Diffusor Systems, Inc.* (<http://www.rpginc.com/>)
 SIK.....*Sequence inversion keying*
 UNICAMPUniversidade Estadual de Campinas (<http://www.unicamp.br>)
 UNIRIOUniversidade do Rio de Janeiro (<http://www.unirio.br/>)
 USPUniversidade de São Paulo (<http://www2.usp.br/>)

Lista de símbolos, variáveis e fatores com unidades

A	absorção total de uma superfície [m^2]
ASW	<i>apparent source width</i> (extensão aparente da fonte) parâmetro referente à <i>espacialidade</i> (<i>spaciousness</i>) medido por $(1-LACC_{E3})$ (Cf. 3.3.7, p. 126 et seq.)
B	rigidez à flexão [Nm]
BR	<i>bass ratio</i> (razão de baixos) (Cf. Eq. 3-39, p. 123)
c	velocidade de propagação do som no ar [m/s]
C_{80}	clareza [dB]
$C_{80}(3)$	clareza : valor médio de C_{80} nas bandas de 500, 1K e 2KHz [dB]
CT	<i>central time</i> (tempo central) ou (centre time) ou tempo baricêntrico (<i>baricentric time</i>) [ms]
D/R	razão entre som direto e o som reverberante [dB] (Cf. Eq. 3-27, p. 88)
D_{50}	definição [%]
D_c	distância crítica [m] (na qual o som direto se iguala em nível de pressão sonora ao som reverberante)
d_n	profundidade da cavidade ou comprimento da saliência do elemento n de um difusor [m] ou [cm] (Cf. 4. , p. 146)
DRR	razão entre som direto e o som reverberante [%] (Cf. Eq. 3-28, p. 89)
E	módulo de Young ou módulo de alongamento [N/m^2] (SEARS,1984, p.259)
E_{DIR}	energia do som direto [J]
EDT	<i>early decay time</i> [s]
E_{RVB}	energia do som reverberante [J]
f	frequência [Hz]
g	raiz primitiva
h	altura de seção transversal ou espessura de partição [m]
H	altura de uma sala [m] em contexto $L \times W \times H$ (Cf. 3.2.13.4, p. 103 et seq.)
I	intensidade sonora [W/m^2]
I_0	intensidade sonora de referência : $10^{-12} W/m^2$

- I_{av}intensidade sonora média irradiada por uma fonte sonora (Cf. 3.2.7, p. 75)
- I_iintensidade sonora irradiada por uma fonte sonora na direção i (Cf. 3.2.7, p. 75)
- I_isérie de 12 notas em configuração *inversão* na transposição i (Cf. 6.1.1, p. 191 et seq.)
- $LACC$ *interaural cross-correlation coefficient* (coeficiente de correlação cruzada interaural) (Cf. 3.3.6 3.3.6, p. 124)
- $LACC_E$ *interaural cross-correlation coefficient* (coeficiente de correlação cruzada interaural) das primeiras reflexões (*early reflexions*) (Cf. 3.3.7, p. 126 et seq.)
- $LACC_{E3}$ *interaural cross-correlation coefficient* (coeficiente de correlação cruzada interaural) das primeiras reflexões (*early reflexions*) média do $LACC_E$ nas bandas de 500, 1K e 2KHz – O coeficiente $1-LACC_{E3}$ corresponde à ASW (extensão aparente da fonte) (Cf. 3.3.7, p. 126 et seq.)
- $LACC_L$ *interaural cross-correlation coefficient* (coeficiente de correlação cruzada interaural) após as primeiras reflexões (Cf. 3.3.8, p. 128)
- $LACC_{L3}$ *interaural cross-correlation coefficient* (coeficiente de correlação cruzada interaural) após as primeiras reflexões, média do $LACC_L$ nas bandas de 500, 1K e 2KHz – O coeficiente $1-LACC_{E3}$ corresponde ao LEV (envolvimento do ouvinte) (Cf. 3.3.8, p. 128)
- $LACF$ *interaural cross-correlation function* (função de correlação cruzada interaural) (Cf. 3.3.6 3.3.6, p. 124)
- ITD ou $ITDG$ *initial-time-delay gap* [ms] (Cf. 3.3.3, p. 119)
- l comprimento [m]
- L comprimento de uma sala [m] em contexto $L \times W \times H$ (Cf.3.2.13.4, p.103 et seq.)
- L_{DIR} nível do som direto [dB]
- L_I nível de intensidade sonora [dB]
- L_p nível de pressão sonora [dB]
- L_{RVB} nível do som reverberante [dB] (Cf. 3.2.9.3, p. 83)
- L_W nível de potência sonora da fonte [dB] (Cf. Eq. 3-8, p. 74)

LEV	..... <i>listener envelopment</i> (envolvimento do ouvinte) parâmetro referente à <i>espacialidade</i> (<i>spaciousness</i>) medido por $(1-LACC_{L3})$ (Cf. 3.3.8, p. 128)
M	..... densidade superficial [Kg/m ²] (Cf. 3.4.3.1.1, p. 139)
m_{max}	..... fator multiplicativo para âmbito de ação de um difusor de Schroeder definindo o número primo mínimo necessário para <i>design</i> de um difusor (Cf. 4.2.2, p. 151)
N	..... número primo (Cf. 4.1.3, p. 148)
NI	..... nível de intensidade sonora [dB]
O_i	..... série de 12 notas em configuração <i>original</i> na transposição i (Cf. 6.1.1, p. 191 et seq.)
p	..... pressão sonora [Pa] ou [N/m ²] (Cf. 3.2.9 - 3.2.9.5, p. 87; 3.3.2, p. 110; 3.3.10, p. 131)
p	..... número primo (Cf. 4. , p. 146)
p_0	..... pressão sonora de referência : $2 \cdot 10^{-5}$ Pa
p_{rms}	..... pressão sonora eficaz [Pa]
p_{pico}	..... pressão sonora (amplitude máxima) [Pa]
p_{pp}	..... pressão sonora pico a pico [Pa]
Q	..... diretividade da fonte sonora (Cf. 3.2.7, p. 75)
Q_i	..... diretividade da fonte sonora da direção i .
r	..... distância entre dois pontos, geralmente entre a fonte sonora e o ponto em medição ou em cálculo [m]
R/D	..... razão entre som reverberante e o som direto [dB] (Cf. 3.2.9.5.1, p. 87)
R_c	..... constante da sala [m ²] (Cf. 3.2.9.3, Eq. 3-20, p. 83)
R_i	..... série de 12 notas em configuração <i>retrógrado</i> na transposição i (Cf. 6.1.1, p. 191 et seq.)
RI_i	..... série de 12 notas em configuração <i>retrógrado da inversão</i> na transposição i (Cf. 6.1.1, p. 191 et seq.)
R_M	..... massa da sala [dB] (Cf. 3.2.9.5.2, p. 88)
RT_{60}	..... tempo de reverberação : média aritmética do T_{60} em 500 e 1KHz [s] (Cf. 3.2.9.2, p. 82)
S	..... área de uma superfície [m ²]

STI	fator de suporte (<i>support factor</i>) [dB] (Cf. 3.3.10, p. 131)
T	período de onda [s] (Cf. 3.4.3.4, p. 142)
t	tempo [s]
T	tempo de reverberação [s]
T_{10}	tempo de reverberação medido pelo caimento dos primeiros 10dB, a partir do qual se extrapola linearmente o caimento dos primeiros 60dB [s]
T_{20}	tempo de reverberação medido pelo caimento dos primeiros 20dB, a partir do qual se extrapola linearmente o caimento dos primeiros 60dB [s]
T_{30}	tempo de reverberação medido pelo caimento dos primeiros 30dB, a partir do qual se extrapola linearmente o caimento dos primeiros 60dB [s]
T_{40}	tempo de reverberação medido pelo caimento dos primeiros 40dB, a partir do qual se extrapola linearmente o caimento dos primeiros 60dB [s]
T_{60}	tempo de reverberação medido pelo caimento dos primeiros 60dB [s]
TB	<i>tonal balance</i> (balanço tonal) (Cf. 3.3.12, p. 133)
T_{BAS}	tempo de reverberação em frequências baixas : média aritmética entre T_{125Hz} e T_{250Hz} [s] (Cf. Eq. 3-39, p. 123)
T_{MED}	tempo de reverberação em frequências médias : média aritmética entre T_{500Hz} e T_{1kHz} [s] (Cf. Eq. 3-39, p. 123)
v	vivacidade [Sabines métricos] (Cf. Eq. 3-37, p. 122)
V	volume de um recinto [m ³]
W	largura [m] ($L \times W \times H$) (Cf. 3.2.13.4, p. 103 et seq.)
W	largura das cavidades ou saliências de um difusor de Schroeder [m] ou [cm] (Cf. 4.1.2, p. 148)
W	potência sonora [Watts] (Cf. Eq. 3-8, p. 74)
W_0	potência sonora de referência : 10 ⁻¹² Watts (Cf. Eq. 3-8, p. 74)
γ	incremento angular [graus] (Cf. 7.1 , p. 207-208)
β	fator de incremento do comprimento de segmentos (correspondendo à largura de elementos de uma superfície serial difusora LNSS) [coeficiente adimensional] (Cf. p. 207-211)

θ	..... ângulo formado entre dois elementos [graus]
λ	..... comprimento de onda [m]
ρ	..... densidade [Kg/m ³]
ε	..... duração do som direto [s] (Cf. Eq. 3-25, p. 87)
γ	..... incremento angular (passo a passo) [graus] (Cf. p. 207-211)
σ	..... seqüência de números inteiros (Cf. 4.2.3, p. 151; 4.2.4; 4.5, p. 159; 4.6.1, p. 162; 3.1.2.2, p. 68; 7.1, p. 196; 7.4, p. 214; 7.6, p. 235)
μ	..... absorção do ar [Sabines métricos] (Cf. 3.2.9.1, p. 77)
ρ^c	..... impedância acústica [rayls] (Cf. 3.2.9.4, p. 85)
σ_n	..... n -ésimo termo de uma seqüência de números inteiros
ω	..... velocidade angular [rad/s]
α	..... coeficiente de absorção [Sabines métricos]
τ	..... variante temporal [ms] (Cf. 3.3.6, p. 124)

ERRATA: p. 164 – 1º parágrafo, 3ª linha: o que equivale a uma atenuação de 1,55 dB

SUMÁRIO

Resumo.....	7
Abstract.....	8
Resumé.....	9
Áreas de conhecimento.....	10
Areas of knowledge.....	10
Domaines de la connaissance.....	10
Palavras-chave.....	11
Keywords.....	11
Mots-clefs.....	11
Lista das figuras.....	12
Lista das tabelas.....	30
Lista de abreviaturas e siglas.....	32
Lista de símbolos, variáveis e fatores com unidades.....	34
SUMÁRIO.....	39
ESTRUTURA DA TESE.....	49
1. MOTIVAÇÃO.....	50
1.1 A importância do universo sonoro e da consciência dos fenômenos acústicos no desenvolvimento da música no séc. XX.....	50
1.2 A importância do silêncio na música.....	52
1.3 A importância do silêncio na acústica.....	55
2. INTRODUÇÃO.....	56
2.1 Objetivos da pesquisa.....	58
2.1.1 Acústica, arquitetura e música: criação e performance.....	58
2.2 Justificativa da pesquisa.....	60
2.3 Hipótese.....	61
2.4 Dois estudos de caso.....	61

2.4.1	São Paulo, USP, ECA, Laboratório de Acústica Musical e Informática (LAMI), Estúdio de gravação - Sala de tomada de som	62
2.4.2	Rio de Janeiro, Uni-Rio, Sala Villa-Lobos, Auditório e Cabine de Controle de Gravação.	63
3.	REVISÃO DA LITERATURA I : generalidades.....	63
3.1	Tipologia da simetria	64
3.1.1	Simetria translacional.....	65
3.1.1.1	Simetria translacional ordinal.....	65
3.1.1.2	Simetria translacional de valores.....	66
3.1.2	Simetria axial.....	67
3.1.2.1	Simetria axial ordinal.....	67
3.1.2.2	Simetria axial de valor inverso a um módulo.....	68
3.1.2.3	Simetria axial em música.....	70
3.1.3	Simetria rotacional.....	70
3.2	Princípios e conceitos de acústica pertinentes a este trabalho	72
3.2.1	Onda sonora	72
3.2.2	Potência sonora	73
3.2.3	Intensidade sonora.....	73
3.2.4	Nível de intensidade sonora.....	73
3.2.5	Nível de potência sonora	74
3.2.6	Nível de pressão sonora	74
3.2.7	Diretividade de uma fonte sonora	75
3.2.8	Campo livre (ou Campo direto), Campo difuso e Campo reverberante.....	75
3.2.9	Reverberação.....	76
3.2.9.1	Tempo de reverberação e a Absorção dos materiais.....	77
3.2.9.1.1	Fórmula de Sabine	78
3.2.9.1.2	Fórmula de Eyring-Norris.....	79
3.2.9.1.3	Fórmula de Millington-Sette.....	80
3.2.9.1.4	Fórmula de Fitzroy.....	80
3.2.9.1.5	Comparação entre as fórmulas para cálculo do tempo de reverberação ..	81

3.2.9.2	Tempo de reverberação por bandas de frequência.....	82
3.2.9.3	Nível de pressão sonora: som direto e som reverberante.....	83
3.2.9.3.1	Nível do som direto.....	83
3.2.9.3.2	Nível do som reverberante.....	83
3.2.9.3.3	Nível de pressão sonora total: som direto simultaneamente ao som reverberante.....	84
3.2.9.4	Relação entre os níveis de pressão sonora do som direto e do som reverberante.....	84
3.2.9.5	Reverberant-to-direct ratio (R/D), Massa da sala (R_M) e Razão som direto-som reverberante (DRR).....	87
3.2.9.5.1	Reverberant-to-direct ratio (R/D).....	87
3.2.9.5.2	Massa da sala (R_M).....	88
3.2.9.5.3	Razão som direto-som reverberante (D/R) (DRR).....	88
3.2.10	Primeiras reflexões (Early sound ou Early reflections).....	89
3.2.11	Early decay time (EDT).....	91
3.2.12	Quatro regiões características do comportamento do som em uma sala fechada.....	91
3.2.13	Modos normais em recintos fechados.....	93
3.2.13.1	Critério de Bonello.....	97
3.2.13.2	Diagrama de Bolt, Beranek e Newman.....	100
3.2.13.3	Critério adotado nesta pesquisa para determinação de dimensões ideais para salas.....	101
3.2.13.4	<i>Modos normais</i> em salas não simétricas.....	103
3.2.14	Difusão sonora e superfícies irregulares.....	104
3.2.15	Efeitos produzidos por obstáculos interpostos no percurso de ondas sonoras planas.....	105
3.3	Critérios de avaliação acústica de uma sala.....	107
3.3.1	Preenchimento do som (Fullness of tone).....	108
3.3.2	Definição e clareza: inteligibilidade.....	110
3.3.2.1	Definição horizontal e vertical.....	113
3.3.2.2	Definição horizontal.....	114

3.3.2.3	Definição vertical.....	114
3.3.2.4	Definição e clareza na execução musical.....	114
3.3.2.4.1	Clareza : $C_{80}(3)$	115
3.3.3	Intimidade (Intimacy), Presença e Initial-time-delay gap (ITD).....	119
3.3.4	Vivacidade (Liveness) e Viveza	121
3.3.5	Calor (Warmth) e Razão de baixos (Bass ratio)	123
3.3.6	Correlação cruzada interaural – Interaural cross-correlation family IACF, $IACC_A$, $IACC_E$ e $IACC_L$	124
3.3.7	Espacialidade (Spaciousness): extensão aparente da fonte (apparent source width) (ASW) 126	
3.3.7.1	$IACC_E$	127
3.3.7.2	$IACC_{E3}$	127
3.3.7.3	$IACC_{L3}$	128
3.3.7.4	$1-IACC_{E3}$	128
3.3.8	Espacialidade (Spaciousness): envolvimento do ouvinte (listener envelopment) (LEV) 128	
3.3.8.1	$IACC_L$ e $IACC_{L3}$	128
3.3.9	Difusão e superfícies irregulares (Diffusion).....	129
3.3.9.1	Difusão: primeiras reflexões.....	129
3.3.9.2	Difusão: som reverberante	130
3.3.10	Fator de suporte (Support factor) (ST1).....	131
3.3.11	Tempo central, Center time (CT), Centre time (t_s), Tempo baricêntrico, Baricentric time (T_s) 132	
3.3.12	Tonal balance (TB) (Balanço tonal)	133
3.3.13	Ausência de eco (Freedom from echo).....	134
3.3.14	Sonoridade (Tonal quality)	135
3.4	Aspectos indesejáveis em salas de concerto: Eco, Ruído, Distorção e Não-Uniformidade	137
3.4.1	Eco	137
3.4.2	Ruído.....	137

3.4.3	Distorção	138
3.4.3.1	Absorção sonora seletiva (Selective sound absorption).....	139
3.4.3.1.1	Frequência de ressonância em sistemas de membrana absorvedores de energia sonora	139
3.4.3.2	Halos sonoros simpáticos (Sympathetic ringing tones)	142
3.4.3.3	Difração acústica por saliências regulares e constantes (Acoustic diffraction grating) 142	
3.4.3.4	Flutter echo e Comb filter.....	142
3.4.3.5	Focalização	145
4.	REVISÃO DA LITERATURA II: Difusores de Schroeder	146
4.1	Parâmetros de design de um difusor por reflexão com interferência de fase.....	147
4.1.1	Largura de banda [f_0 a f_{max}].....	147
4.1.2	Largura das cavidades [W]	148
4.1.3	Número primo [N].....	148
4.1.4	Tipo de seqüência matemática [QR, PR_2 , PR_3]	149
4.1.4.1	Resíduos quadráticos [QR].....	149
4.1.4.2	Raiz primitiva 2 [PR_2].....	150
4.1.4.3	Raiz primitiva 3 [PR_3].....	150
4.2	Procedimentos para design de difusores	150
4.2.1	Frequência máxima [f_{max}].....	150
4.2.2	Frequência mínima [f_0] e número primo N	151
4.2.3	Sequenciamento [S_n] e Profundidades das cavidades [d_n].....	151
4.2.4	Exemplos de seqüenciamentos [σ_n]	152
4.3	Simetrias observadas nos seqüenciamentos σ_n obtidos através de resíduos quadráticos e raízes primitivas	153
4.4	Sequenciamento de profundidades ou saliências em difusores unidimensionais	155
4.5	Sequenciamento de profundidades ou saliências em difusores bidimensionais	159
4.6	Crítica aos difusores de Schroeder	162
4.6.1	Problemas apresentados pelos difusores de Schroeder	162
4.6.1.1	Absorção, filtragem e atenuação.....	162

4.6.1.2	Influência da periodicidade	166
4.6.1.3	Freqüências críticas nos difusores de Schroeder.....	173
5.	REVISÃO DA LITERATURA III: subsídios em acústica para novas implementações	176
5.1	qualidades exigidas de um difusor.....	176
5.2	Exemplo de difusor com melhor desempenho que os de Schroeder.....	177
5.3	Desenvolvimentos recentes e aplicações atuais de difusores no tratamento acústico de salas para música.....	178
6.	REVISÃO DA LITERATURA IV : técnica de composição serial.....	186
6.1	Alguns elementos da Composição com doze sons.....	186
6.1.1	Séries derivadas da série original.....	191
6.2	Serialismo integral.....	194
7.	CAMPO DE ESTUDO	196
7.1	Principais problemas acústicos em pequenas salas para performance musical	196
7.2	Principais elementos a serem considerados num projeto de pequenas salas para performance musical.....	198
7.3	Como surgiu esta proposta de estudo e pesquisa sobre seqüências numéricas a partir do design e da crítica aos difusores de Schroeder	200
7.4	Análise comparativa entre difusores de Schroeder e a organização serial na técnica de composição com doze sons de Schoenberg.....	214
7.4.1	Semelhança entre as séries de 12 notas musicais e as seqüências de resíduos quadráticos e raízes primitivas (QRD, PR ₂ D e PR ₃ D)	214
7.5	Avaliação dos estudos de caso.....	223
7.5.1	Estúdio do Laboratório de Acústica Musical e Informática – LAMI/ ECA/USP224	
7.5.1.1	Problemas constatados	226
7.5.1.2	Soluções	227
7.5.2	Sala Villa-Lobos – Universidade do Rio de Janeiro – UNIRIO	229
7.5.2.1	Necessidades da demanda	229
7.5.2.2	Avaliação das necessidades.....	229
7.5.2.2.1	Auditório: Bolt, Beranek e Newman.....	232
7.5.2.2.2	Auditório: critério de Bonello	232

7.5.2.2.3	Cabine: Bolt, Beranek e Newman.....	233
7.5.2.2.4	Cabine: critério de Bonello	233
7.5.2.3	Análises	234
7.5.2.3.1	Cabine de controle de gravação	234
7.5.2.3.2	Auditório	235
7.5.2.4	Soluções	235
7.6	Propostas de design de difusores atendendo às necessidades dos estudos de caso.....	235
7.6.1	Design a partir da organização serial e de superfícies contínuas e arredondadas.....	236
7.6.2	Proposta 1 : Superfícies seriais difusoras lineares – LNSS.....	238
7.6.2.1	Algoritmo (<i>Série submetida a relação cruzada</i>).....	240
7.6.2.2	Comprimento de cada segmento (λ).....	241
7.6.2.3	Fator de incremento do crescimento exponencial do comprimento β	241
7.6.2.4	Inclinação de cada segmento (θ).....	242
7.6.3	Proposta 2 : Superfície serial difusora linear articulada em dois eixos ortogonais – LNSS2	245
7.6.3.1	Implementação da série geral composta e adequações	246
7.6.3.2	Inclinações frente-trás.....	247
7.6.3.3	Procedimento para evitar paralelismo entre placas triangulares fechando vãos paralelos produzidos por inclinações frente-trás das placas principais	249
7.6.4	Proposta 3 : Superfície serial difusora com elementos cilíndricos ou semicilíndricos – SCSS	252
7.7	Simulação de desempenho de superfícies difusoras por análise modal em aplicativo de elementos finitos.....	255
7.7.1	Resultados obtidos	260
7.7.2	Avaliação dos resultados de simulação obtidos através do aplicativo ANSYS.....	275
7.7.2.1	Distribuição variada dos máximos e mínimos de pressão	275
7.7.2.2	Identificação de modos com simetrias	276
7.7.2.3	Quebra de modos pelas superfícies seriais difusoras.....	276
7.7.2.4	Diminuição do número de ventres de pressão e da área que ocupam.....	277
7.7.2.5	Atuação das irregularidades semicilíndricas em SCSS.....	278

7.7.2.6	Tendência dos ventres de máximos e mínimos de pressão estarem próximos às superfícies seriais difusoras	279
8.	RESULTADOS	281
8.1	Proposta de adequação acústicas para a <i>sala de tomada de som</i> do estúdio do LAMI/ECA/USP (SP).....	281
8.1.1	Proposta.....	281
8.1.2	Projeto.....	282
8.1.2.1	Superfície serial difusora linear articulada em dois eixos ortogonais – LNSS2 283	
8.1.3	Melhorias esperadas na sala de captação de som do LAMI com a adequação acústica 287	
8.2	Proposta de adequação acústica para Auditório e Cabine de Controle de gravação da Sala Villa-Lobos, Uni-Rio (RJ).....	289
8.2.1	Proposta para auditório: Sala Villa-Lobos	289
8.2.2	Proposta para Cabine de controle de gravação: Sala Villa-Lobos.....	290
8.2.3	Projeto: Auditório	291
8.2.3.1	Corte lateral	295
8.2.3.2	Vista superior	296
8.2.3.3	Palco	297
8.2.4	Projeto: Cabine de Controle de Gravação.....	298
8.2.4.1	Vista frontal.....	300
8.2.4.2	Superfície serial ao fundo da cabine.....	302
8.2.4.3	Vista superior	303
8.2.4.4	Vista lateral	304
8.2.4.5	Lateral aberta em perspectiva sem superfícies internas laterais	305
8.2.4.6	Vista superior e inferior em perspectiva com todas as superfícies.....	306
8.2.5	Melhorias esperadas com o projeto de adequação da Sala Villa-Lobos	307
8.2.6	Medições após realização parcial dos trabalhos.....	308
8.2.6.1	Situação do <i>auditório</i> e da <i>cabine</i> no momento das medições.....	308
8.2.6.1.1	Auditório	308

8.2.6.1.2	Cabine de controle de gravação.....	309
8.2.6.2	Pontos de medições no auditório.....	310
8.2.6.3	Pontos de medições na cabine de controle de gravação.....	310
8.2.6.4	Resultados das medições: Auditório.....	312
8.2.6.4.1	Tempo de reverberação: EDT, T_{20} , T_{30} e $T_{40} - RT_{60}$ inferido.....	312
8.2.6.4.2	Clareza $C_{80}(3)$	319
8.2.6.4.2.1	$C_{80}(3)$, RT_{60} e $(EDT/RT_{60})-1$	320
8.2.6.4.3	Intimidade (ITDG).....	321
8.2.6.4.4	Calor (BR).....	321
8.2.6.4.5	Fator de suporte (ST1).....	322
8.2.6.4.6	Tempo central (CT).....	323
8.2.6.4.7	Balanço tonal (TB).....	323
8.2.6.5	Resultados das medições: <i>cabine de controle de gravação</i>	324
8.2.6.5.1	Tempo de reverberação: EDT, T_{20} , T_{30} e $T_{40} - RT_{60}$ inferido.....	324
8.2.6.5.2	Clareza $C_{80}(3)$	330
8.2.6.5.3	Intimidade (ITDG).....	330
8.2.6.5.4	Calor (BR).....	331
8.2.6.5.5	Fator de suporte (ST1).....	331
8.2.6.5.6	Tempo central (CT).....	332
8.2.6.5.7	Balanço tonal (TB).....	332
8.2.6.6	Análise dos resultados das medições.....	333
8.2.6.6.1	Análise dos resultados do auditório.....	333
8.2.6.6.2	Cabine de Controle de Gravação.....	336
8.2.7	Propostas encaminhadas e resultados esperados.....	339
9.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	340
10.	REFERÊNCIAS.....	343
11.	ANEXOS.....	358
11.1	Anexo 1: SALA VILLA-LOBOS (UNIRIO).....	358
11.1.1	Auditório.....	358
11.1.1.1	Altura dos rebatedores de palco.....	358

11.1.1.2	Paredes laterais da platéia	358
11.1.1.3	Superfície anterior: entrada do público	361
11.1.1.4	Rebatedores de teto.....	362
11.1.1.5	Vista geral da sala.....	363
11.1.1.6	Estudo de reflexões especulares.....	364
11.1.2	Ilustrações de propostas encaminhadas e resultados esperados	365
11.2	Anexo 2: LAMI/ECA/USP	366
11.2.1	Superfícies laterais de madeira	366
11.2.2	Teto de gesso.....	371
11.2.3	Superfícies combinadas.....	373
11.3	Anexo 3: Medições preliminares LAMI/ECA/USP.....	378
11.3.1.1	Medições	378
11.3.1.2	Resultados obtidos.....	380
11.3.1.3	Análise dos dados e constatação dos problemas a serem resolvidos	382
11.3.1.3.1	Proporções de Bolt, Beranek e Newman	387
11.3.1.3.2	Critério de Bonello	388
11.3.2	Condições do local, calibrações e procedimentos técnicos durante o processo de medição	391
11.3.3	Detalhamento das bandas de 1/3 de oitava empregadas.....	392
11.3.4	Altura da fonte e do microfone	393
11.3.5	Detalhamento da planificação das medidas	393
11.3.6	Regiões e posições da fonte sonora esférica B&K.....	394
11.3.6.1	Regiões	394
11.3.6.2	Posições da fonte.....	394
11.3.6.3	Ordenação das partições avaliadas no <i>Investigator</i>	395
11.3.7	Abreviaturas empregadas no sistema do equipamento de medição	395
11.3.8	Condições das medições	396

ESTRUTURA DA TESE

Capítulo 1: Motivação

Neste Capítulo é apresentada a importância do Som e do Silêncio na música, com uma certa ênfase ao repertório contemporâneo, dois aspectos que apesar de, no sentido comum, serem considerados antagonicamente como pólos opostos, a relação entre eles vai além da complementaridade, tendendo até mesmo, em certos momentos, a uma percepção fusionada de ambos. Ao final, justificativas da importância do Silêncio no estudo da acústica.

Se para haver sombra é fundamental que exista luz, não há silêncio sem som. Ambos, o som e o não-som (a cor e a não-cor), são a mesma coisa, porém em intensidades diferentes.

Capítulo 2: Introdução

Apresentação dos objetivos da pesquisa, um pouco da história e contextualização da acústica de salas, a justificativa do trabalho, a hipótese adotada e uma breve apresentação dos dois casos de estudos.

Capítulos 3, 4, 5 e 6: Revisão da literatura (I, II, III e IV)

Temos aqui uma ampla revisão da literatura relacionada a esta pesquisa, onde são expostos princípios de acústica relacionados ao tema abordado, tipologia das simetrias, que será um recurso de observação-análise freqüente; elementos da composição musical serial que inspiraram os novos difusores; aspectos desejáveis e indesejáveis e critérios da avaliação acústica de salas para música, bem como todos os parâmetros usados neste trabalho. Por sua grande abrangência, este capítulo pode servir a outras aplicações em acústica, música, arquitetura e, notadamente, como ferramenta de apoio didático. Ainda são apresentados detalhadamente princípios, *design* e funcionamento dos Difusores Schroeder, além de uma crítica a eles, baseada em diversas publicações de destacados pesquisadores, onde são examinadas particularidades de desempenho de interesse.

Capítulo 7: Campo de estudo

Neste capítulo, à luz de uma análise comparativa entre os difusores de Schroeder e a organização serial na *técnica de composição com 12 sons* de Schoenberg, são propostas soluções de *design* de três novos tipos de difusores que não apresentem características de absorção, como os de Schroeder, e que tenham grande abrangência em frequência, aplicados a adequações acústicas nos dois estudos de caso considerados neste trabalho: LAMI (ECA/USP) e Sala Villa-Lobos (UNIRIO).

Capítulo 8: Resultados

Aqui são apresentados os projetos detalhados de adequação sugeridos para cada uma das salas dos casos de estudo, bem como a simulação de desempenho das superfícies seriais através de análise modal. Considerando os critérios de avaliação acústica de salas vistos no *Capítulo II*, são apresentados os resultados esperados para cada projeto.

Capítulo 9: Discussão dos resultados e conclusões

Apresenta uma análise geral dos resultados obtidos comparando-os com os objetivos estabelecidos para este trabalho.

Anexos

Trazem esquemas, descrições, ilustrações e demais complementos de informação de diversas atividades e etapas desta pesquisa.

1. MOTIVAÇÃO

1.1 A IMPORTÂNCIA DO UNIVERSO SONORO E DA CONSCIÊNCIA DOS FENÔMENOS ACÚSTICOS NO DESENVOLVIMENTO DA MÚSICA NO SÉC. XX

No decorrer do século XX a evolução da música esteve intimamente ligada à expansão do universo sonoro, seja pelo interesse em descobrir novos sons, em assimilar, com a

qualidade de musicais, muitos dos sons que até então estavam fora desse contexto, como pela tomada de consciência da realidade acústica do som, abrindo possibilidades para contribuições da acústica à criação em si e à produção de materiais musicais, bem como o desenvolvimento de investigações tecnológicas aplicadas à música.

Houve a emancipação da percussão com Edgard Varèse (1883-1965), as composições com ruídos dos futuristas, a procura de novas sonoridades em novos instrumentos (*Thérémin* (1920), *ondes Martenot* (1928)), a criação radiofônica, que acabou levando Pierre Schaeffer à invenção da música concreta em 1948; a invenção dos sintetizadores eletrônicos e todos os novos meios tecnológicos desenvolvidos para aplicação em música. A escrita de Giacinto Scelsi (1905-1988), que compôs várias obras empregando uma única altura, leva em consideração a totalidade do fenômeno sonoro, desenvolve um discurso musical enunciado em grande parte sobre o timbre. Pierre Schaeffer (1910-1995) foi ao encontro dos sons através da escuta reduzida (*epoché*) - uma abordagem fenomenológica - desvinculando o sentido original do objeto sonoro para estudá-lo, assimilá-lo e criar outro sentido, de ordem poética, gerado pelo discurso musical. Mais tarde a fusão da música concreta e eletrônica acabou levando à música eletroacústica. Tristan Murail (1947) e Gérard Grisey (1946-1998) sensibilizados e influenciados por Scelsi, convivendo com os novos meios eletroacústicos inovaram a escrita musical a partir da observação-análise de fenômenos acústicos e procedimentos de tratamento do sinal sonoro, deduzindo modelos a serem aplicados em vários níveis da estrutura musical. Assim inauguraram a chamada “Música espectral”.

Durante a segunda metade do século XX, surgiram centros de criação musical incorporando pesquisas em diversos domínios, como acústica, fonética, ciências cognitivas e tecnologia, aplicados à música, que trouxeram subsídios à criação musical e foram essenciais para se chegar a novas formas, estruturas, procedimentos e mesmo novas vertentes musicais. Ora pesquisador-compositor, ora compositor-pesquisador, o criador musical, categoria na qual este candidato se enquadra, busca sua inspiração nas formas naturais do som e seus desdobramentos, onde acaba achando a própria renovação da linguagem musical. Essa intimidade com o som caracterizou a criação musical do séc. XX, quando inclusive surgiram novos perfis de artistas e profissionais ligados ao som como, por exemplo, o *sound designer* no domínio audiovisual, o produtor fonográfico, o *tonmeister*, os criadores de *börspiel* (arte acústica), os sonoplastas de radio

teatro, e mesmo o *designer sonoro* no campo industrial. Mais especificamente no campo envolvido neste trabalho temos profissionais em acústica arquitetural, acústica de salas, conforto ambiental e controle de ruído, domínios que se desenvolveram interdisciplinarmente graças a pesquisadores de diversas áreas como física, construção civil, arquitetura, engenharia mecânica e materiais.

1.2 A IMPORTÂNCIA DO SILÊNCIO NA MÚSICA

Ao estudar o emprego musical do silêncio no segundo semestre de 1997 em disciplina ministrada pelo Prof. Dr. Marco Antonio da Silva Ramos na Pós-Graduação da ECA/USP revelaram-se imediatamente duas linhas de abordagem do silêncio: como ferramenta de escrita (elemento sintático) examinando, assim, os modos de ocorrência na música (instalação e extinção); e como portador de significado (elemento semântico), sentido verbal ou poético, este último compreendendo o emocional, o dramático e o estético.

As funções do silêncio na música são, então, de ordem técnica (construtiva) e poética (criativa), abarcando, em todos os níveis, transição e transformação. Esse estudo permitiu a elaboração de várias considerações sobre o silêncio:

O SILÊNCIO É UMA CONCEPÇÃO DA RAZÃO HUMANA – Uma ficção? - Ele chega até a ter duração enquanto que é simplesmente a ausência de som. É silêncio porque não há som. Esse vazio torna-se uma entidade concreta, leva nome e é medido. Fazer um silêncio não implica em construção material, ao contrário, suprime-se. É como construir com síntese subtrativa.

O SILÊNCIO NÃO PODE SER GRAVADO, somente os sons que o delimitam.

NA ARTICULAÇÃO, O SILÊNCIO SEPARA E UNE ao mesmo tempo as partes distintas e sucessivas. Existe uma força de repulsão entre as partes e ao mesmo tempo uma de atração. A duração ideal do silêncio é aquela que harmoniza e combina as duas forças. (comentários em aula)

VAZIOS NUM ESPAÇO PONTILHISTA – Ao preencher um vazio com partes separadas por micro-vazios articuladores, esses micro-vazios se preenchem com sentido, eles tem função na sintaxe do discurso, e deixam de ser vazios vazados e passam a ser vazios cheios. (imagem que surgiu observando um quadro na sala de aula: ele tem várias figuras geométricas

separadas umas das outras. Os espaços entre as figuras seriam micro-vazios. Esse quadro é uma perfeita ilustração da situação sonora de uma música pontilhista: diversos sons ilhados, separados por silêncios. Os silêncios entre os sons acabam se tornando tão importantes quanto os próprios sons.)

SILÊNCIO é um acorde de uma só nota, cuja altura se chama duração.

MOLDURA – Para terminar ou interromper um som, escreve-se uma pausa. Antes de começar também. Uma moldura. As frases são emolduradas por silêncios e as músicas empacotadas por silêncios antes e depois.

MÓBILE – A separação de blocos sonoros semelhantes por silêncios permite uma percepção variada e espacial, como se girássemos em torno de uma escultura para observá-la de diferentes ângulos. O silêncio é o tempo da caminhada de uma à outra. É também o tempo do móbile que faz uma evolução girando e pára. Isso se situa entre a função de ARTICULAÇÃO e a de TRANSIÇÃO/TRANSFORMAÇÃO.

SILÊNCIO REVELADOR. – Quando uma trama de fundo instalada há muito tempo (de forma que a escuta já tenha se “habituada” a ela a ponto de não percebê-la mais) pára abruptamente, esta supressão torna-se um evento significativo. Se a trama passava despercebida antes, sua omissão abrupta revela sua existência imediatamente anterior. Esse silêncio pode entrar tão fortemente, chegando a dar a impressão de que ele tem um ‘ataque da saída’.

SILÊNCIO: ESTATICIDADE, IMUTABILIDADE – O silêncio é um intervalo de tempo no qual o ouvinte não recebe mais estímulos externos, e é marcado pela constância da ausência de som. Permanência de um estado imutável. Durante o silêncio, pela estaticidade do evento, nada ocorre e nada se acrescenta (fora as forças de equilíbrio de união e separação). Assim, um segundo a mais ou a menos de silêncio não altera semântica e sintaticamente seu conteúdo. - Existem situações musicais onde ocorre algo similar.

SILÊNCIO: ESTATICIDADE, IMUTABILIDADE – Certas situações, por exemplo, em músicas minimalistas, mostram que um segundo a mais ou a menos de música fluindo não altera essencialmente seu conteúdo, da mesma forma como se eliminássemos um tempo de compasso de uma obra erudita tradicional. A repetição sistemática acaba “lembrando” (recorrendo a) um mesmo gesto musical apresentado na célula inicial. Essa repetição sistemática acaba sendo estática e imutável como o próprio silêncio. - Um segundo a mais de silêncio ou um

segundo a mais de repetição sistemática têm a mesma permanência e imutabilidade e se equivalem. Se durante o silêncio o ouvinte NÃO RECEBE MAIS ESTÍMULOS, durante as repetições sistemáticas os estímulos já se incorporaram a ele e, portanto NÃO OS RECEBE MAIS.

SILÊNCIO: ESTATICIDADE, IMUTABILIDADE (FIGURA E FUNDO) – Sobre tapete sonoro, fundo repetitivo, evolui uma figura em manobras múltiplas. Se não houvesse fundo, a figura evoluiria sobre um fundo negro, neutro, da mesma forma. Nada alteraria suas evoluções (a não ser encontros ocasionais com elementos do fundo ao qual se sobrepõe). Se entre uma evolução e outra da figura houver fundo ou não, o conteúdo da evolução da figura não se altera. O tapete repete o mesmo gesto e todo o tapete, em qualquer instante, tem conteúdo igual ao gesto inicial repetido (um significado que ecoa no tempo, se estende, perdura, prolonga). Portanto se houver fundo repetitivo ou silêncio será a mesma coisa para a estória da figura eu está em primeiro plano exclusivamente. Assim, a trama contínua, sistemática e repetitiva equivale ao silêncio. Ant.: instrumento solista com acompanhamento tradicional. O acompanhamento é determinante nos caminhos que serão tomados pela composição e o solista depende deles para evoluir e complementar o discurso musical (pois alternadamente o primeiro plano é ocupado pelo solista e pela orquestra).

DINÂMICAS DURANTE O SILÊNCIO – Quando um sistema pára de evoluir, se congela. Pode ter movimento interno, temperatura, mas está imóvel e absolutamente constante. Não evolui de estado. Não varia. Está liso como o silêncio.

SILÊNCIO: TELA DE PROJEÇÃO – A mobilidade que pode haver durante um silêncio é a do ouvinte. Na escuta ativa, participativa, que vai de encontro com a música, durante os silêncios de ARTICULAÇÃO, TRANSIÇÃO, CORTE, o ouvinte completa/acrescenta suas impressões com imagens (imaginação), podendo fazer uma recapitulação do que ouviu; tentar prever o que vai acontecer a seguir; se deixar levar pelas imagens que estavam em si antes do silêncio; dar asas ao seu devaneio; antes de entrar a nova parte. Isso ocorre em intervalos de tempo em que o ouvinte NÃO RECEBE MAIS ESTÍMULOS EXTERNOS. Os estímulos estão dentro dele.

O fato de o silêncio ser comprovadamente um elemento musical fundamental está em consonância com o projeto desta pesquisa, que considera a resposta de um local de audição em relação ao silêncio que segue a extinção do som, ou seja, o som que se prolonga no silêncio.

A função e a qualidade do silêncio, elemento fundamental tanto para o conforto ambiental fisiológico quanto o conforto estético artístico do intérprete e do ouvinte, são determinantes e indispensáveis à expressividade da escrita, à concepção musical, à execução musical, à apreciação das execuções, à inteligibilidade das obras.

O Silêncio é, portanto, elemento fundamental à criação, construção, interpretação, expressão, inteligibilidade, clareza e apreciação de uma música

1.3 A IMPORTÂNCIA DO SILÊNCIO NA ACÚSTICA

A qualidade do Silêncio faz parte do conforto acústico. Entre os sinais sonoros carregados de significados, intrínsecos, objetivos, verbais ou poéticos, há articulações. Os elementos de linguagem são separados por silêncios e o conteúdo transmitido necessita que as separações sejam claras. O Silêncio, portanto, é fundamental à inteligibilidade e à compreensibilidade.

Esteticamente, a qualidade do Silêncio influi na qualidade dos sons, pois estes se prolongam no silêncio pela reverberação, ou seja, pela propagação em campo difuso. O Silêncio, apesar de não existir de forma absoluta, somente relativa³, deve ser suficientemente limpo para ter as múltiplas aplicações e funções que lhe são próprias.

Grosso modo, é graças ao silêncio que se pode avaliar a qualidade acústica de uma sala, tendo sido pela observação da passagem do *som* ao *silêncio* que Sabine iniciou a grande jornada da acústica de salas.

³ Por exemplo, uma articulação dinâmica com uma diferença de 70 a 80dB pode ser considerada como a chegada de um silêncio.

“Quando os ouvidos estiverem prontos, os lábios da sabedoria serão percebidos pela razão. Se descobrirá, então, o quanto esses sons já passaram por nós. E como somente os novos ouvidos é que puderam tirá-los do silêncio.”

2. INTRODUÇÃO

Viene qualche volta posto l'interrogativo se l'acustica architettonica sia più un'arte che non una scienza, ovvero se essa si fondi più sulla creatività. L'intuito e il senso estetico, che non su principi fisici e teorie. La domanda è forse oziosa, ma certamente è vero, rovesciando il ragionamento, che il risultato di un buon progetto di acustica architettonica si basa su un felice e complesso mix dei due ingredienti, su una profonda conoscenza dell'acustica filtrata dall'esperienza, dal gusto e dal giudizio individuali (SPAGNOLO, 2001, p. 651)

Durante a Idade Média definia-se como *Quadrivium* o conjunto das quatro artes de caráter matemático, a saber: aritmética, geometria, música e astronomia, às quais se adicionava o *Trivium*, compreendendo gramática, retórica e lógica, completando assim as sete artes liberais ministradas nas universidades. A música era considerada a Arte dos Sons.

Um dos grandes mistérios, e ao mesmo tempo uma dádiva, é que a um procedimento musical consistente pode existir uma aproximação ou um modelo matemático correlacionado. Acredito que o inverso igualmente possa ser verificado: a um procedimento matemático correspondendo uma ação musical. Que não se entenda aqui uma sustentação da arte pela lógica, mas uma aproximação entre áreas do conhecimento que se tangem na elegância com que as pessoas se expressam em ambas as disciplinas. Portanto, não é estranho que em movimentos virtuais de pensamento, por trás de estruturas – sejam estas lógicas ou intuitivas – coisas díspares e aparentemente desconexas no rigor da música e das numerosas disciplinas relacionadas à matemática, possam estar se correspondendo. Extrapolando a linha dessa trajetória, a música sempre teve uma relação privilegiada com a acústica arquitetônica, estimulando e suscitando novos, profundos e contínuos avanços (SPAGNOLO, 2001. p.651-652). Apesar de muitos critérios analisados serem objetivamente compreendidos e justificados com evidência, alguns

podem não ser tão triviais à primeira abordagem, tornando-se, porém, compreensíveis após a experiência vivida do fenômeno acústico. A evidência do som parece satisfazer, ou preencher, brechas tanto na lógica quanto na matemática. Os pontos expostos nos *itens 3.3 Critérios de avaliação acústica de uma sala, 3.4 Aspectos indesejáveis em salas de concerto: Eco, Ruído, Distorção e Não-Uniformidade*, e a seguir, estão nesse contexto.

Centrada no objetivo conforto acústico, esta pesquisa busca soluções para uma escuta musical de melhor qualidade e situa-se na confluência de três áreas do conhecimento: Artes e Humanidades (Música, Arquitetura), Ciência (Física: Acústica) e Tecnologia (Engenharia de áudio, Acústica aplicada, com alguns recursos de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica). Os produtos gerados – difusores acústicos operando em larga banda de frequência e minimizando perdas de energia – caracterizam-se como de inovação tecnológica. Ao tentar encaixar o todo na taxonomia do conhecimento atualmente empregada, sobretudo no Brasil, não será evidente designar uma área predominante à qual o trabalho pertença. Por outro lado, nenhum dos distintos setores do conhecimento envolvidos pode ser removido sem que o todo deixe de se sustentar. Em vista disso, esta pesquisa poderia ser considerada como própria de um setor interdisciplinar do conhecimento, emergente no Brasil, designado por *Sonologia*⁴, já implementado institucional e academicamente em vários países da Europa (Itália, Reino Unido, Espanha, Países Baixos) e América Latina (Chile). Designando o estudo do som, a *Sonologia* abrange vários campos da Arte e da Ciência: acústica, tecnologia aplicada à música, informática e computação, composição, arte sonora, interpretação musical, psicoacústica, ciências médicas e biológicas aplicadas à música⁵, *design* sonoro, *sound design*, se estendendo de forma ramificada em diversos outros setores. Dessa forma, o arcabouço da *Sonologia* se mostra suficientemente amplo para abranger, de forma consistente, todo trabalho realizado, propulsionado por idéias e fundamentado em princípios nascidos, desenvolvidos, colhidos, verificados e validados em todos os setores do conhecimento envolvidos nesta pesquisa interdisciplinar.

⁴ *Sonology* (inglês), *Sonologie* (francês – usado também em textos alemães)

⁵ Apesar de estar motivado aqui essencialmente pelas disciplinas de psicofisiologia da audição e musicoterapia, há em ciências médicas e biológicas um setor igualmente denominado por *sonologia*, dedicado ao estudo de aplicações baseadas em ultrassom.

2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

A proposta desta pesquisa é obter melhorias para o conforto e a estética acústica de locais para audições e performances musicais. Sendo os difusores elementos de importância significativa na concepção acústica de salas para música, o foco desta pesquisa, buscando meios para obter melhoria da qualidade sonora (minimizar modos normais, potencializar a reverberação, gerenciar primeiras reflexões, dar máxima abrangência à cada fonte sonora em todas as localizações em que possa se situar), se concentrou naturalmente na concepção de difusores sonoros com performance diferenciada em relação aos que comumente têm sido empregados em tratamento acústico, sobretudo quanto à produção de campo difuso sem perda de energia da onda incidente, uma vez que a perda de energia, como uma absorção, diminui o tempo de reverberação e, conseqüentemente, o parâmetro *preenchimento do som* (dependente da reverberação), um dos fatores determinantes da estética acústica e do conforto adequado à audição musical. Serão considerados estudos de caso (LAMI/ECA/USP e Sala Villa-Lobos/UNIRIO) para os quais foram desenvolvidos difusores atendendo às necessidades e especificidades de cada local.

2.1.1 Acústica, arquitetura e música: criação e performance

A *acústica de salas*, como área do conhecimento, surgiu no final do séc. XIX, nos EUA, com seu pioneiro Wallace Clement Sabine (1868-1919) que investigou em 1895-8 a influência da absorção sonora no tempo de reverberação da sala de palestras do *Fogg Art Museum* na Universidade de Harvard, tendo chegado à famosa expressão para o cálculo do tempo de reverberação T , sendo este o tempo necessário para a intensidade do resíduo do sinal audível (reverberação) cair 1.000.000 de vezes em relação ao sinal inicial:

$$T = 0,161 \frac{V}{A} \quad \text{Eq. 2-1}$$

V é o volume da sala em metros cúbicos e A a absorção total em metros quadrados. A fórmula de Sabine tem sido usada até então com eficiência, em condições específicas, para predição do tempo de reverberação em diversos tipos de salas.

A unidade de absorção do som, em metros quadrados, refere-se à área equivalente de uma janela aberta. Esta unidade deriva do fato que a energia do som incidente numa janela aberta

não retorna à sala e passa totalmente para o meio exterior. Seria o mesmo efeito que o de um material com absorção de 100% nas mesmas dimensões que a referida janela. Assim, em homenagem a W. C. Sabine, denomina-se 1 metro quadrado de material absorvendo 100% da energia sonora incidente como 1 (um) Sabine Métrico.



Figura 2.1 – Imagem atual do *Fogg Art Museum Norton Lecture Hall*, *Harvard University – Massachusetts*, EUA, com capacidade para 373 pessoas. Fonte: <http://www.fas.harvard.edu/~ims/Class/foggnorton.html>

O primeiro auditório projetado por Sabine foi o novo *Boston Music Hall*, corriqueiramente denominado *Symphony Hall*, inaugurado em 1900.⁶ O tempo de reverberação é de 1,9s e o palco foi concebido para uma orquestra, sendo suas partições (paredes, teto e piso) orientadas para projetar o som ao público⁷.



Figura 2.2 – *Symphony Hall*, *Boston*, EUA.

Fonte:

<http://www.bso.org/genC/genCThree.jhtml?id=cat20118&area=inf>

⁶ <http://www.acoustics-engineering.com/sabin/wcsabine.htm> em 26/11/2006 23:26:52

⁷ <http://www.bso.org/genC/genCThree.jhtml?id=bcac120001&area=inf> em 26/11/2006 23:50:56

Nos avanços da acústica de salas relacionada à música na segunda metade do séc. XX até a atualidade destacam-se as importantes contribuições de Leo Beranek (acústica de salas de concerto) e Manfred R. Schroeder (difusores acústicos).

A sala de performance complementa o efetivo instrumental/vocal, formando com ele, de maneira integrada, um único corpo. Comparativamente pode-se pensar num violão. Sua caixa de ressonância amplifica, equilibra e projeta o som complementando o que ocorreu no restante do instrumento. Assim, não se pode separar um grupo musical do local onde estiver atuando. Uma evidência disso é o fato de que a performance musical se modifica em relação à resposta acústica do local, bem como a observação da evolução da escrita musical em relação à acústica dos locais de performance, chegando mesmo a constatar essa influência em compositores atuando em locais com acústicas diferentes em diferentes fases de sua vida (BERANEK, 1962; 2004).

2.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A proposta de atender às necessidades do ouvinte, do intérprete, considerando seu comportamento em relação à resposta acústica do local de performance, bem como atender às necessidades suscitadas pela escrita musical do compositor, levando também em conta o estilo e gênero da obra executada, e mais ainda, procurando meios para controlar a resposta da sala de forma racional, mescla aspectos objetivos (físicos) e subjetivos (de ordem estética), estando inserida naturalmente no campo interdisciplinar da pesquisa em tecnologia aplicada à música e criação musical com suporte tecnológico.

Citaria a forma como o pianista canadense Glenn Gould (1932-1982) lidava com suas gravações, interpretando as músicas tanto ao piano quanto nos procedimentos de gravação e mixagem, orientando o engenheiro de som. Entre os dois instrumentos (piano e estúdio) uma perfeita harmonia: espaço-musical e espaço-sonoro. O resultado foi Música, esculpida a partir do material bruto, captado por diferentes microfones, em momentos e situações escolhidos, o todo harmonizado com as obras, realçando as idéias musicais nelas expressas.

Desta forma, considerando a relação tripartite entre um intérprete, sua execução musical e a resposta acústica de um espaço de performance; considerando as necessidades do

intérprete, seu conforto acústico fisiológico e seu conforto sonoro estético artístico; considerando as necessidades inerentes à obra executada; desdobramentos possíveis deste trabalho podem vir a ampliar os meios expressivos para compositores e intérpretes.

O produto desta pesquisa inovadora em acústica poderá contribuir para a melhoria das condições acústicas de salas de ensaio, estúdios, escolas de música, salas de aula, ateliês, salas de reuniões, auditórios, espaços de projeção (cinemas, *home theaters*), teatros, óperas, salas de concerto, salas de exposição, enfim, todos espaços e locais com previsão de projeção sonora, natural ou artificial.

2.3 HIPÓTESE

Dado que as seqüências numéricas geradas por complexos algoritmos de resíduos quadráticos e raízes primitivas possuem propriedades semelhantes às seqüências empregadas em processos de composição com modelagem serial; constatando ainda, tanto nas seqüências de resíduos (quadráticos e raízes primitivas aplicadas em algoritmos para concepção de difusores) e de alturas (série musical empregada em processos criativos) a presença constante de simetrias; a forte influência que ambas as seqüências exercem na estrutura em desenvolvimento no campo de sua aplicação específica, num caso na música, noutro nos difusores; a proposta desta pesquisa é desenvolver processos de concepção e *design* de difusores a partir da manipulação de seqüências numéricas derivadas da técnica serial, visando obter novos difusores com performance satisfatória num amplo âmbito de freqüências, sobretudo sem perda de energia da onda incidente.

Schoenberg procurou com o modelo serial nivelar todas as notas ao mesmo grau de hierarquia, ou seja, nenhuma delas sendo mais importante que a outra. Os difusores buscam espalhar os sons uniformemente sem priorizar nenhuma direção. O princípio serial é, portanto, pertinente e potencialmente pode contribuir para esse fim.

2.4 DOIS ESTUDOS DE CASO

Os difusores produto desta pesquisa foram todos concebidos em função das necessidades específicas em dois casos estudados: o da adequação acústica da *sala de captação de som* do estúdio do LAMI/ECA/USP (São Paulo, SP) e do *auditório* e da *cabine de controle de gravação*

da Sala Villa-Lobos da UNIRIO (Rio de Janeiro RJ). Apesar dos objetivos práticos estabelecidos ao solucionar problemas pontuais, buscou-se fundamentar e generalizar os desenvolvimentos de modo que sejam conhecidos e dominados de forma a que suas aplicações possam extrapolar a especificidade dos problemas que os suscitaram. Os dois processos ocorreram de forma distinta, em momentos diferentes e em condições diversas. Enquanto no estúdio do LAMI pode haver medição antes dos estudos de adequação, a Sala Villa-Lobos já se encontrava em reforma e não oferecia condições para isso. Por outro lado, por ter orçamento aprovado e equipe trabalhando no local durante esta pesquisa, as propostas de adequação da Sala Villa-Lobos puderam ser realizadas, enquanto que as adequações desenvolvidas para o LAMI não tiveram uma possibilidade equivalente. Por essa razão é que nos resultados encontraremos somente dados de medições referentes unicamente à adequação acústica realizada na Sala Villa-Lobos. Esse foi também um dos motivos pelo qual se buscou avaliar o desempenho das *superfícies seriais difusoras* por simulação, o que de certa forma se tornou possível na fase final deste trabalho com a oportunidade oferecida pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp em fazer a análise modal com o aplicativo ANSYS. Devido à complexidade operacional deste e ao tempo exíguo restante para conclusão dos trabalhos, somente foi possível fazer a análise modal em duas dimensões, o que, mais uma vez, inviabilizou a avaliação das superfícies concebidas para o LAMI, por serem tridimensionais. Oportunamente a adequação proposta ao LAMI poderá ser avaliada tanto por *análise modal* quanto por *modelagem acústica de salas*, o que se espera fazer para reforçar os resultados deste trabalho.

2.4.1 São Paulo, USP, ECA, Laboratório de Acústica Musical e Informática (LAMI), Estúdio de gravação - Sala de tomada de som

A proposta do LAMI/ECA/USP baseava-se no desenvolvimento de pesquisas que gerassem produtos que contribuíssem à solução acústica do estúdio, concluindo de forma satisfatória o projeto em andamento. Os problemas percebidos, como resposta irregular (desequilíbrio na resposta em frequência, nos timbres dos instrumentos), gravações com coloração destacada da sala, foram confirmados pelas medições. Ao examinar a sala, além do paralelismo entre as superfícies, um rebaixamento devido a uma viga, atravessando a sala no sentido da profundidade, criou um volume lateral rebaixado. O grande volume interagiu com esse

menor. A relação entre ambos pareceu um fator de complicação. Neste caso de estudo, foi percebido que melhorias em relação à minimização da ação de ondas estacionárias (*modos normais*) seriam de grande importância. Devido ao volume reduzido da sala, a reverberação era muito pequena. Em alguns repertórios e estilos musicais, é importante para os músicos tocarem em uma sala mais viva. Surgiu então o desafio de procurar melhorar isso, aumentando o campo difuso do estúdio e obter um tempo de reverberação o maior possível. O emprego de difusores se mostrou a melhor possibilidade para atingir esse objetivo, superando a limitação do volume reduzido, o que contém o tempo de reverberação.

2.4.2 Rio de Janeiro, Uni-Rio, Sala Villa-Lobos, Auditório e Cabine de Controle de Gravação.

A antiga sala Villa-Lobos não tinha bom isolamento com o espaço externo e que, sendo um volume quadrilátero, suas dimensões não davam resultados satisfatórios para o *critério de Bonello* e o *diagrama de Bolt, Beranek e Newman*. A utilização prevista para o espaço em adequação era tanto para música erudita, como popular, com ou sem a utilização de suporte tecnológico, ou seja, envolvendo equipamentos de áudio para amplificação e projeção do som na sala. Para performances instrumentais e vocais, sem amplificação, apesar de ser pequena, tendo pé direito alto, parecia necessário assegurar a precisão de escuta em toda a platéia. O local previsto para a cabine de controle de gravação, num mezanino ao fundo da sala, possuía dimensões muito reduzidas e imediatamente representou um desafio: como fazer soar bem uma cabine larga com pouca profundidade. Era preciso imaginar alguma solução, mas ainda não havia idéia.

3. REVISÃO DA LITERATURA I : GENERALIDADES

A revisão da literatura (I, II, III e IV) foi concebida sobre três pilares, compreendendo:

- a) constatação e compreensão de fenômenos e problemas abordados, envolvendo, portanto, princípios de acústica, acústica de salas e conforto acústico voltado ao intérprete musical e ao ouvinte de forma ampla, critérios de avaliação acústica de uma sala (*Cf. itens 3.1 a 7.1*);

- b) teoria e *design* de difusores de Schroeder, bem como a crítica a estes baseada em publicações de referência (Cf. itens 7.2 a 5.2);
- c) subsídios para inovação tecnológica compreendendo: outras propostas de difusores, observação e análise da tipologia de simetrias (Cf. item 3.1) e de modelos musicais; fundamentos da *técnica de composição com doze sons* de Arnold Schoenberg (Cf. item 6.1) e *serialismo integral* (Cf. item 6.2) para posterior aplicação no *design* de difusores.

Em Revisão da literatura I será abordado o item (a); em Revisão da literatura II, o item (b); em Revisão da literatura III, elementos de acústica do item (c);e Revisão da literatura IV, elementos musicais do item (c).

3.1 TIPOLOGIA DA SIMETRIA

Para observação, estudo e análise da estrutura dos difusores de Schroeder e da Composição com doze sons, serão definidos aqui os três tipos de simetria considerados, exemplificados em (A) forma geométrica, (B) termos seqüenciais e (C) frase musical (Cf. Figura 3.1).

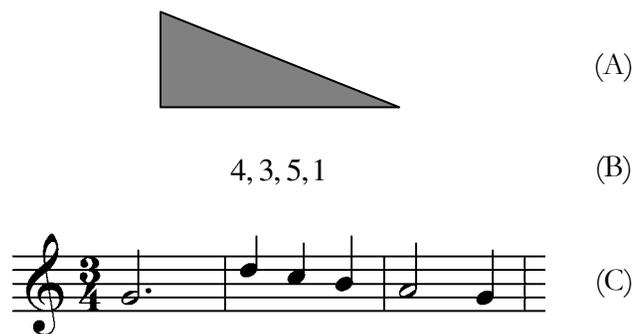


Figura 3.1 – (A) forma geométrica, (B) termos seqüenciais e (C) frase musical, empregados para a realização dos exemplos de simetria.

3.1.1 Simetria translacional

Trata-se da repetição de um elemento mantido de forma idêntica à sua figuração original, sendo somente transladado.

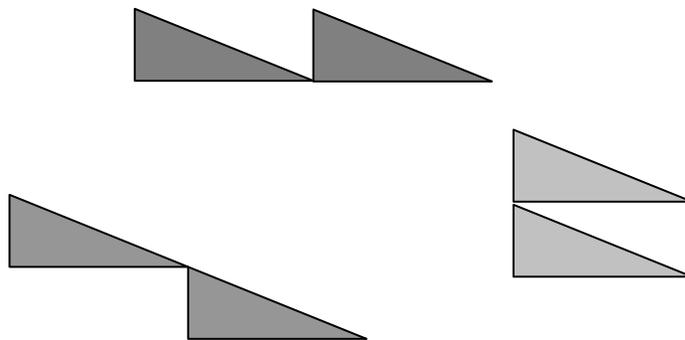


Figura 3.2 – Três exemplos de translação de um elemento geométrico: deslocamento num espaço onde as coordenadas são de grandezas idênticas.

Como no espaço geométrico, as abscissas e as ordenadas são, ambas, dimensões de espaço, não há distinção entre uma translação no eixo horizontal ou vertical, ou mesmo em diagonal.

Porém, em termos numéricos, quando está envolvida uma seqüência qualquer, portanto, uma sucessão de termos em uma dimensão específica, seja ordinal, seja no tempo, ou em qualquer grandeza seqüencial, poderíamos dizer que há uma *simetria translacional ordinal*, caracterizando uma *repetição*, e uma *simetria translacional de valor*, onde os termos finais são os termos iniciais adicionados ou subtraídos de uma constante referente à grandeza seqüenciada.

3.1.1.1 Simetria translacional ordinal

Assim, dada a Seqüência em valores absolutos: 4, 3, 5, 1

sendo então o 1º termo = 4, o 2º termo = 3, o 3º termo = 5 e o 4º termo = 4

sua seqüência *simétrica translacional ordinal*, gerando os termos 5º, 6º, 7º e 8º será: 4, 3, 5,

1, ou seja, a repetição da mesma (*Figura 3.9 (A)*).

3.1.2 Simetria axial

A *simetria axial*, também conhecida por simetria *bilateral* ou por *reflexão*, ocorre quando há um *eixo de simetria*.

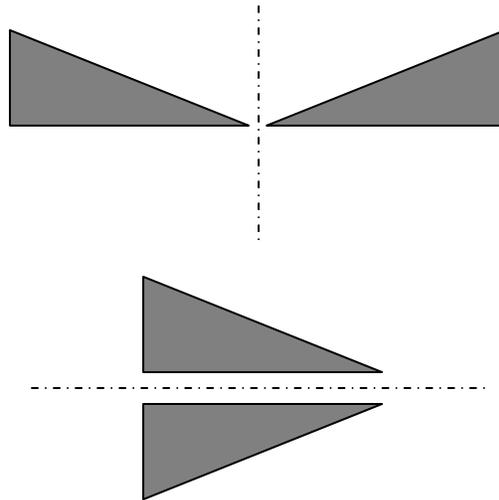


Figura 3.5 - *Simetria axial*: espelho.

Em termos numéricos, quando está envolvida uma seqüência qualquer, portanto uma sucessão de termos em uma dimensão específica, seja ordinal, seja no tempo, ou em qualquer grandeza seqüencial, poderíamos dizer que há uma *simetria axial ordinal* e uma *simetria axial de valor inverso a um módulo*, onde os termos finais são os termos iniciais invertidos em relação a um módulo definido pelo âmbito de variação da seqüência.

3.1.2.1 Simetria axial ordinal

Trata-se da repetição dos termos iniciais na ordem inversa à que se apresentaram.

Supondo uma seqüência inicial: 4, 3, 5, 1

a respectiva seqüência em *simetria axial ordinal* seria: 1, 5, 3, 4

e a seqüência final possuindo essa simetria: 4, 3, 5, 1, 1, 5, 3, 4 (*Figura 3.9 (C)*)

3.1.2.2 Simetria axial de valor inverso a um módulo

Supondo a seqüência inicial tendo os quatro primeiros termos: $\sigma_1=4$, $\sigma_2=3$, $\sigma_3=5$, $\sigma_4=1$ inscrita em um âmbito N , por exemplo, $N=9$ e, conseqüentemente, com âmbito entre 0 e 7, sendo, portanto, todos os termos dessa seqüência pertencentes a um espaço Modulo 7.

Para gerar uma *simetria axial de valor inverso a um módulo*, a primeira metade dos termos da seqüência devem satisfazer as seguintes condições:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &\neq N - \sigma_2 \\ \sigma_1 &\neq N - \sigma_3 \\ \sigma_1 &\neq N - \sigma_4 \\ \sigma_2 &\neq N - \sigma_1 \\ \sigma_2 &\neq N - \sigma_3 \\ \sigma_2 &\neq N - \sigma_4 \\ \sigma_3 &\neq N - \sigma_1 \\ \sigma_3 &\neq N - \sigma_2 \\ \sigma_3 &\neq N - \sigma_4 \\ \sigma_4 &\neq N - \sigma_1 \\ \sigma_4 &\neq N - \sigma_2 \\ \sigma_4 &\neq N - \sigma_3\end{aligned}$$

sendo o mesmo que:

$$\begin{aligned}N &\neq \sigma_1 + \sigma_2 \\ N &\neq \sigma_1 + \sigma_3 \\ N &\neq \sigma_1 + \sigma_4 \\ N &\neq \sigma_2 + \sigma_3 \\ N &\neq \sigma_2 + \sigma_4 \\ N &\neq \sigma_3 + \sigma_4\end{aligned}\quad \text{Eq. 3-1}$$

Estando satisfeitas essas condições, calcula-se a seqüência complementar invertida da seguinte forma:

$$\sigma_{\frac{i_{\max}}{2}} = N - \sigma_n \mid i_{\max} \text{ é par}$$

$$\sigma_{\frac{n+i_{\max}+1}{2}} = N - \sigma_n \mid i_{\max} \text{ é impar}$$

Eq. 3-2

Verificando a Eq. 3-1:

N = 9	$\sigma_1=4$	$\sigma_2=3$	$\sigma_3=5$	$\sigma_4=1$
$\sigma_1=4$	x	7	<u>9</u>	5
$\sigma_2=3$	7	x	8	4
$\sigma_3=5$	<u>9</u>	8	x	6
$\sigma_4=1$	5	4	6	x

Observamos que as condições não estão satisfeitas, pois temos dois valores que somados são iguais a $9=N$.

Adequando o valor de σ_3 de 5 para 7 temos:

N=9	$\sigma_1=4$	$\sigma_2=3$	$\sigma_3=7$	$\sigma_4=1$
$\sigma_1=4$	x	6	11	5
$\sigma_2=3$	7	x	10	4
$\sigma_3=7$	11	10	x	8
$\sigma_4=1$	5	4	8	x

temos a nova seqüência: 4, 3, 7, 1

Calcula-se então a inversão conforme a Eq. 3-2. Os termos acima das colunas passam a ser $\sigma_5, \sigma_6, \sigma_7, \sigma_8$, obtendo o seguinte resultado, conferido:

N=9	$\sigma_5=5$	$\sigma_6=6$	$\sigma_7=2$	$\sigma_8=8$
$\sigma_1=4$	9	x	x	x
$\sigma_2=3$	x	9	x	x
$\sigma_3=7$	x	x	9	x
$\sigma_4=1$	x	x	x	9

Sendo, portanto, a seqüência final: 1, 7, 3, 4, 5, 6, 2, 8 (Figura 3.9 (D))

3.1.2.3 Simetria axial em música

Como a representação musical se dá nos eixos do tempo (x) e das alturas (frequência) (y), quando o eixo de simetria espelhar o tempo a *simetria axial* será *ordinal* (*simetria axial no domínio do tempo*), tecnicamente denominada *retrogradação*. Quando espelhar as alturas, será *simetria axial de valor inverso a um módulo* (*simetria axial no domínio da frequência*), tecnicamente denominada *Inversão*.



Figura 3.6 – *Simetria axial ordinal*: (A) *retrogradação* (*simetria axial em relação ao tempo*) (eixo de simetria no final do terceiro compasso) e (B) *simetria axial de valor inverso a um módulo* (*simetria axial em relação à frequência*), tecnicamente denominada *inversão* (eixo de simetria na altura da nota Sol, considerando essa nota na segunda linha na clave de sol).

3.1.3 Simetria rotacional

Quando o elemento é rodado em torno de um eixo central ortogonal.

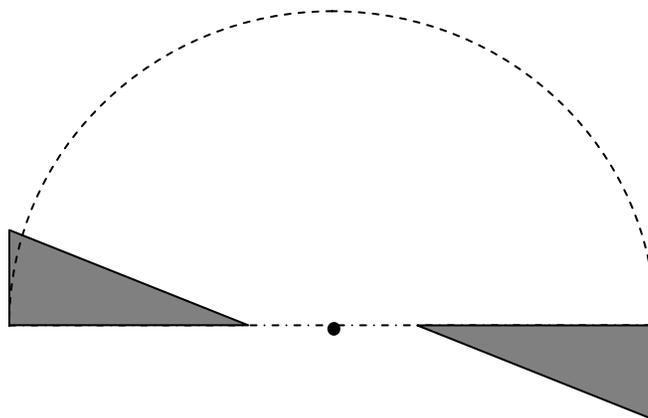


Figura 3.7 – *Simetria rotacional*: elemento rodado.

Em música essa simetria equivale ao *retrógrado da inversão*, que também pode ser equivalente a duas *simetrias axiais* consecutivas, uma no tempo (*retrógrado*) e outra no domínio da frequência (*inversão*).



Figura 3.8 – Simetria rotacional: retrógrado da inversão.

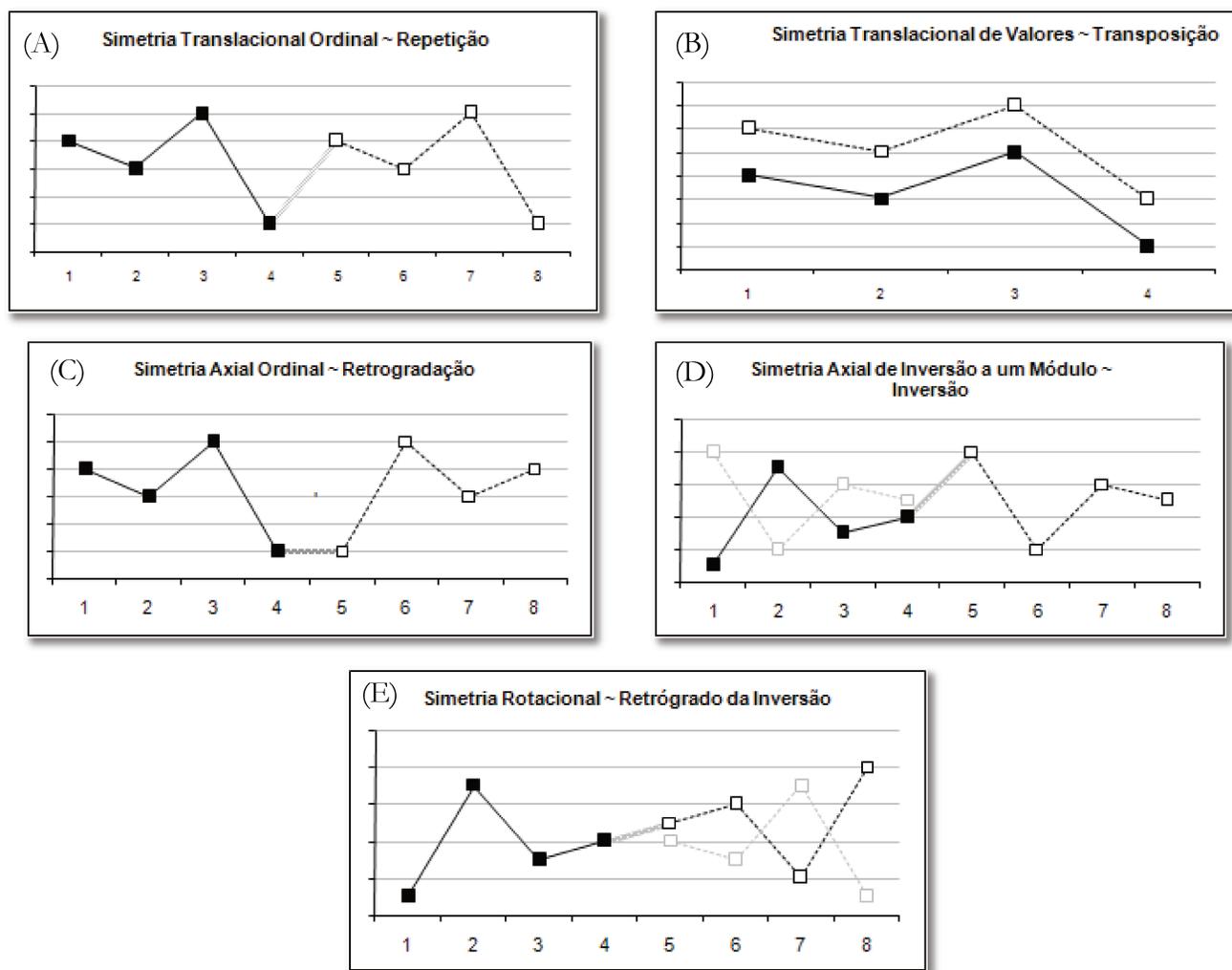


Figura 3.9 – Comparação dos gráficos resultantes das seqüências numéricas em diversos tipos de *simetrias*: (A) translacional ordinal, (B) translacional de valores, (C) axial ordinal, (D) axial de inversão a um módulo, (E) rotacional.

Numericamente em relação ao primeiro segmento da seqüência do item anterior (1, 7, 3, 4), a *seqüência com simetria rotacional* seria: 1, 7, 3, 4, 8, 2, 6, 5 (Figura 3.9 (E))

3.2 PRINCÍPIOS E CONCEITOS DE ACÚSTICA PERTINENTES A ESTE TRABALHO

3.2.1 Onda sonora

A sensação de *som* é produzida no ouvinte quando ondas longitudinais propagadas pelo ar atingem seus ouvidos (Sears, 1984, p. 478). Ao se propagarem, essas ondas produzem variação de pressão no ar num mesmo ponto. A pressão do ar eleva-se, assim, acima da atmosférica, tornando-se depois menor que esta. Ao se reproduzir repetidamente esse ciclo temos uma variação periódica, cuja representação mais simples (movimento harmônico simples) é dado pela função senoidal. A onda sonora pode ser representada no espaço a partir de sua origem (a fonte sonora) por:

$$y = A \sin(\omega t - kx) \quad \text{Eq. 3-3}$$

Sendo

y deslocamento do equilíbrio de um ponto intermediário

A deslocamento máximo (amplitude)

ω velocidade angular [rad/s]

k número de onda ($k = 2\pi/\lambda$)

λ comprimento de onda [m]

x distância entre o ponto onde se calcula a variação de pressão e a fonte sonora

[m]

A variação de pressão p acima e abaixo da pressão atmosférica é dada por:

$$p = -BkA(\omega t - kx) \quad \text{Eq. 3-4}$$

Sendo

B módulo de elasticidade volumétrico

A máxima variação de pressão a partir da atmosférica, chamada *amplitude de pressão* (p_{pico}), é, então:

$$p_{\text{pico}} = BkA \quad [\text{Pa ou N/m}^2] \quad \text{Eq. 3-5}$$

3.2.2 Potência sonora

A *potência* de uma fonte sonora é a energia acústica total emitida pela mesma (*Joules*) (e em todas as direções) na unidade de tempo (*segundo*) (GERGES, 1992, p. 35). A potência sonora depende apenas da própria fonte e independe do meio onde esta se encontra e pelo qual a energia se propaga. A potência sonora é dada em *Watts* sendo:

$$1 \text{ Watt} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

3.2.3 Intensidade sonora

Conforme Sears (1984, p. 480-481) a intensidade I de uma onda que se propaga é definida como a média no tempo da quantidade de energia transportada pela onda por unidade de área, e por unidade de tempo, através de uma superfície perpendicular à direção de propagação. Resumidamente, de acordo com Bistafa (2006, p. 12) e Sears (op. cit.), a intensidade é a quantidade média de energia (ou seja, a potência média) transportada por unidade de área.

$$I \rightarrow \frac{\text{Potência}}{\text{Área}} \rightarrow \frac{W}{m^2}$$

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \text{Eq. 3-6}$$

ρ densidade [Kg/m^3]

c velocidade de propagação do som no ar [m/s]

$\rho.c$ impedância [rayls]

3.2.4 Nível de intensidade sonora

Trata-se de um valor mensurável correlacionado ao *volume* sonoro percebido pelo ouvinte (som forte, som fraco). Em música esse volume é denominado *dinâmica* e está associado às intensidades, como por exemplo: *pp* – *pianíssimo*; *p* – *piano*; *f* – *forte*; *ff* – *fortíssimo*. De acordo com Sears (op. cit.) devido à grande variação de intensidades para as quais o ouvido é sensível, torna-se mais conveniente usar uma escala logarítmica do que a aritmética.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad \text{Eq. 3-7}$$

Sendo $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ uma intensidade de referência arbitrária, correspondendo ao som mais débil que se pode ouvir.

3.2.5 Nível de potência sonora

O nível de potência sonora é uma característica intrínseca da fonte (BRITO, 2006, p. 26), não sendo influenciado pelas características dos campos abertos e fechados, válido em qualquer situação.

Conhecendo-se a *potência* W de uma fonte sonora, seu *nível de potência sonora* L_W pode ser calculado da seguinte forma:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ [dB]} \quad \text{Eq. 3-8}$$

W potência da fonte [Watts]

W_0 potência de referência 10^{-12} Watt

3.2.6 Nível de pressão sonora

O *nível de pressão sonora* conforme Bistafa (2006, p. 17) é a medida física preferencial para caracterizar a sensação subjetiva da intensidade dos sons, ou seja, o *volume* percebido. Como a variação de energia de uma onda sonora é proporcional ao quadrado da pressão, fazendo as devidas substituições da Eq. 3-6 na Eq. 3-7 temos:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ [dB]} \quad \text{Eq. 3-9}$$

sendo

p_0 pressão de referência $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ ($20 \text{ } \mu\text{Pa}$)

O *nível de pressão sonora* de um equipamento é obtido através de um medidor de pressão sonora, mas é altamente influenciável por fatores como a reflexão, difração, absorção e difusão sonora, produzidos por paredes e objetos em um campo fechado e pela distância entre a fonte de ruído e o medidor em um campo aberto (BRITO, 2006, p. 25).

3.2.7 Diretividade de uma fonte sonora

Segundo Gerges (1992, p. 37) fontes reais dificilmente irradiam de forma igual em todas as direções, sendo necessário, portanto, avaliar o *índice de diretividade* Q de uma fonte sonora numa direção dada (θ) definida pelo quociente da intensidade irradiada nessa direção pela média total irradiada ao redor da fonte.

$$Q_{\theta} = \frac{I_{\theta}}{I_{av}} = \frac{\text{intensidade na direção } \theta}{\text{intensidade média ao redor da fonte}}$$

Q = diretividade da fonte sonora (valores 1, 2, 4, 8)

1 - distante de qualquer superfície;

2 - sobre uma superfície;

4 - na intersecção de duas superfícies ortogonais;

8 - na intersecção de três superfícies ortogonais.

3.2.8 Campo livre (ou Campo direto), Campo difuso e Campo reverberante

Para efeitos da norma NBR 7731 da ABNT (1983, p. 3) as seguintes definições foram empregadas:

Campo livre é o campo acústico que se encontra numa área distante das superfícies refletoras de modo que as mesmas exerçam efeito desprezível sobre a região de interesse. Num *campo livre*, o nível cai de 6 dB a cada vez que a distância à fonte sonora for dobrada.

Campo difuso é o campo acústico de densidade energética sonora uniforme em que a potência acústica por unidade de área é a mesma em todas as direções.

Campo reverberante é a porção de campo acústico no qual é desprezível a influência de som recebido diretamente da fonte.

Campo livre é o que se produz numa *câmara anecóica* (câmara surda) ou ao ar livre, por exemplo, num gramado aberto.

Campo difuso é aquele onde o som se propaga em todas as direções se tornando “caótico” devido à complexa quantidade de trajetórias. A reverberação é um fenômeno que ocorre em *campo difuso*. Medições em *campo difuso* são efetuadas em uma *câmara reverberante*.

3.2.9 Reverberação

A reverberação é um fenômeno decorrente do prolongamento, em campo difuso, da emissão de uma fonte sonora. Isso ocorre em determinados ambientes possuindo características adequadas, como superfícies reflexivas, dimensões suficientes, recinto fechado ou mesmo semi-aberto.

O ambiente é considerado ‘seco’ quando suas partições praticamente não produzem o retorno das ondas incidentes, como é o caso de uma *câmara anecóica*, onde as paredes, teto e piso são totalmente absorventes, criando assim em seu espaço interno um *campo livre*. O ambiente é considerado reverberante quando nele ocorrem reflexões múltiplas, de forma difusa, das ondas emitidas pelas fontes sonoras, como é o caso de uma *câmara reverberante*, uma cisterna ou uma grande catedral.

È importante não confundir reverberação com qualquer tipo de *eco* ou *delay*. Estes, contrariamente a uma mescla difusa das reflexões, são repetições discretas de um sinal original e serão vistos mais adiante.

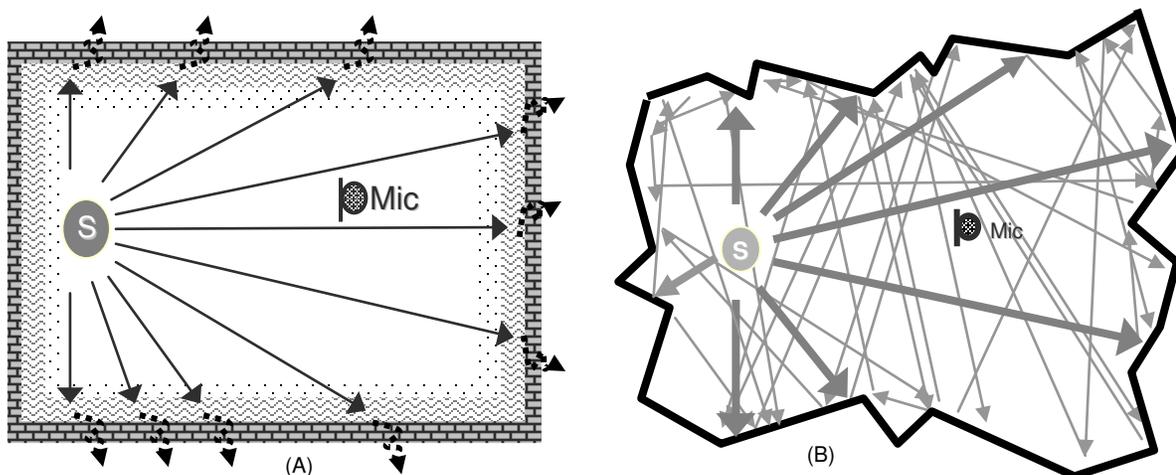


Figura 3.10 – (A) Câmara Anecóica: campo livre ou campo direto; (B) Câmara Reverberante: campo difuso.

3.2.9.1 Tempo de reverberação e a Absorção dos materiais

Para efeito da norma MB 2958 NBR 11957 da ABNT (1988, p. 1):

Tempo de reverberação é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora caia de 60dB depois que a fonte cessou⁸.

A extinção da emissão da fonte sonora deve ser abrupta e não suave e progressiva. O *tempo de reverberação* é representado de forma abreviada por RT_{60} ⁹.

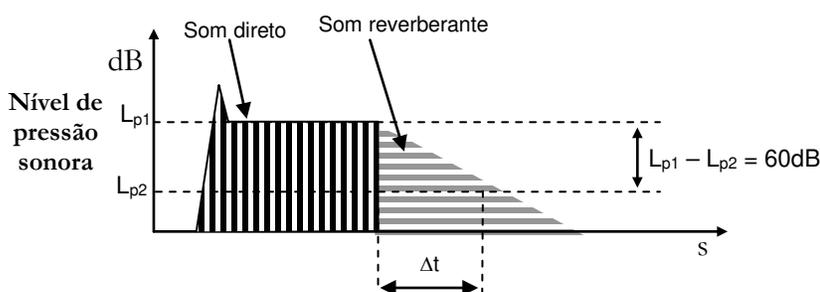


Figura 3.11 - Som direto e resíduo do som reverberante. Tempo de reverberação: intervalo de tempo para que o som reverberante decaia de 60dB.

⁸ Contudo, os primeiros 5 (cinco) dB de caimento são excluídos da medição do tempo de reverberação para evitar a influência das primeiras reflexões (item 3.2.10, p. 64) particularmente fortes. Dado o nível do sinal durante a emissão como máximo e igual a 0 dB, geralmente se considera os níveis entre -5 dB e -30 dB após a interrupção da fonte sonora (Pisani, 2001, p. 707). O tempo de caimento de 60 dB (T_{60}) é calculado, então, por regressão linear.

⁹ Do ingles, *Reverberation Time*.

O tempo de reverberação varia em função do *volume* V do recinto e da *absorção* A dos materiais em seu interior.

Um *coeficiente de absorção médio* pode ser definido para cada sala, sendo atribuído indiscriminadamente a cada metro quadrado do local, respeitadas as proporções dos materiais no todo da sala. Esse coeficiente médio dos materiais é obtido pela média ponderada dos materiais em função de suas superfícies relativas (Cf. Eq. 3-13, p. 79). Prado (1962, p. 54) cita Beranek (1954; 1993, p. 316) e indica que a um *coeficiente de absorção médio* de 0,05 corresponde uma sala viva; 0,10, a uma sala medianamente viva; 0,15, a uma sala média; 0,25, a uma sala medianamente surda; 0,40, a uma sala surda.

Tanto os *coeficientes de absorção* como os *coeficientes de absorção médios* são dados para cada banda de frequência, geralmente bandas de oitava, com frequências centrais de 125, 250, 500, 1K, 2K e 4KHz. Cada material pode absorver diferentemente de uma banda para outra, sendo, portanto, necessário efetuar os cálculos independentemente para cada uma delas.

Após essa explicação, seguimos: a Absorção geral de um recinto é determinada pela somatória do produto de cada *superfície* de revestimento pelo respectivo *coeficiente de absorção* de cada material; mais o produto da *quantidade de cada tipo de objeto* pelo coeficiente de absorção do respectivo objeto; bem como pelo *volume de ar* confinado, o que atinge as altas frequências, ou seja, os agudos (Cf. Eq. 3-11, p. 78).

Conforme Kinsler (1982, p. 317-321), o tempo de reverberação pode ser calculado através dos algoritmos de *Sabine*, *Eyring-Norris* (EYRING, 1930) e *Millington-Sette* (MILLINGTON, 1932, SETTE, 1932).

3.2.9.1.1 *Fórmula de Sabine*

$$T = 0,161 \frac{V}{A} \quad \text{Eq. 3-10}$$

sendo

$$A = \sum \alpha_i S_i + \sum a_j n_j + 4\mu V \quad \text{Eq. 3-11}$$

onde

V [m³] é o volume do recinto

A [Sabines métricos] é a absorção geral dos materiais e do ar

α_i coeficiente de absorção de cada material. Dado um conjunto de n materiais empregados, os coeficientes de absorção são dados por $\alpha_i \rightarrow \{\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n\}$ sendo que cada material tem seu coeficiente específico por banda de oitava.

S_i [m²] área revestida por cada material. Havendo n materiais as áreas referentes às superfícies ocupadas por cada material são designadas por $S_i \rightarrow \{S_1, S_2 \dots S_n\}$

a_j absorção de cada tipo de objeto. Havendo m objetos no local, o coeficiente de absorção de cada objeto é dada por $a_j \rightarrow \{a_1, a_2 \dots a_m\}$

n_j é o número de objetos de cada tipo que se encontra dentro do recinto, Havendo m tipos de objetos, a quantidade de cada objeto é dada por $n_j \rightarrow \{n_1, n_2 \dots n_m\}$

μ é a absorção por m³ de ar (em função da umidade relativa do ar e da frequência do som absorvido)

3.2.9.1.2 Fórmula de Eyring-Norris

$$T = 0,161 \frac{V}{4\mu V - S_{Total} \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad \text{Eq. 3-12}$$

sendo

$$S_{Total} = \sum_{i=1}^n S_i$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S_{Total}} \quad \text{Eq. 3-13}$$

N.B.: $\bar{\alpha} = \alpha_{\text{médio}}$

onde

S_{Total} [m²] área total das superfícies de revestimento de todos os materiais

S_i [m²] área revestida por cada material. Havendo n materiais as áreas referentes às superfícies ocupadas por cada material são designadas por $S_i \rightarrow \{S_1, S_2 \dots S_n\}$

V [m³] é o volume do recinto

$\alpha_{médio}$ coeficiente de absorção médio dos materiais

α_i coeficiente de absorção de cada material. Dado um conjunto de n materiais empregados, os coeficientes de absorção são dados por $\alpha_i \rightarrow \{\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n\}$ sendo que cada material tem seu coeficiente específico por banda de oitava.

μ é a absorção do ar por volume (m³) (em função da umidade relativa do ar e da frequência do som absorvido)

3.2.9.1.3 *Fórmula de Millington-Sette*

$$T = 0,161 \frac{V}{4\mu V - \sum S_i \log(1 - \alpha_i)} \quad \text{Eq. 3-14}$$

V [m³] é o volume do recinto

α_i coeficiente de absorção de cada material. Dado um conjunto de n materiais empregados, os coeficientes de absorção são dados por $\alpha_i \rightarrow \{\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n\}$ sendo que cada material tem seu coeficiente específico por banda de oitava.

S_i [m²] área revestida por cada material. Havendo n materiais as áreas referentes às superfícies ocupadas por cada material são designadas por $S_i \rightarrow \{S_1, S_2 \dots S_n\}$

3.2.9.1.4 *Fórmula de Fitzroy*

Fitzroy (1959) propõe um algoritmo baseado na somatória dos cálculos parciais em relação às superfícies ortogonais a cada eixo do espaço. Embora desenvolvido originalmente com a equação de Eyring-Norris (Eq. 3-15), segundo o autor (op. cit., p. 897), o mesmo procedimento pode ser adotado com sucesso empregando a fórmula de Sabine (Eq. 3-16).

$$T = 0,161 \frac{S_x}{S - S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} + 0,161 \frac{S_y}{S - S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} + 0,161 \frac{S_z}{S - S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \quad \text{Eq. 3-15}$$

$$T = 0,161 \frac{V}{S^2 \bar{\alpha}_x} S_x + 0,161 \frac{V}{S^2 \bar{\alpha}_y} S_y + 0,161 \frac{V}{S^2 \bar{\alpha}_z} S_z \quad \text{Eq. 3-16}$$

onde:

T [s] tempo de reverberação

V [m³] volume do recinto

S_x [m²] total das áreas internas das paredes laterais

S_y [m²] total das áreas do piso e do teto

S_z [m²] total das áreas internas das paredes ao fundo do palco e ao fundo da platéia (*end wall areas*);

S é a área total de todas as superfícies internas do recinto: $S = (S_x + S_y + S_z)$

$\bar{\alpha}_x, \bar{\alpha}_y, \bar{\alpha}_z$ são os coeficientes de absorção médios das superfícies reunidas respectivamente em S_x, S_y e S_z .

3.2.9.1.5 Comparação entre as fórmulas para cálculo do tempo de reverberação

Segundo Prado (1962, p. 73), a fórmula de *Sabine* geralmente é bastante precisa para ambientes vivos e de forma não muito irregular. De modo geral, em relação às demais fórmulas, a de *Sabine* resulta em valores mais elevados. Por sua vez, os valores obtidos com *Eyring-Norris* são mais precisos para salas secas, com coeficientes de absorção (α) grandes. Também é muito eficiente para qualquer tipo de sala com distribuição regular e uniforme dos materiais, não havendo muita diferença entre a absorção do piso, do teto e das paredes, e se houver materiais com absorção contrastante, estes se encontram bem misturados e regularmente distribuídos. A fórmula de *Millington-Sette* é obtida substituindo na fórmula de *Eyring-Norris* a média aritmética dos coeficientes de absorção, pela sua média geométrica, e o resultado obtido é sempre maior do que com *Eyring-Norris*.

A fórmula de *Fitzroy* proporciona resultados mais precisos do que as demais fórmulas no caso de salas onde a distribuição dos materiais absorventes não é uniforme.

3.2.9.2 Tempo de reverberação por bandas de frequência

O tempo de reverberação pode ser medido em bandas de oitava (125, 250, 500, 1K, 2K e 4KHz) ou em bandas de 1/3 de oitava 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1K, 1,25K, 1,6K, 2K, 2,5K, 3,15K, 4K, 5K, 6,3K, 8K, 10KHz). Para Knudsen (1978, p. 136) quando o termo tempo de reverberação é usado sem especificação, refere-se unicamente à banda de 512Hz e, mais recentemente, 500Hz. De Marco (1982, p.98) e Bistafa (2006, p. 247)¹⁰ adotam o emprego do *tempo de reverberação* na banda de 500Hz. Já Kuttruff (2000, 2. ed., p. 287-288, 1973, 1. ed.) refere-se ao *tempo de reverberação* de salas de concerto considerando as frequências de 500 e 1KHz. Da mesma forma Beranek (1962, p. 425; 2004, p. 504) quando fala de *tempo de reverberação* em uma sala de concerto, sem nenhuma qualificação, refere-se à uma medição efetuada com a sala completamente ocupada, tendo como resultado a média aritmética dos tempos de reverberação nas bandas de 500 e 1KHz (*Cf. Eq. 3-17*). Para Beranek, se o tempo de reverberação se referir a outras frequências ou situações diferenciadas de ocupação da sala, deve trazer consigo essas informações de forma clara e explícita. A Norma NBR 12179 para *Tratamento acústico em recintos fechados* traz os tempos de reverberação ótimos expressos em segundos na frequência de 500Hz, tal qual estabelecidos por Bolt, Beranek e Newman¹¹. Optou-se neste trabalho por seguir o procedimento como exposto por Beranek (1962; 1996; 2004), acrescentando a informação de que para esse cálculo os tempos de reverberação em 500Hz e 1.000Hz bandas devem ser tomados somente em banda de oitava, conforme Pisani (2001, p. 699).

$$T = \frac{T_{500\text{Hz oit}} + T_{1\text{kHz oit}}}{2} \quad \text{Eq. 3-17}$$

$T_{500\text{Hz oit}}$ Tempo de reverberação na banda de oitava de 500Hz

¹⁰ Bistafa (op. cit., p. 248) fornece um gráfico para obtenção dos tempos recomendados para outras frequências.

¹¹ A norma NBR 12179 não traz a referencia completa da fonte conforme recomendado pela norma ABNT NBR 14724 (ago 2002) e cita somente os autores sem especificar o ano da publicação. Pode ser igualmente uma referência à empresa *Bolt, Beranek and Newman Inc.*

T_{1KHz} Tempo de reverberação na banda de oitava de 1KHz

3.2.9.3 Nível de pressão sonora: som direto e som reverberante

3.2.9.3.1 Nível do som direto

$$L_{DIR} = L_w + 10 \log \frac{Q_\theta}{4\pi r^2} \quad \text{Eq. 3-18}$$

r = distância entre a fonte sonora e o ponto de medição [m]

Q_θ = diretividade da fonte sonora na direção θ

3.2.9.3.2 Nível do som reverberante

$$L_{RVB} = L_w + 10 \log \frac{4}{R_c} \quad \text{Eq. 3-19}$$

Sendo:

R_c a constante da sala¹² dada por:

$$R_c = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad \text{Eq. 3-20}$$

¹² Gerges (1992, p. 260) e Prado (1962, p. 56)

r = distância entre a fonte sonora e o ponto de medição ou cálculo

S = totalidade das superfícies de revestimento da sala

$\bar{\alpha}$ = coeficiente médio de absorção da sala

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum S_i \alpha_i}{S}$$

com

S_i = superfície total de cada material de revestimento

α_i = coeficiente de absorção de cada material de revestimento

3.2.9.3 Nível de pressão sonora total: som direto simultaneamente ao som reverberante

O nível de pressão sonora total do som direto simultaneamente ao som reverberante em uma sala ($L_{p\ Total}$) é dado por:

$$L_{p\ Total} = L_w + 10 \log \left(\frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_c} \right) \quad \text{Eq. 3-21}$$

3.2.9.4 Relação entre os níveis de pressão sonora do som direto e do som reverberante

A relação entre som reverberante e som direto independe da potência sonora emitida pela fonte, ou seja, se o intérprete está produzindo, por exemplo, um som *pp* ou um *ff*. Independe do volume da sala [V], sendo este um fator influenciando o *tempo de reverberação*. A partir de Eq. 3-18 e Eq. 3-19 a diferença entre o nível do som direto e o nível do som reverberante é dada por:

$$L_{DIR} - L_{RVB} = -17 + 10 \log \frac{S}{r^2} + 10 \log \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} + 10 \log Q_\theta \quad \text{Eq. 3-22}$$

A equação acima trata de um som estável ocorrendo simultaneamente à sua reverberação. Na prática, por exemplo, num concerto, se imediatamente após um *fortíssimo (ff)* vier

um *pianíssssimo* (*ppp*), o som reverberante do *fortíssssimo* poderia chegar ao mesmo nível ou até encobrir o *pianíssssimo*.

O balanço entre o som reverberante e o som direto depende da relação entre a distância da fonte ao ouvinte [r] e a totalidade das superfícies da sala [S], do coeficiente médio de absorção dos materiais e da diretividade da fonte [Q] - parâmetro correlacionado com a absorção do piso e com a posição da fonte em relação às superfícies reflexivas (paredes, refletores etc.).

Quanto mais longe estiver o ouvinte da fonte, maior será [r], maior será o nível do som reverberante em relação ao som direto. A distância da fonte sonora na qual o nível do som direto é igual ao som reverberante é chamada de *distância crítica*.

Para que o nível do som direto seja igual ao do som reverberante:

$$L_{DIR} = L_{RVB} \Rightarrow \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{4}{R_c} \quad \text{Eq. 3-23}$$

$$r = \sqrt{\frac{QR_c}{16\pi}} = D_c \text{ (Distância crítica)}$$

De forma geral temos que se o nível sonoro emitido pela fonte é constante, na medida em que nos distanciamos dela o nível decai à razão de 6dB cada vez que a distância é dobrada. Enquanto o nível do som direto é superior ao nível do som reverberante, estaremos em *campo direto*. Quando o nível do som direto estiver abaixo do nível do som reverberante, estaremos em *campo difuso*, prevalecendo então o som reverberante. A transição entre ambos se dá num ponto chamado de *distância crítica*, no qual ambos os níveis se igualam. Para que a influência do *campo direto* no *campo difuso* seja desprezível é necessário que o *campo difuso* seja maior que o *campo direto* de pelo menos 10dB.¹³

¹³ As somas em dB com fatores distantes de mais de 10dB são iguais ao valor do maior dos fatores.

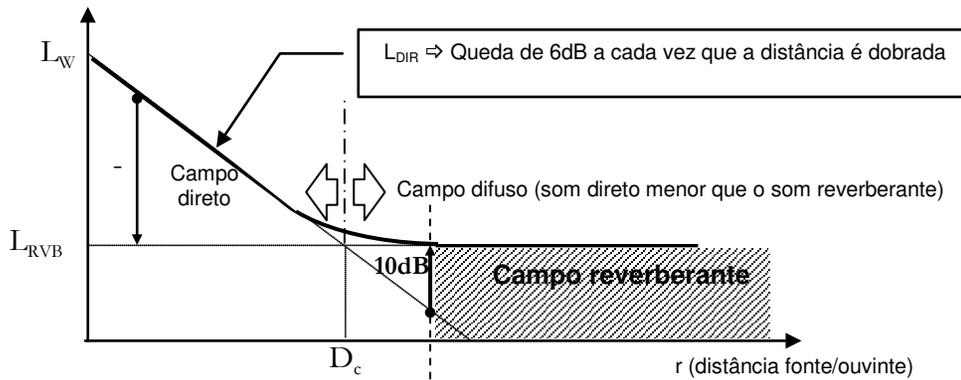


Figura 3.12 - Nível sonoro em função da distância em relação à uma fonte situada em uma sala possuindo reverberação. D_c é a *distância crítica*, na qual o som direto tem o mesmo nível que o som reverberante.

Segundo Davis (1987, p. 194), também é possível calcular a distância crítica [D_c] através dos seguintes algoritmos:

$$D_c = 0,057 \sqrt{\frac{QV}{RT_{60}}} \quad (SI) \quad D_c = 0,3121 \sqrt{\frac{QV}{RT_{60}}} \quad (ft) \quad \text{Eq. 3-24}$$

Quanto maior a soma das superfícies da sala (S), mais a energia do som reverberante se espalha (campo difuso) e menor a relação entre som direto e o som reverberante. (p.ex. após uma eventual reforma em uma sala, para um ouvinte a uma distância r da fonte e esta numa mesma posição no palco, se o coeficiente médio de absorção da sala permanecer o mesmo e a totalidade das superfícies aumentarem, o som reverberante será menor em relação ao som direto do que antes. Vale o contrário: para aumentar o ‘preenchimento do som’ (*fullness of tone*) numa sala sem mexer no coeficiente médio de absorção dos materiais nem no volume V , pode-se diminuir a totalidade das superfícies (S), eliminando painéis, refletores e objetos não fixados totalmente sobre qualquer superfície e que não tenham função acústica necessária no local.

Quanto mais diretiva for a fonte (supondo sempre que o eixo de diretividade está alinhado com o ouvinte) maior o nível do som direto chegando ao ouvinte, portanto quanto maior Q , maior a relação entre som direto e som reverberante, ou seja, maior o âmbito entre os dois. Se um suposto cantor no palco usar as mãos ao lado da boca, como um cone, direcionando a projeção de sua voz na direção de um ouvinte, ele estará, dessa forma, aumentando seu Q . O som será emitido mais intensamente na direção do ouvinte, e menos nas demais direções,

incluindo as que atingem as superfícies difusoras, sendo, portanto, o som direto reforçado em relação ao som reverberante.

Quanto mais reflexivos forem os materiais que revestem as superfícies internas do recinto, maior o nível do som reverberante, menor a diferença entre o som direto e o som reverberante¹⁴.

3.2.9.5 Reverberant-to-direct ratio (R/D), Massa da sala (R_M) e Razão som direto-som reverberante (DRR)

3.2.9.5.1 Reverberant-to-direct ratio (R/D)

De acordo com Farina (2001, p. 912-913) a *razão som reverberante-som direto* é dada por:

$$R/D = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\varepsilon} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right] (dB) \quad \text{Eq. 3-25}$$

onde ε é a duração do som direto. Caso essa duração seja de 5 milissegundos, R/D poderá ser igual à *clareza* $-C_5$ (com sinal invertido). Mas isso depende da variação da resposta do impulso.

“The Reverberant-to-direct sound is the level difference between the reverberant sound field and the direct sound... where ε is the duration of direct sound: if this is equal to 5ms, then R/D is simply equal to minus C_5 (with inverted sign).” (FARINA, 2001, p. 912-913)

Observa-se que R/D exprime em decibels¹⁵ a razão entre a energia do som reverberante e a energia do som direto.

¹⁴ Até atingir a distância crítica. Após, a diferença aumenta porém de forma invertida, sendo o som direto cada vez menor em relação ao som reverberante, este constante pois estamos em campo difuso.

¹⁵ Plural de decibel (décima parte de um Bel) com grafia idêntica em espanhol, italiano, francês e inglês.

3.2.9.5.2 Massa da sala (R_M)

Similarmente, a *Massa da Sala*, parâmetro proposto por Beranek e Schultz (1965 apud Pisani, op. cit., p. 703), mostra a relação entre a energia do som reverberante e a energia do som direto, atribuindo, porém, ao ε da Eq. 3-25 o valor fixo de 50 milissegundos:

$$R_M = 10 \log \left(\frac{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50ms} p^2(t) dt} \right) = 10 \log \left(\frac{1 - D_{50}}{D_{50}} \right) = -C_{50} dB \quad \text{Eq. 3-26}$$

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\%)$$

onde D e C referem-se, respectivamente, a *definição* e *clareza*, parâmetros apresentados no item 3.3.2 (p. 110). Segundo os autores, este parâmetro exprime o equilíbrio entre a mistura dos diversos instrumentos tocando conjuntamente e a *clareza* da sala.

3.2.9.5.3 Razão som direto-som reverberante (D/R) (DRR)

Iazzetta *et al.* (2004a) e Figueiredo *et al.* (2004) empregam um fator semelhante, porém invertido, denominado *Nível de Som Direto e Reverberante* (L) e, posteriormente, (FIGUEIREDO *et al.*, 2005) *Ratio D/R*.

$$D/R = 10 \log \left(\frac{E_{DIR}}{E_{RVB}} \right) (dB) \quad \text{Eq. 3-27}$$

onde

E_{DIR} energia do som direto

E_{RVB} energia do som reverberante

Posteriormente, Ueda, Figueiredo e Iazzetta (2005) exprimem esse parâmetro em termos de porcentagem, denominando-o abreviadamente DRR :

$$DRR = 100 \left(\frac{E_{DIR}}{E_{RVB}} \right) (\%) \quad \text{Eq. 3-28}$$

3.2.10 Primeiras reflexões (Early sound ou Early reflections)

São as reflexões que chegam ao ouvinte de várias direções imediatamente após o som direto emitido pela fonte sonora. Considera-se para isso os 80ms¹⁶ iniciais de um som, contados a partir da chegada do som direto ao ouvinte. Após esse intervalo de tempo, iniciam-se as reflexões provenientes da reverberação do local (BERANEK, 1996, p. 28). É interessante notar que esse intervalo de tempo está próximo do *limiar de mascaramento* (*threshold of indistinction* ou *threshold of masking*) de um sinal percebido e sua repetição subsequente, antes que o ouvinte perceba um sinal suplementar ou a deterioração do sinal. Conforme Haas (1972, p. 146), citando Petzold (1927, p. 8), o *limiar de mascaramento* (*threshold of masking*), intervalo máximo de tempo entre um som e sua primeira repetição, é dado por:

$$\Delta t = 50 \pm 10 \text{ ms}$$

As *primeiras reflexões*, claras e distintas, provêm de todas as direções: das paredes laterais, do palco, do teto, do fundo da sala. As *primeiras reflexões* laterais aumentam a *largura aparente da fonte* (*apparent source width* – ASW)¹⁷, e melhoram a qualidade sonora da sala (BERANEK, 1996, p. 28).

¹⁶ Em sua publicação de 1962 (p. 449) Beranek considerou apenas os primeiros 60 ms para análise do padrão (*pattern*) das *primeira reflexões*.

¹⁷ O parâmetro *LEV* (*Listener Envelopment*) que avalia o quanto o som reverberante chega ao ouvinte de todas as partes e a *ASW* compõem o parâmetro *Spaciousness* ('extensão / amplitude' da imagem sonora) (BERANEK, 1996, p. 23)

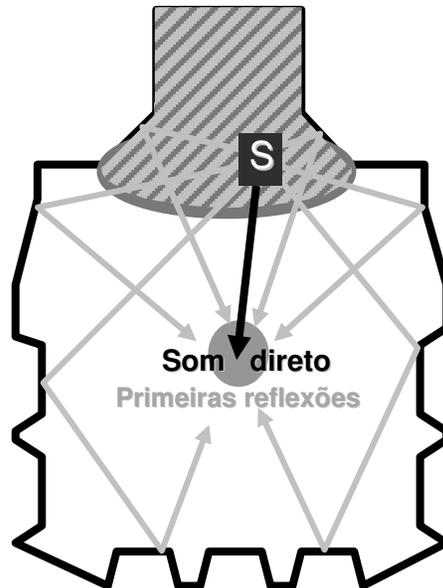


Figura 3.13 – Som direto (tom escuro) e primeiras reflexões (tom claro) recebidas pelo ouvinte.

As reflexões laterais contribuem para a imagem sonora formada no ouvinte tenha melhor qualidade de percepção espacial e relevo sonoro, características importantes nos critérios de avaliação da estereofonia.

As reflexões que chegam posteriormente ao ouvinte estão em campo difuso e, portanto, são menos claras, mais embrulhadas e homogêneas, o que caracteriza a reverberação.

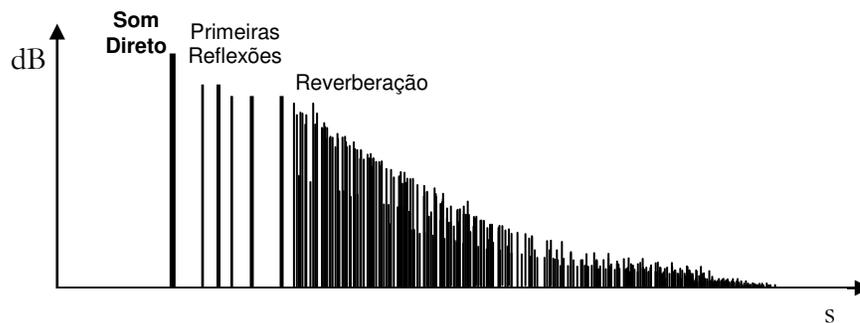


Figura 3.14 – Som direto, primeiras reflexões e reverberação.

3.2.11 Early decay time (EDT)

O *early decay time (EDT)*, que não deve ser confundido com *primeiras reflexões*, corresponde ao intervalo de tempo necessário para o caimento dos primeiros 10 dB do som reverberante, imediatamente após que a fonte cessou de emitir sinal (BERANEK, 1996, p. 29) (BERANEK, 2004, p. 23). O valor do *EDT* é calculado por regressão linear, multiplicando T_{10} por 6 (seis) de forma que a inclinação do caimento possa ser comparada à do T_{60} .

O valor de *EDT* tem sido calculado pela média aritmética de T_{10} em 500 e 1KHz.

É importante salientar que o *EDT* refere-se ao som reverberante, enquanto que as *early reflections* dizem respeito ao *pattern* de reflexões que chegam ao ouvinte antes do som reverberante. Segundo Pinasi (2001, p. 708) o *EDT* varia conforme a distância entre o ponto de medição e a fonte sonora e constitui, portanto, um parâmetro significativo para comparar diferentes pontos em uma mesma sala. Já Beranek (op. cit., p. 29) considera o *EDT* como um parâmetro importante para a comparação qualitativa entre diferentes salas.

Pisani (op. cit., p. 699) atribui a esse parâmetro valores de referência entre 1,8 e 2,6 segundos. Beranek (2004, p. 505) medindo o *EDT* em sala desocupada obteve nas melhores salas valores entre 2,25 e 2,75 segundos e, nas menos favorecidas, valores entre 1,4 e 2,0 segundos.

3.2.12 Quatro regiões características do comportamento do som em uma sala fechada

Everest (1988b, p. 43) considera, para um dado recinto com dimensões conhecidas, a divisão do espectro audível em quatro partes, atribuindo a cada uma delas um comportamento distinto do som. Uma região *A*, dominada pelos *modos normais*, caracterizada por um comportamento do som como onda; uma região *C*, caracterizada por trajetórias com reflexões especulares, ou seja, comportamento do som como raio; uma região *B*, dominada pela difração e difusão, na qual o som se comporta de forma transitória entre onda e raio, e uma região *X*, onde não se sabe bem o que acontece.

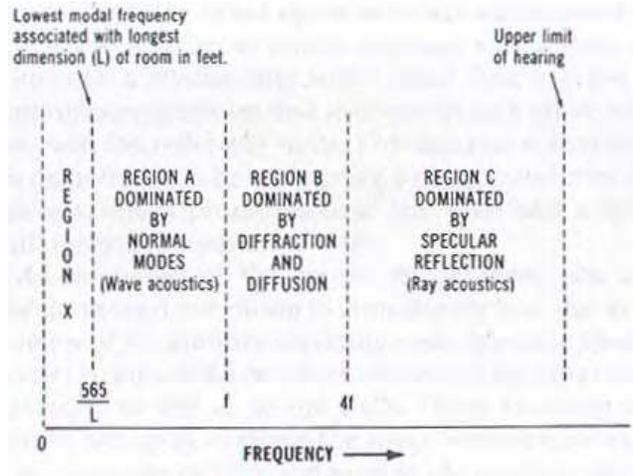


Figura 3.15 – As quatro regiões de uma sala: X, A, B e C.
 Fonte: Everest (1988b, p. 43, fig. 3-1)

As regiões A e B são separadas pela frequência f_{AB} dada por:

$$f_{AB} = 1892,9676 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \text{ (MKS)} \quad \text{Eq. 3-29}$$

Sendo:

RT_{60} = tempo de reverberação (s)

V = volume (m^3)

As regiões B e C são separadas pela frequência duas oitavas acima de f_{AB} .

$$f_{BC} = 4f_{AB} \quad \text{Eq. 3-30}$$

As regiões X e A são separadas pela frequência

$$f_{XA} = \frac{c}{2l_{\max}} \quad \text{Eq. 3-31}$$

Sendo:

l_{\max} = maior dimensão da sala (m)

3.2.13 Modos normais em recintos fechados

Raleigh demonstrou em 1896 que o ar compreendido num volume retangular fechado possui infinitos *modos normais* (EVEREST 1988b, p. 45-46) devido às ondas estacionárias que se produzem entre as partições paralelas. Esses modos são dados por:

$$f_{(i,j,k)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{L}\right)^2 + \left(\frac{j}{W}\right)^2 + \left(\frac{k}{H}\right)^2} \quad \text{Eq. 3-32}$$

onde

- c velocidade do som no ar SI (m/s) ou (ft/s)
- L largura do recinto SI (m) ou (ft)
- W profundidade SI (m) ou (ft)
- H altura SI (m) ou (ft)
- i, j, k números inteiros 0, 1, 2, 3...

Para cada valor de i, j e k teremos uma frequência $f_{(i,j,k)}$ correspondente a um *Modo de*

Vibração.

(i, j, k)		
(0, 0, 1)	(1, 0, 0)	(2, 1, 0)
(0, 0, 2)	(1, 0, 1)	(2, 1, 1)
(0, 0, 3)	(1, 0, 2)	(2, 1, 2)
...	(1, 0, 3)	(2, 1, 3)
(0, 0, k_{max})	...	...
(0, 1, 0)	(1, 0, k_{max})	(2, 1, k_{max})
(0, 1, 1)	(1, 1, 0)	(2, 2, 0)
(0, 1, 2)	(1, 1, 1)	(2, 2, 1)
...	(1, 1, 2)	(2, 2, 2)
(0, 1, k_{max})	(1, 1, 3)	...
(0, 2, 0)	...	(2, 2, k_{max})
(0, 2, 1)	(1, 1, k_{max})	...
(0, 2, 2)	(2, 0, 0)	...
...	(2, 0, 1)	(2, j_{max} , k_{max})
(0, 2, k_{max})	(2, 0, 2)	...
...	(2, 0, 3)	...
...
(0, j_{max} , k_{max})	(2, 0, k_{max})	(i_{max} , j_{max} , k_{max})

Os *modos de vibração* podem ser classificados em *modos axiais*, *tangenciais* e *obliquos*. *Modos axiais* (Figura 3.17) são aqueles formados por ondas estacionárias ocorrendo entre duas superfícies paralelas, ou seja, em um único eixo, sem a ação das demais, por exemplo, entre o teto e o piso. *Modos tangenciais* são os que ocorrem entre dois eixos, constituídos por dois pares ortogonais de superfícies paralelas, por exemplo, teto e piso (um par) e parede frontal e parede de fundo (outro par). *Modos oblíquos* são os que envolvem todas as superfícies internas que limitam o volume retangular da sala. A Tabela 3-1(p. 97) mostra os primeiros *modos normais* de uma sala retangular (Cf.Figura 3.16), com as respectivas classificações.

A Figura 3.18 mostra as quatro primeiras frequências de ondas estacionárias no *Modo axial*, representadas pelo nível de pressão sonora. Observa-se que os máximos de pressão estão sempre junto às superfícies, sendo que nesses pontos, a velocidade das partículas é nula. (EVEREST, 1988b, p. 48)

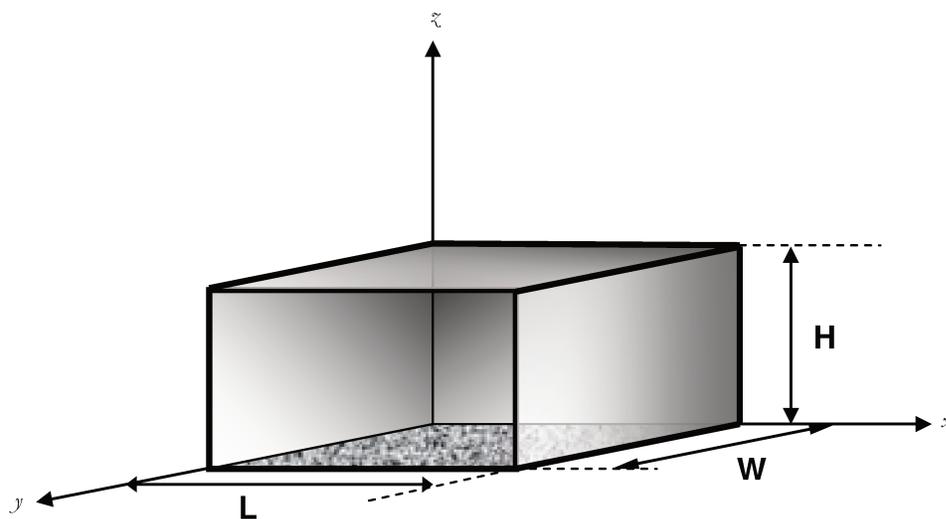


Figura 3.16 - Representação do volume de uma sala retangular: L – largura; W – profundidade; H – altura (pé direito).

Everest (1988b, p. 49) se refere a Morse e Bolt (1944) ao colocar que os *modos axiais* possuem quatro vezes mais energia que os *modos oblíquos*, bem como o fator de energia $\frac{1}{2}$ para ondas estacionárias dos *modos axiais*, $\frac{1}{4}$ para ondas estacionárias dos *modos tangenciais* e $\frac{1}{8}$ para ondas do *modo oblíquo*. Isso equivale a dizer que se considerarmos a energia de uma onda do *modo axial* como 0dB (zero dB), uma onda do *modo tangencial* terá relativamente -3dB e a energia de uma onda do *modo oblíquo* -6dB em relação à primeira.

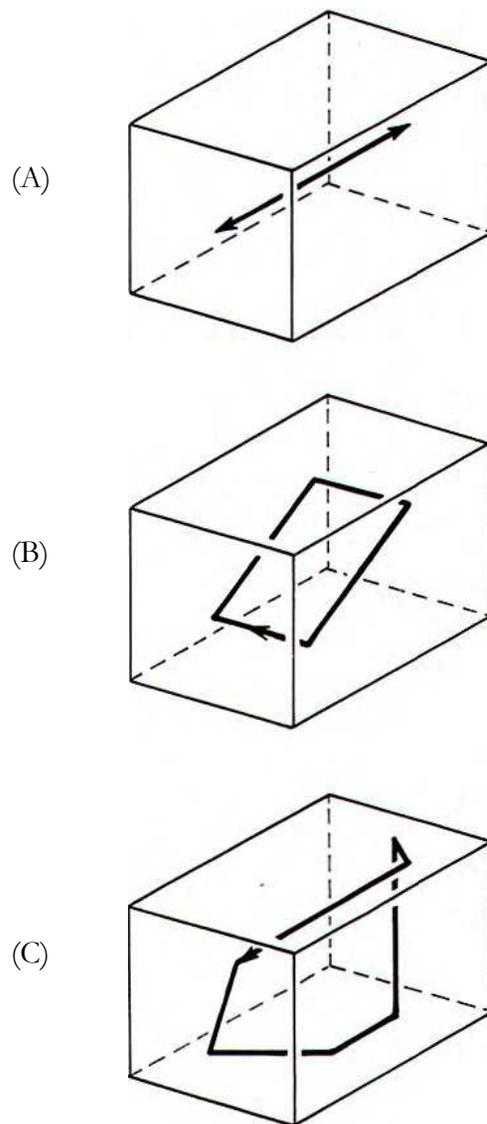


Figura 3.17 – Tipos de *modos normais* em uma sala fechada:
(A) axial, (B) tangencial e (C) oblíquo.
Fonte: Cooper (1996, p. 52, fig. 2-17)

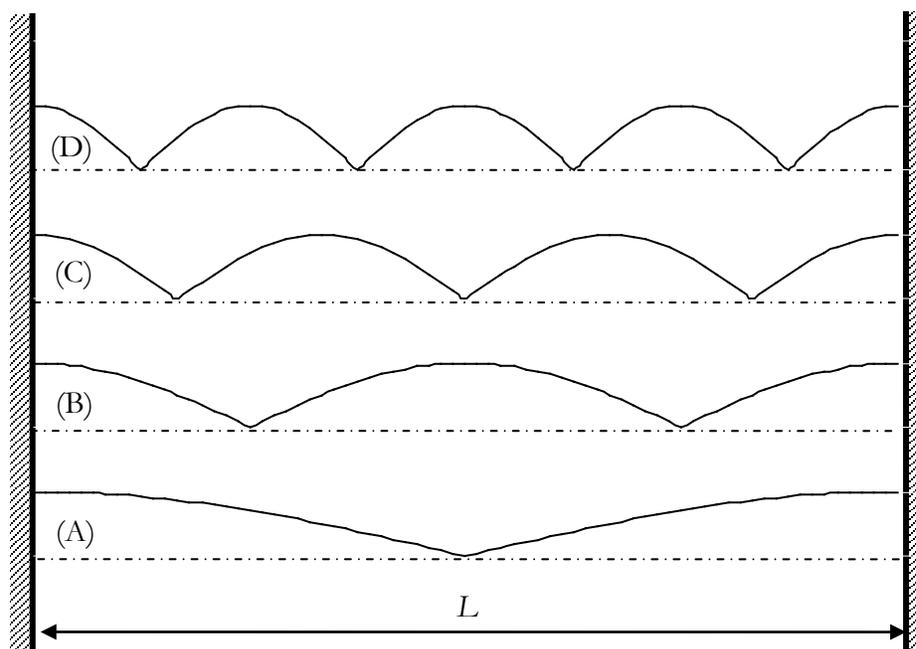


Figura 3.18 – *Modo normal* tipo *axial*: ondas estacionárias entre duas superfícies paralelas.. Representação dos quatro primeiros harmônicos pela variação do âmbito de pressão sonora: (A) fundamental ou primeiro harmônico $f = c/2L$; (B) segundo harmônico $2f$; (C) terceiro harmônico $3f$; (D) quarto harmônico $4f$. Os vales, pontos nulos, são os nós das ondas estacionárias, com pressão igual a zero e onde as partículas atingem velocidade máxima.

Para que a ação dos *modos normais* não seja prejudicial à resposta acústica de uma sala é necessário que a quantidade de modos (*axiais, tangenciais e oblíquos*) acumulada em cada banda de frequência seja uniforme e regularmente crescente, dos graves aos agudos. Caso contrário, haverá excessos e lacunas nas respectivas bandas de frequência com excesso ou falta de modos, o que resultará numa resposta acústica não adequada da sala, que deve ser regular, observadas as necessidades de qualidade para o parâmetro de *calor* (item 3.3.5).

No caso de salas retangulares, o algoritmo para o cálculo das frequências das ondas estacionárias foi visto no início deste item (Cf. Eq. 3-32, p. 93).

L	W	H	Tipo de Modo		
i	j	k	obliquo	tangencial	axial
1	0	0			A
0	1	0			A
0	0	1			A
1	1	0		T	
1	0	1		T	
0	1	1		T	
1	1	1	O		
2	0	0			A
0	2	0			A
0	0	2			A
2	2	0		T	
0	2	2		T	
2	0	2		T	
2	2	2	O		
2	1	0		T	
2	0	1		T	
2	1	1	O		
2	2	1	O		
2	1	2	O		
0	2	1		T	
1	2	0		T	
1	2	1	O		
1	2	2	O		
2	2	1	O		
0	1	2		T	
1	0	2		T	
1	1	2	O		
3	0	0			A
0	3	0			A
0	0	3			A
...

Tabela 3-1 – *Modos normais* em um volume de ar retangular fechado.

3.2.13.1 Critério de Bonello

Quando *modos normais* se acumulam preponderantemente, de forma irregular e descontínua numa única banda de frequência uma coloração indesejada pode prejudicar a qualidade sonora de uma sala. Everest (1988, p. 56-57) cita o critério desenvolvido por Oscar Bonello (1979a, 1979b, 1981), *Bonello criteria*, que consiste em calcular as frequências modais de uma sala e verificar como se distribuem em bandas de um terço de oitava. É importante que não haja modos coincidentes, porém, se isso ocorrer, é melhor que tenham pelo menos cinco

freqüências modais distribuídas na mesma banda. Para verificar essas condições, monta-se um diagrama contendo o número de freqüências modais por banda de freqüência de um terço de oitava e observa-se como a curva evolui. Se for progressivamente crescente, de forma regular, as freqüências modais estarão bem distribuídas. Entretanto, se a linha for irregular, poderá haver problemas de coloração na resposta acústica da sala.

No âmbito deste projeto foi realizada por este pesquisador uma planilha de cálculo para avaliar o *critério de Bonello* em bandas de 1/3 de oitava a partir de três dimensões dadas de um local, considerando os sete primeiros harmônicos de cada *modo (axial, tangencial e oblíquo)*, gerando como resultado *diagramas (Figura 3.19, Figura 3.20 e Figura 3.21)*. Com a ajuda desta ferramenta pode-se conhecer as melhores medidas para que um local tenha uma boa resposta acústica conforme este critério.

Dadas três configurações de medidas (*largura x comprimento x altura*):

(A) 5,7 x 6,0 x 3,14m

(B) 5,0 x 6,0 x 4,0m

(C) 1,5 x 8,0 x 2,3m (um local incomum, praticamente um corredor de passagem)

podemos avaliar o resultado esperado para cada configuração segundo o *critério de Bonello*.

Observa-se para (A) (Cf. *Figura 3.19*) um diagrama irregular nas regiões de 32 a 80Hz. Em (B) (Cf. *Figura 3.20*) temos uma acumulação progressiva de modos, evoluindo de forma mais uniforme e regular, o que lhe confere uma resposta acústica mais equilibrada e adequada, enquanto que para (C) (Cf. *Figura 3.21*) a evolução irregular da acumulação dos modos indica que essas medidas produzirão uma resposta acústica indesejada. O melhor resultado é, portanto, (B).

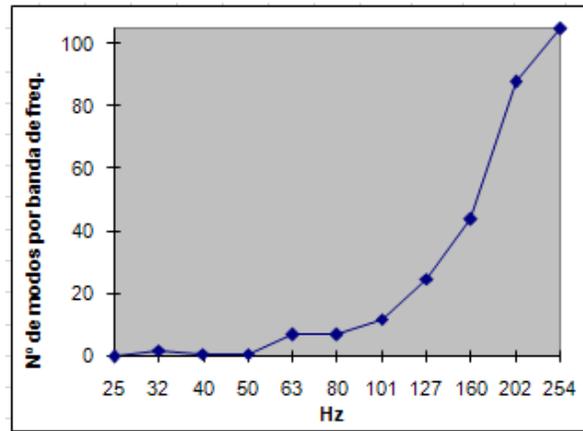


Figura 3.19 – Análise pelo *critério de Bonello* correspondendo às medidas (A) 5,7 x 6,0 x 3,14m ($L \times W \times H$).

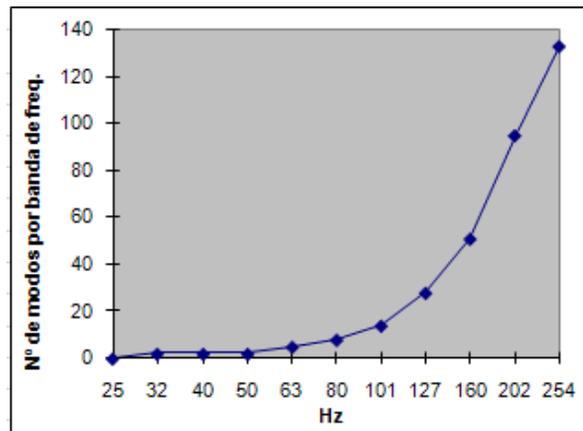


Figura 3.20 – Análise pelo *critério de Bonello* correspondendo às medidas (B) 5,0 x 6,0 x 4,0m. A acumulação de frequências modais é progressiva e uniforme.

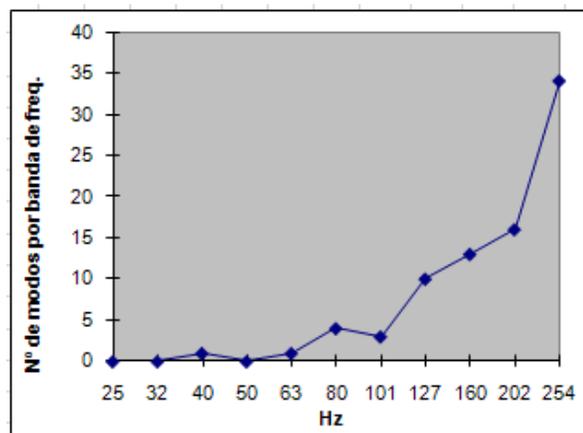


Figura 3.21 – Análise pelo *critério de Bonello* correspondendo às medidas (C) com 1,5 x 8,0 x 2,3m. Resultado irregular e evolução descontínua da acumulação dos modos pelas bandas de frequência.

3.2.13.2 Diagrama de Bolt, Beranek e Newman

Bolt, Beranek e Newman (s.d. *apud* DAVIS, 1987, p.218) conceberam um diagrama de proporções entre largura, comprimento e altura ($W \times L \times H$), através do qual é possível verificar se as dimensões previstas para um local darão resultados acusticamente aceitáveis.

As dimensões são tomadas da seguinte forma: Menor dimensão (z), Maior dimensão (y), Dimensão média (x): $\left(\frac{z}{z} : \frac{x}{z} : \frac{y}{z}\right)$. O Diagrama indica se o resultado está no âmbito entre os melhores encontrados, mostrados na *Tabela 3-2*.

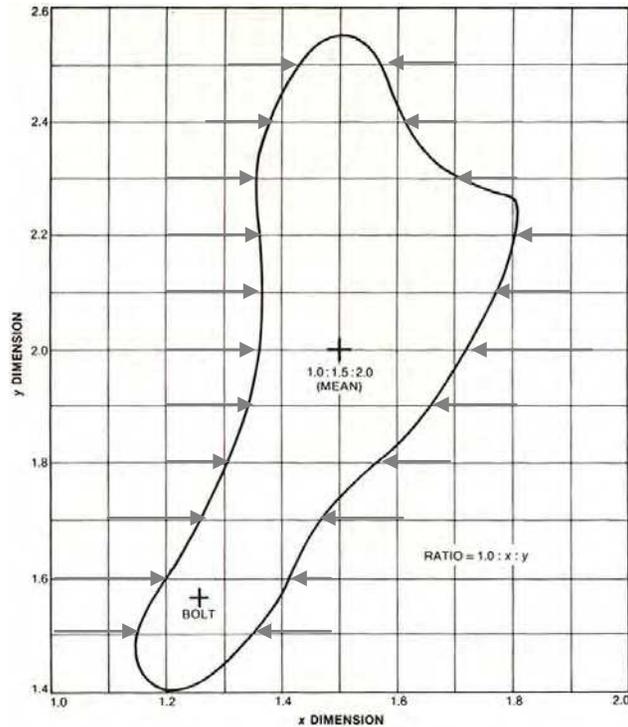
ASHRAE	1 : 1,17 : 1,47
	1 : 1,45 : 2,10
BOLT	1 : 1,28 : 1,54
IAC	1 : 1,25 : 1,60
SEPMeyer	1 : 1,14 : 1,39
$1 : \sqrt[3]{2} : \sqrt[3]{2}$	1 : 1,26 : 1,41

Tabela 3-2 – Melhores proporções encontradas por Bolt, Beranek e Newman. Fonte: Davis (op. cit.)

Figura 3.22 – Diagrama de Bolt, Beranek e Newman de proporções entre dimensões de uma sala ($L \times W \times H$). A partir da menor delas (Z) e da maior (Y) são calculadas as proporções:

$$z/z : y/z : x/z$$

O resultado deve estar compreendido no interior da figura ao lado.



Para avaliação das medidas de um local pelo *diagrama de Bolt, Beranek e Newman* foi empregada nesta pesquisa uma planilha realizada por Edu Silva¹⁸, fornecendo rapidamente o resultado a partir das medidas de uma sala quadrangular (*Cf. Figura 3.23*).

Diagrama Bolt / Beranek / Newmann **by Edu Silva**
versão beta 1

Dimensões da sala em metros

Comprimento (maior dimensão)	Y	9,00	2,25
Largura	X	6,00	1,50
Altura (menor dimensão)		4,00	1

Os valores em vermelho foram importados da planilha **modos.XLS**.
Os valores em azul são as dimensões normalizadas, sendo **altura = 1**, e as demais, derivadas desta.

Caso a altura seja maior que a largura, inverta os valores na planilha **modos.XLS**. Acusticamente não importa, desde que os valores obedeam a ordem acima, ou seja, a maior dimensão em cima, e a menor, embaixo.

O resultado para a sua sala está representado pelo círculo vermelho.
As melhores proporções estão representadas por pequenos quadrados coloridos, mas qualquer resultado dentro da linha pontilhada está OK.

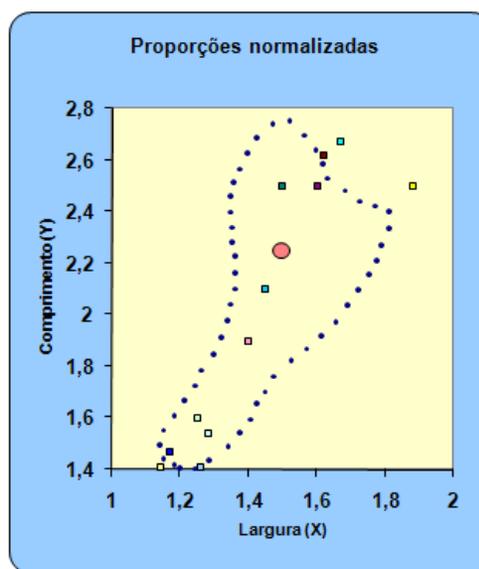


Figura 3.23 – Planilha desenvolvida por Edu Silva para obtenção do resultado de verificação pelo *diagrama de Bolt, Beranek e Newman* a partir das medidas *comprimento, largura e altura* do local.

3.2.13.3 Critério adotado nesta pesquisa para determinação de dimensões ideais para salas

Foram constatadas dimensões de salas apresentando resultados opostos entre o *critério de Bonello* e o *diagrama de Bolt, Beranek e Newman*, como, por exemplo, 15 x 8 x 22m, que no primeiro gera uma curva ascendente progressiva e suave, tendo, portanto um bom resultado, e no segundo, gera um ponto fora do diagrama, sendo um resultado não favorável; ou, de forma inversa, 13 x 8 x 19m, que em Bonello produz uma curva, apesar de progressiva, ligeiramente quebrada, e em Beranek, Bolt e Newman está em uma parte central do diagrama.

¹⁸ SILVA, Edu. **Proporções**, seção Acústica, item Planilhas para cálculos em acústica, Disponível em <http://paginas.terra.com.br/educacao/audiolist/biblioteca.htm>, acesso em 19/01/2008 – 16:30

Por essa razão, implementou-se nesta pesquisa que, a cada vez que seja necessário gerar três dimensões para um local, mesmo como pontos médios, se as imposições inerentes ao projeto permitirem, estas devem dar os melhores resultados possíveis em ambos os critérios de avaliação, como, por exemplo, 14 x 11 x 19m.

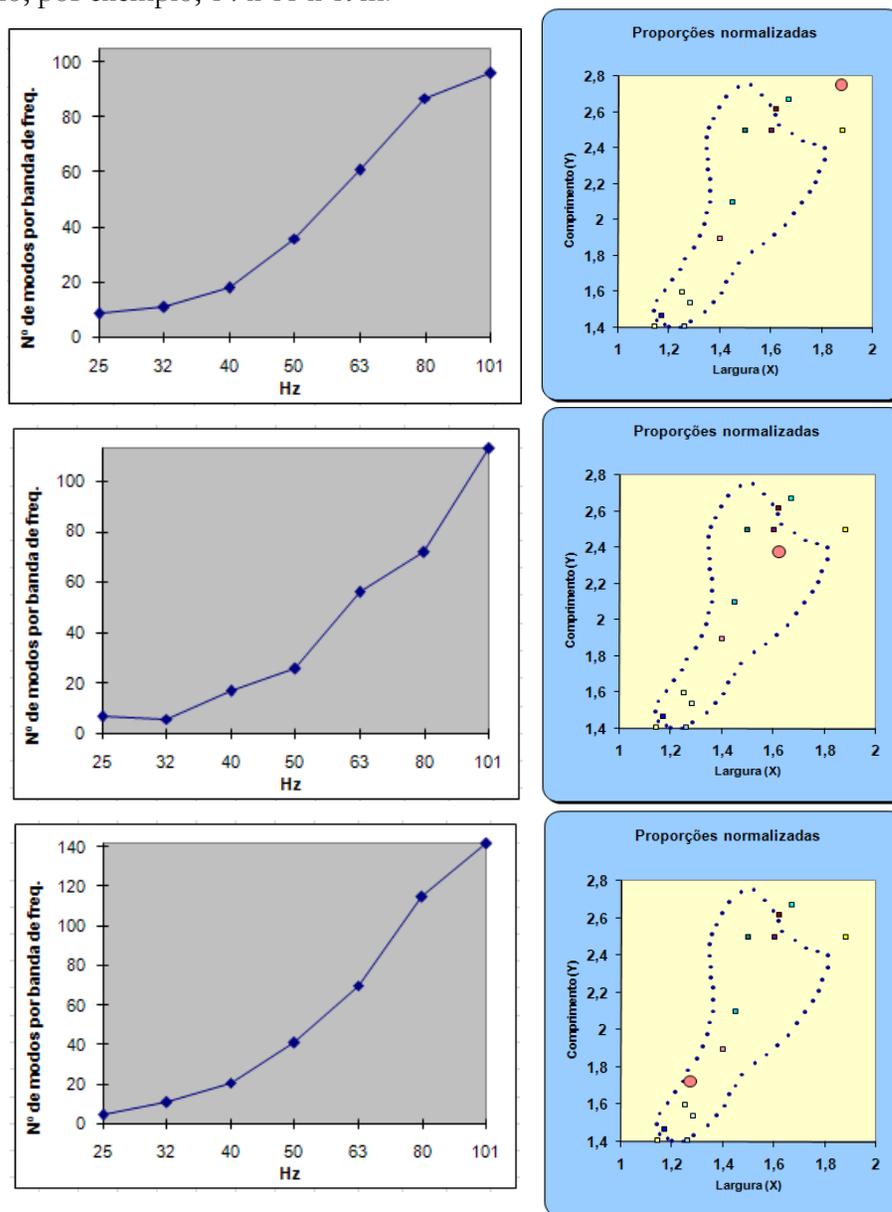


Figura 3.24 – Resultados de avaliação de proporções de salas pelo *critério de Bonello* e pelo *diagrama de Bolt, Beranek e Newman*: 15 x 8 x 22m (acima), 13 x 8 x 19m (ao centro), 14 x 11 x 19m (abaixo).

3.2.13.4 Modos normais em salas não simétricas

Nieuwland e Weber (1979) realizaram pesquisas sobre câmaras reverberantes no *Philips Research Laboratories of Eindhoven*, nos Países Baixos e concluíram que em salas não retangulares, a estrutura espacial do nível de pressão sonora dos modos é irregular. A sobreposição dos diferentes modos resultará favoravelmente em uma menor variação de pressão nas salas irregulares (EVEREST, 1988b, p. 52). A quantidade de modos acumulados por banda de frequência depende do *volume* do recinto e nem tanto da sua forma. Nieuwland e Weber demonstram que uma sala não retangular produz uma distribuição mais regular de frequências modais do que uma sala retangular com proporções otimizadas. Numa sala irregular não há *modos axiais*, nem *modos tangenciais*, sendo todos *oblíquos*, pois todas as estacionárias se constituem com reflexões envolvendo as três dimensões.

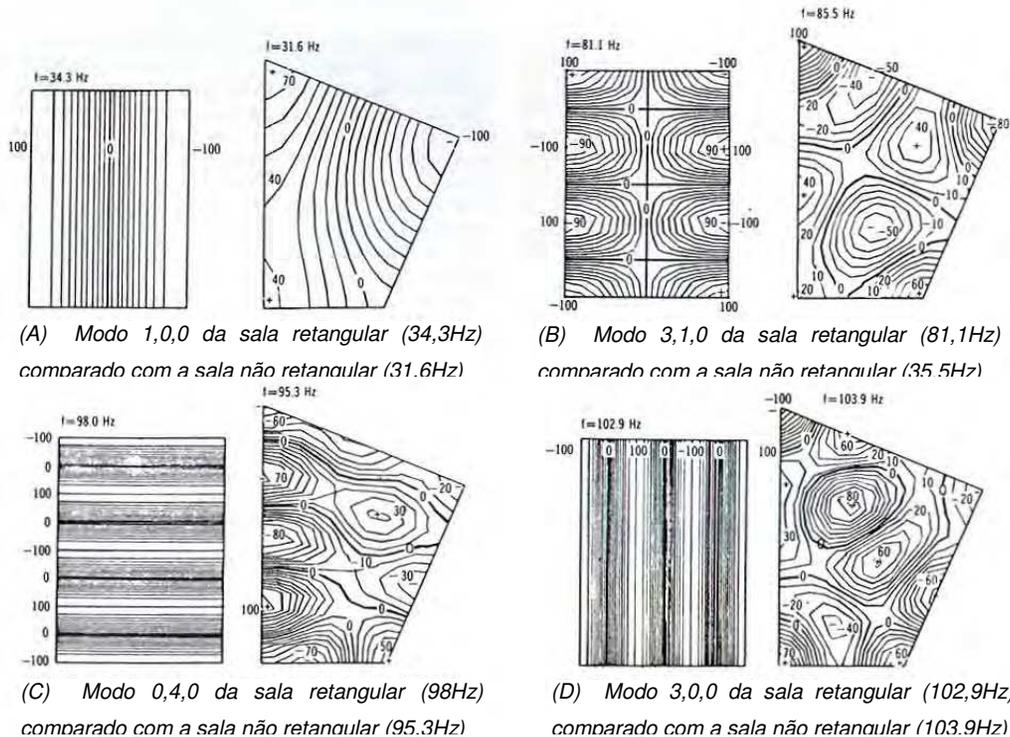


Figura 3.25 – Comparação dos campos sonoros resultantes de cálculos bidimensionais com elementos finitos de uma sala retangular e de outra irregular com a mesma área. Fonte: Nieuwland e Weber (1979)

A *Figura 3.25* compara o comportamento de duas salas, uma retangular e outra irregular, ambas com a mesma área 377ft^2 (35m^2). As linhas indicam zonas de pressão sonora constante. As linhas ligeiramente mais grossas indicam linhas nodais de pressão nula das ondas

estacionárias. Pode-se observar nessa ilustração como a inclinação das partições, evitando paralelismos, influencia a estrutura do campo sonoro de uma sala.

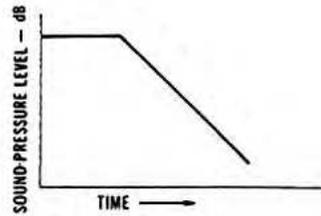
3.2.14 Difusão sonora e superfícies irregulares

Segundo Beranek (1996, p. 451-459) a qualidade acústica de uma sala de concerto é melhor quando as *primeiras reflexões* são suaves e o som reverberante provém uniformemente de todas as direções. Muitas são as salas de concerto que possuem cavidades, vigas, superfícies curvas no teto, bem como colunas, nichos, entradas irregulares, relevos e estátuas laterais. Essas irregularidades contribuem tanto para suavizar as *primeiras reflexões* quanto para uniformizar a distribuição do som reverberante. Difusores tem sido empregados em projetos acústicos para melhorar a qualidade sonora de diversos tipos de salas. São muito usuais os Difusores de Schroeder comercializados pela empresa *RPG Diffusor Systems*, que serão detalhadamente descritos mais à frente. Um outro exemplo destacado por Beranek (1996, p. 455) é o das paredes laterais com textura ‘enrugada’ no *Hamarikyu Asabi Hall* em Tóquio atuando entre 1K e 4KHz. O período longitudinal das irregularidades é de aproximadamente 7 a 8 cm, e a profundidade irregular varia até aproximadamente 3 cm.

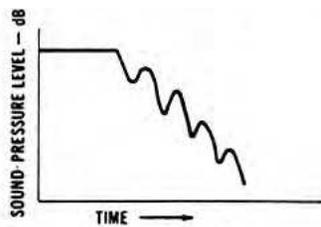
Everest (1988b, p. 58) afirma que um campo sonoro difuso num estúdio ou numa sala de audição implica numa distribuição estatisticamente aleatória na qual (1) a energia sonora é uniformemente distribuída e (2) a direção de propagação é totalmente aleatória. Uma onda estacionária numa sala preenche a primeira condição mas não a segunda, pois as velocidades das partículas estão todas numa mesma direção. Assim, tornar o campo sonoro de uma sala difuso, implica necessariamente em minimizar a ocorrência de ondas estacionárias, qualquer que seja o meio empregado para isso. Engenheiros de som testemunham que dois estúdios com os mesmos tempos de reverberação, podem soar diferentemente. Isso diz respeito à difusão do som em cada estúdio o que influencia a as primeiras reflexões e a dinâmica do caimento (*decay*) do som (extinção da reverberação).

Quando uma sala possui dois *modos normais* que estejam ao mesmo tempo próximos entre si e distantes dos demais, o que significa uma irregularidade na seqüência crescente do número de modos acumulados em cada banda, na análise pelo *critério de Bonello* isso aparece como uma proeminência numa determinada banda. Nesse caso o caimento do som reverberante fica

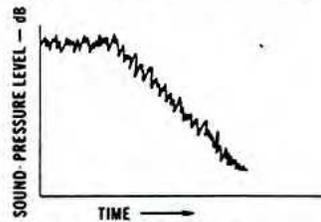
sujeito à ação de ambos os modos que acabam interferindo entre si e gerando um caimento ondulado, como se pode observar na *Figura 3.26 (B)*. No entanto se o número de modos acumulados for maior o efeito de ondulação pode se suavizar, como no caso de *(C)*.



(A) Caimento obtido após excitação com sinal senoidal de uma sala numa banda de frequência contendo Modo de Vibração isolado.



(B) Caimento obtido após excitação com sinal senoidal de uma sala numa banda de frequência grave contendo dois modos normais próximos.



(C) Caimento obtido após excitação com ruído de uma sala contendo vários modos normais próximos.

Figura 3.26 – Caimento da reverberação em sala tendo (A) Modos isolados nas bandas de frequência; (B) *modos normais* com frequências próximas na região grave; (C) Vários modos atuando numa mesma banda de frequência.

Fonte: Everest (1988b, p. 54).

3.2.15 Efeitos produzidos por obstáculos interpostos no percurso de ondas sonoras planas

Segundo Crocker (1998, p. 13), considerando uma onda plana e homogênea, uma sombra acústica se formará em seu trajeto se esta se deparar com um obstáculo tendo dimensões bem maiores que seu comprimento de onda ($l/\lambda \gg 1$). Caso as dimensões sejam bem menores que o comprimento de onda ($l/\lambda \ll 1$), a onda plana passa pelo obstáculo como se ignorasse

sua presença, reagindo de forma idêntica à que se comportaria se nada estivesse em seu caminho. Nos casos intermediários ($l/\lambda \sim 1$) uma variedade de interferências e efeitos de difração é produzida pela ação do obstáculo.

Supondo que um quarto de comprimento de onda ($l=\lambda/4$) seja o comprimento de onda máximo ao qual um obstáculo possa se opor antes de ser ignorado pela onda incidente, e que o dobro do comprimento de onda ($l=2\lambda$) seja a dimensão a partir da qual a barreira produza de fato uma efetiva sombra acústica, pode-se inferir, então, uma relação entre comprimentos de onda e dimensões de obstáculos.

Dimensão do obstáculo	Sem efeito para		Difração		Reflexão para	
	$\lambda > 4l$	$f < c/4l$	Freq. Min.	Freq. Max.	$f > c/2l$	$\lambda < 2l$
l	λ Maior que	Freq. Abaixo de	Entre		Freq. Acima de	λ Menor que
		nulo \leq Hz \Rightarrow difração		difração \leq Hz \Rightarrow reflexão		
5 cm	20 cm	1.716		3.432		10 cm
10 cm	40 cm	858		1.716		20 cm
15 cm	60 cm	572		1.144		30 cm
20 cm	80 cm	429		858		40 cm
25 cm	1,0 m	343		686		50 cm
30 cm	1,2 m	286		572		60 cm
40 cm	1,6 m	214		429		80 cm
50 cm	2,0 m	172		343		1,0 m
60 cm	2,4 m	143		286		1,2 m
70 cm	2,8 m	123		245		1,4 m
80 cm	3,2 m	107		214		1,6 m
90 cm	3,6 m	95		191		1,8 m
1,0 m	4,0 m	86		172		2,0 m
1,5 m	6,0 m	57		114		3,0 m
2,0 m	8,0 m	43		86		4,0 m
2,5 m	10,0 m	34		69		5,0 m
3,0 m	12,0 m	29		57		6,0 m
3,5 m	14,0 m	25		49		7,0 m
4,0 m	16,0 m	21		43		8,0 m

Tabela 3-3 - Correlação entre dimensões de obstáculos e os decorrentes efeitos sobre ondas planas incidentes em função de seu comprimento de onda λ .

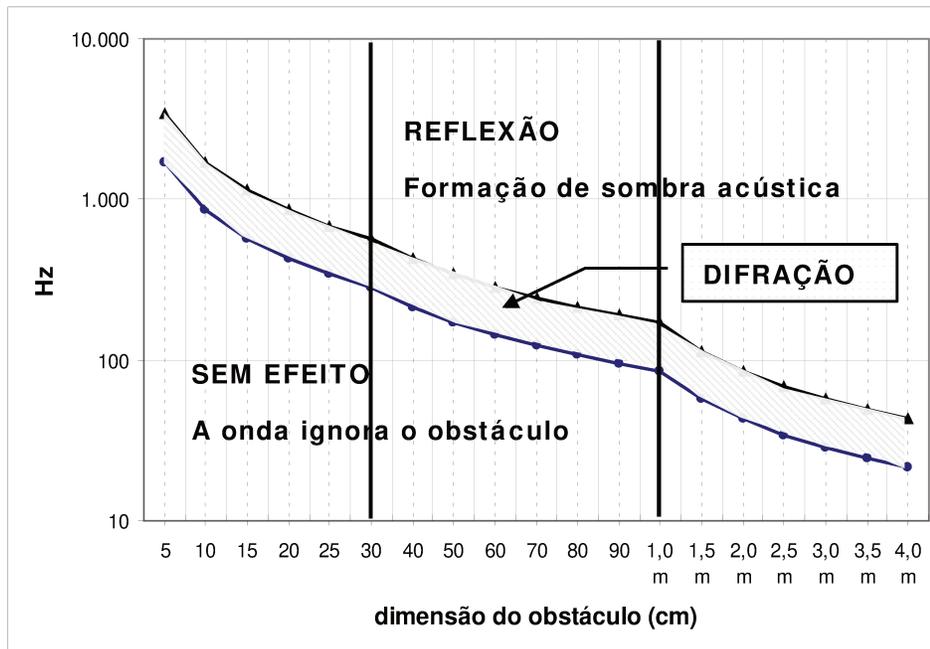


Figura 3.27 – Zonas de *reflexão*, *difração* ou sem efeito em decorrência de obstáculo colocado no trajeto de uma onda plana – relação entre a dimensão do obstáculo e o comprimento de onda λ .
N.B.: As linhas mais escuras marcam as mudanças do passo de avanço no eixo x .

3.3 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE UMA SALA

A partir de critérios estabelecidos de avaliação acústica de uma sala poderemos analisar dados de um auditório, medições efetuadas e concluir se há necessidades de adequações e quais seriam elas. Os critérios aqui expostos são essencialmente baseados nas formulações de Beranek (1962, 1996, 2004) que em seus trabalhos sobre acústica de salas para música considerou a avaliação de destacados músicos como, Herbert Von Karajan, Serge Koussevitzky, Leopold Stockowski, Eugene Ormandy, James De Preist, Isaac Stern, E. Power Biggs, Daniel Pinkham, traduzindo-as em termos físicos. Beranek analisou, detalhou e comentou tecnicamente os melhores auditórios para música em todo o mundo, correlacionando parâmetros acústicos a períodos (Barroco, Clássico, Romântico séc. XX), estilos, gêneros musicais e grandes obras do repertório (Bach, Haedel, Correlli, Vivaldi, Haydn, Beethoven, Schubert, Mendelssohn, Brahms, Wagner, Tchaikovsky, Richard Strauss, Ravel, Debussy).

3.3.1 Preenchimento do som (*Fullness of tone*)

Suponha que alguém esteja num local sem nenhum eco ou reverberação: ao ar livre ou em uma sala seca. Se um músico estiver à proximidade e produzir um som qualquer, o ouvinte poderá percebê-lo exatamente como foi gerado. O ataque, a sustentação e a extinção do som, são idênticos ao que o instrumento ou voz produziu. Os sons de instrumentos de sopro cessam quase que simultaneamente à interrupção da excitação, enquanto que os sons dos instrumentos de cordas duram um pouco mais, por causa das vibrações remanescentes nas cordas e na estrutura de madeira.

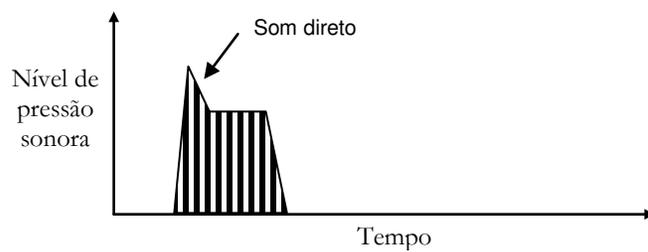


Figura 3.28 - Som direto em campo livre.

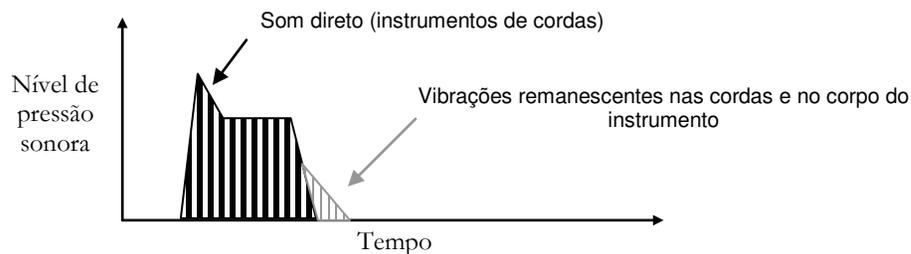


Figura 3.29 - Som direto dos instrumentos de cordas com suas vibrações finais, após o término da excitação.

Entretanto, em uma sala de concerto reverberante, quando um som é projetado, a reverberação da sala faz com que o som se prolongue após o instrumento ter cessado de tocar. Essa reverberação integra-se ao som produzido por cada instrumento ou voz, agregando-lhe a qualidade de possuir *preenchimento do som*.

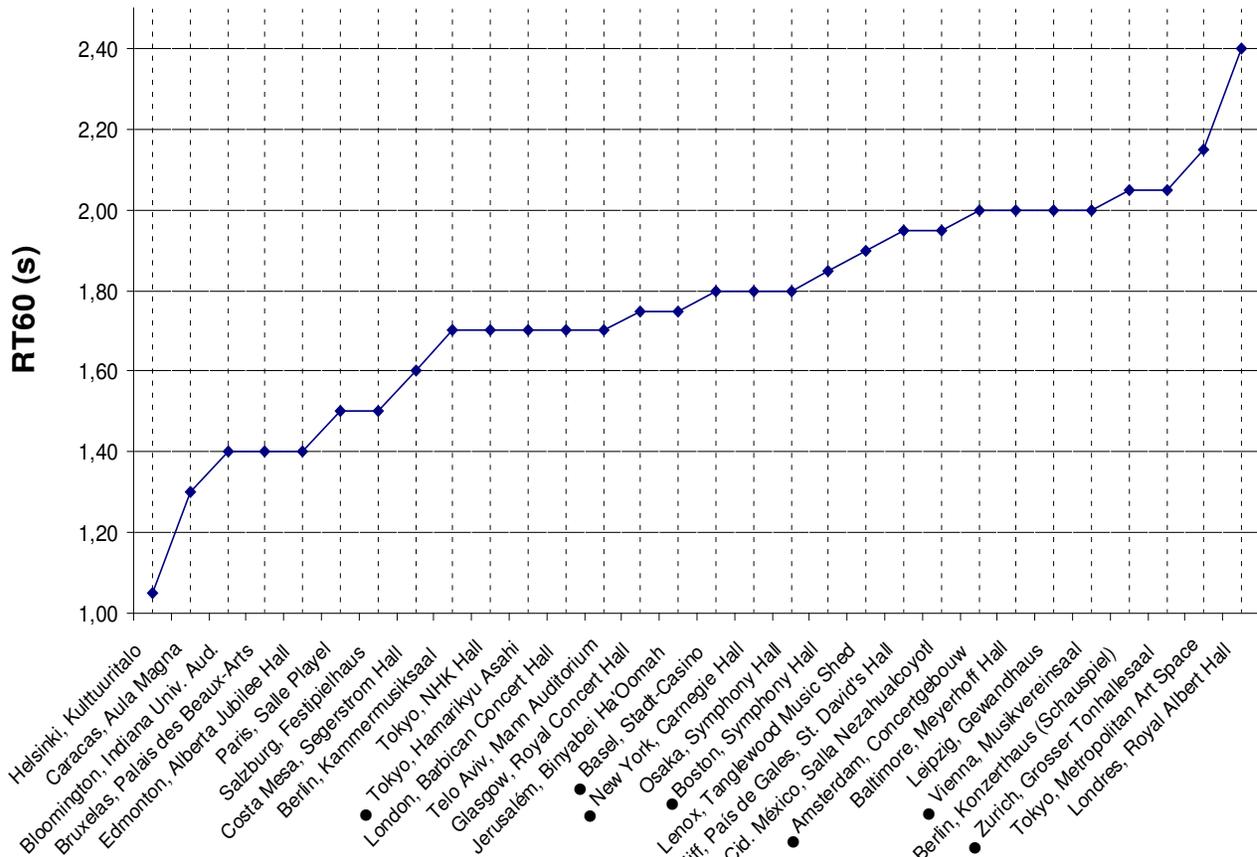


Figura 3.30 – Diferentes tempos de reverberação (RT_{60}) em importantes salas de concerto medidas com público. Aquelas que tiveram melhores resultados em diversos parâmetros de avaliação de Beranek estão evidenciadas. Fonte: Beranek (1996, p. 55-58).

Muitas composições corais antigas, particularmente o cantochão, requerem um *preenchimento do som* (tempo de reverberação) considerável. Quando essas composições são executadas em um ambiente seco, falta-lhes o amálgama sonoro produzido pela reverberação, alterando a homogeneidade dos timbres, a fluidez da dinâmica, ocorrendo uma certa perda do impacto musical.

Em uma sala de concerto razoavelmente reverberante, quando um som é emitido por um instrumento ou voz, a reverberação incorpora uma envoltória, véu, halo que acompanha e completa o som original, podendo prolongá-lo após sua extinção podendo acrescentar até aproximadamente dois segundos à sua duração. Além de incorporar-se ao som original, completando-o, a reverberação arredondando-o, une e suaviza as articulações, ajudando no fraseado musical.

Essa reverberação, muito importante na música, preenche o som (*fullness of tone*) do instrumento, da voz ou do conjunto.

Os fatores acústicos determinantes do *preenchimento do som* são: o tempo de reverberação; o *early decay time (EDT)*, ou seja, como o som evolui no início do decaimento da reverberação; a relação entre som direto e som reverberante; a constante da sala (Cf. Eq. 3-20, p. 83) e a distância entre a fonte e o ouvinte, notadamente a distância crítica (Cf. Eq. 3-23, p. 85; Eq. 3-24, p. 86). Quando há pouco *preenchimento do som*, o fraseado pode ficar menos fluente, senão mais duro. As sujeiras e ruídos do instrumentista ou cantor e de seu instrumento podem se tornar mais expostos. Por outro lado, quando há muito *preenchimento do som*, o resultado é embolado, diminuindo a inteligibilidade, a clareza e a definição do sinal. Para esconder os defeitos de uma execução, um pianista inseguro muitas vezes acaba exagerando na dosagem do *pedal de ressonância*, o que de fato esconde a sujeira das articulações imprecisas, embolando o resultado sonoro. Observe-se que enquanto no *preenchimento do som* atuam os dois principais aspectos da reverberação, o *tempo de reverberação* (item 3.2.9.1) e o *EDT* (item 3.2.11), no parâmetro *vivacidade*, atua apenas o RT_{60} a partir das frequências médias.

3.3.2 Definição e clareza: inteligibilidade

Quanto à *inteligibilidade*, Beranek (1962; 1996; 2004, p. 24-26) considera os parâmetros *definição* e *clareza* referentes à possibilidade de distinção entre um som e outro. *Grosso modo*, *definição* e *clareza* são opostas ao *preenchimento do som*.

Para medir esse parâmetro, de forma objetiva, considera-se, independentemente do ouvinte, razões entre partes complementares da energia de um som, ou entre uma parte e sua totalidade.

De forma subjetiva, a *definição* e a *clareza* dependem do conforto de escuta inteligível do ouvinte no que se refere à escrita musical, o gênero, o caráter e o andamento¹⁹ da música em relação ao *preenchimento do som* da sala.

¹⁹ Velocidade com que flui a música. O Andamento pode ser mensurado objetivamente, em pulsações por minuto (bpm), tendo musicalmente a unidade equivalente de Metrônomo Mäzel (MM) (Johann Mäzel (1772–1838) –

A partir de Raichart (1975), Galindo (1999) expressa, objetivamente, *definição* e *clareza* como parâmetros mensuráveis, da seguinte forma:

$$D_{50} = 100\% \left(\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad \text{Eq. 3-33}$$

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) (dB) \quad \text{Eq. 3-34}$$

onde:

p – pressão sonora [Pa] ou [N/m²]

t – tempo [s]

inventor do metrônomo em 1816) ou, subjetivamente, por denominação do caráter ou do espírito de execução, como por exemplo: *allegro*, *andante*, *vivace*, *presto*, termos expressos geralmente em língua italiana.

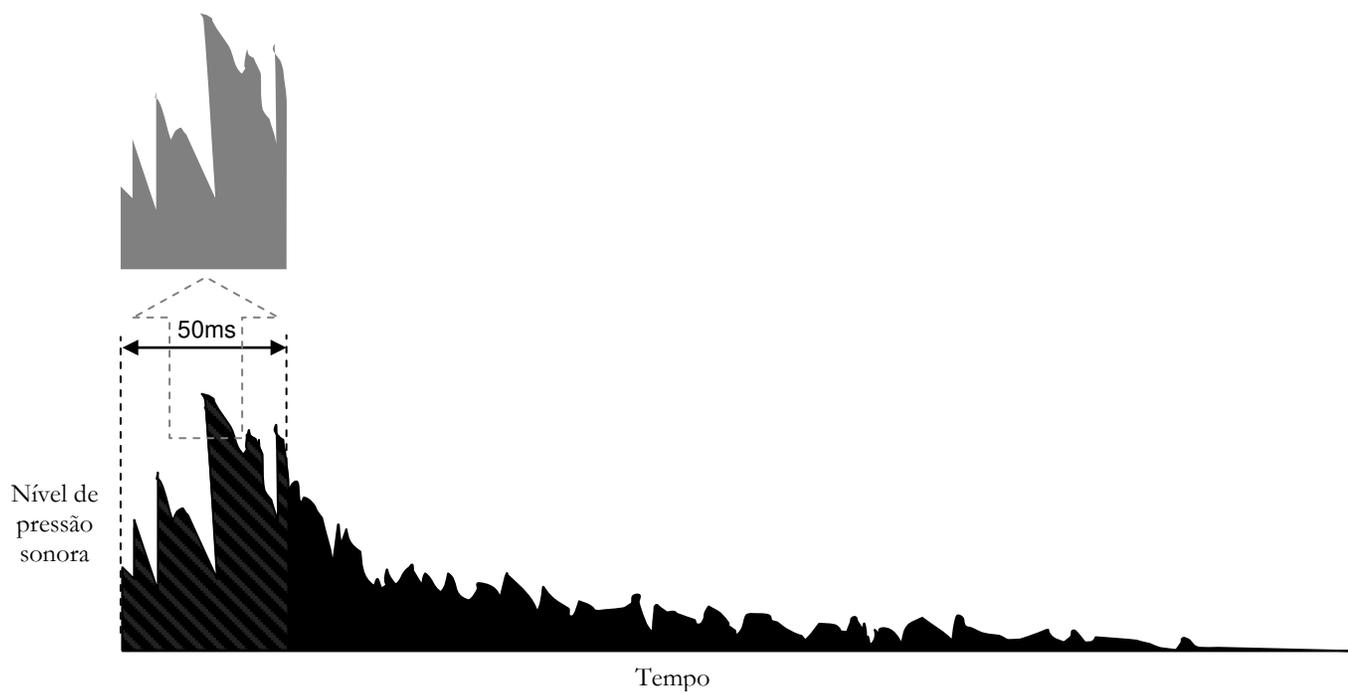


Figura 3.31 – D_{50} – definição como proposto por Galindo (1999): A razão entre a energia nos primeiros 50ms do som e a energia total do som (em %).

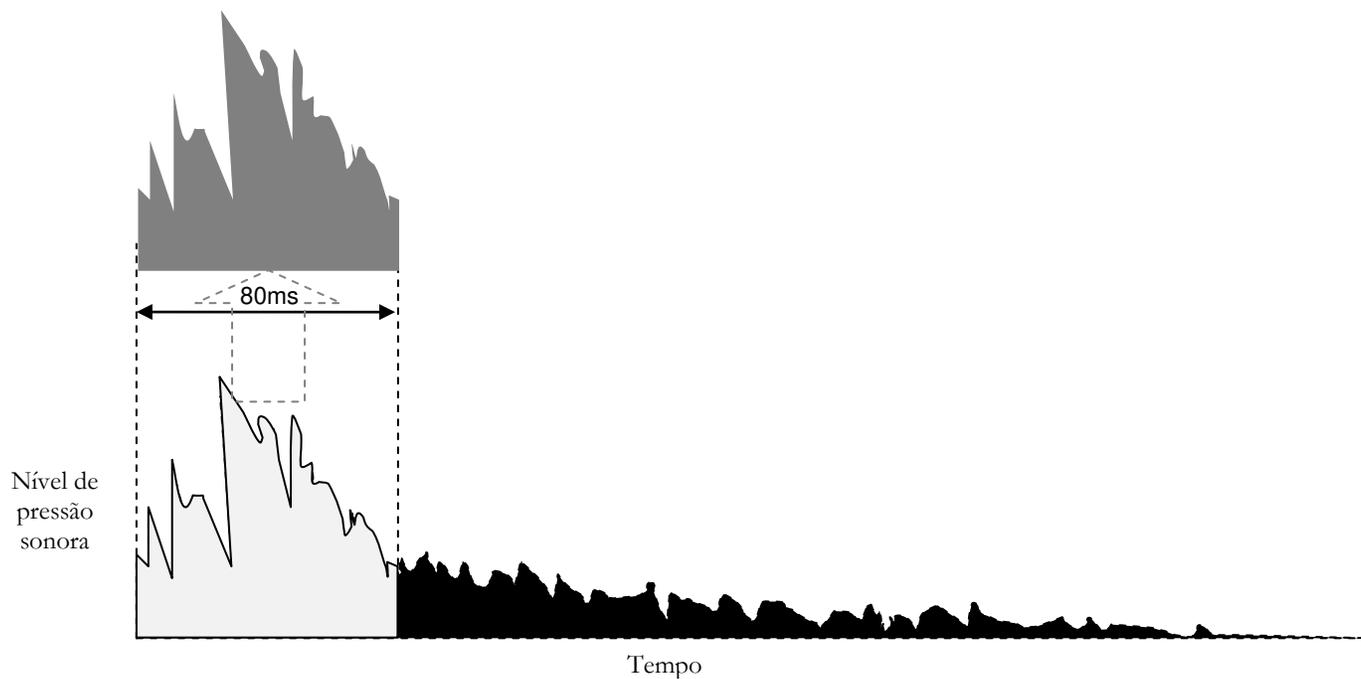


Figura 3.32 – C_{80} – clareza como proposto por Galindo (1999): A razão logarítmica entre a energia nos primeiros 80ms e a energia de 80ms até a extinção do som (em dB).

Segundo Beranek (1996, p. 574; 2004, p. 525-527) a *clareza*, expressa em decibels, é a razão entre a energia inicial (0 a 80ms) e a energia final (reverberante) (80 a 3000ms) do som.

Olhando as figuras acima infere-se que numa sala seca a *clareza* e a *definição* serão maiores do que em uma sala reverberante, pois nesta ultima o tempo de reverberação produzirá um caimento mais lento e, portanto, mais energia se concentrará na parte final de cada som, diminuindo a razão entre as energias em ambas as fórmulas.

Habitualmente as medições de *definição* D_{50} têm se aplicado mais nos casos envolvendo fala, enquanto que as de *clareza* C_{80} , quando há execução musical.

Como proposto por Galindo, *definição* e *clareza* são facilmente mensuráveis na maioria dos sistemas e instrumentos de medição de áudio. No entanto a concepção de Beranek é complementar, mais ampla e atende às necessidades da abordagem de *inteligibilidade* suscitada por este trabalho.

Para um músico, quando este fala de *inteligibilidade*, está se referindo ao grau de isolamento com que pode perceber um som e outro, ou seja, até que ponto os sons podem ser discernidos uns dos outros.

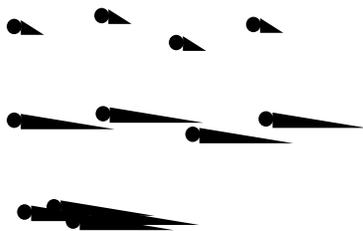


Figura 3.33 – Inteligibilidade: grau de isolamento com que se pode perceber os sons discernindo uns dos outros. Os pontos da ilustração representam eventos sonoros. A prolongação de cada ponto representa a reverberação que o local lhe proporciona. Na linha superior temos um contexto onde há *inteligibilidade* e pouco *preenchimento do som*. Na linha mediana há *inteligibilidade* e bom *preenchimento do som*. Na linha inferior, há o mesmo *preenchimento do som* que na linha mediana, mas não há *inteligibilidade*, pois os eventos sonoros estão muito próximos e se fusionam.

3.3.2.1 Definição horizontal e vertical

Conforme Beranek (1962; 2004; p. 24-27), a *definição* depende de fatores musicais, como a execução do(s) intérprete(s), além de elementos objetivos como a resposta acústica de uma sala. Beranek (1962, 1996) propõe a distinção entre *definição horizontal* e *definição vertical*. Poderíamos eventualmente associar esse parâmetro, de forma mais ampla, a uma *inteligibilidade*

em relação ao tempo (*inteligibilidade horizontal*) bem como em relação à frequência, intensidade e timbre dos sons sobrepostos (*inteligibilidade vertical*).

3.3.2.2 Definição horizontal

Diz respeito ao isolamento entre os sons que se seguem (BERANEK, 2004; p. 24-27). O intérprete pode variar a inteligibilidade horizontal na sua execução, através de variações de andamento, articulações e fraseado. Os fatores acústicos que determinam a inteligibilidade horizontal são os mesmos que atuam no *preenchimento do som*, porém de forma inversamente proporcional. Quanto maior o tempo de reverberação, menor a inteligibilidade horizontal (ou *definição horizontal* como expressa Beranek (1962, 1996) e maior o *preenchimento do som*. Quanto menor a relação entre som direto e som reverberante, menor a *inteligibilidade horizontal* e maior o *preenchimento do som*.

3.3.2.3 Definição vertical

A *definição vertical*, segundo Beranek (1962; 2004), refere-se ao grau com que os sons ocorrendo simultaneamente podem ser percebidos separadamente. Depende da música (da partitura, da escrita do compositor, do estilo, do gênero, dos instrumentos ou vozes), da interpretação, da resposta acústica da sala, da acuidade do ouvinte, do balanço entre os instrumentos, da mistura sonora entre instrumentos e/ou vozes no palco, da resposta da sala para frequências médias e agudas e da relação entre som direto e o som reverberante, portanto, da distância entre o ouvinte e a fonte sonora.

3.3.2.4 Definição e clareza na execução musical

Beranek (1962, 1996, 2004) define os critérios de avaliação de uma sala de concerto considerando não somente parâmetros inerentes à sala, mas igualmente a execução musical. Desta forma, Beranek considera o que o ouvinte está percebendo e não somente uma grandeza física conseqüente das características físicas da sala e da precisão de aparelhos de medição.

Nessa concepção de Beranek, *definição* e *clareza* levam em conta o andamento, bem como diversos fatores de execução, o que faz com que a *definição* possa ser modulada ou

adequada durante uma execução musical, conforme a interpretação da obra. A *definição* está intimamente relacionada com o *preenchimento do som* da sala, sendo que a *clareza*, num sentido mais amplo, envolveria, além da *definição*, o *andamento* da música executada e elementos de contribuição do intérprete (fraseado, variações de timbre e outros). Para entender melhor, pode-se dizer que quando a música acelera, a *clareza* tende a diminuir. Se o tempo de reverberação for proporcionalmente grande e a relação entre som direto e som reverberante pequena, a prolongação (reverberação) de um som pode encobrir um som subsequente, se este tiver dinâmica (intensidade) inferior.

Deve-se procurar o melhor equilíbrio entre *preenchimento do som* (*fullness of tone*) e *inteligibilidade* (*definição* e *clareza*), sabendo que esses parâmetros evoluem de maneira oposta, ou seja, quanto maior o *fullness of tone*, menor a *inteligibilidade*, e vice-versa.

3.3.2.4.1 Clareza : $C_{80}(3)$

Contudo, Beranek (1996, p. 478-481; 2004, p. 526-527) considera o valor médio de C_{80} nas bandas de 500, 1000 e 2000Hz, designado por $C_{80}(3)$, para poder comparar resultados de forma mais sensível e evidente. Comenta ainda que, um regente, durante o ensaio prefere $C_{80}(3)$ entre +1 e +5 dB com a sala vazia. Porém, a mesma pessoa, quando se encontra na platéia, prefere $C_{80}(3)$ entre -1 e -4 dB. Sem dúvida, a sala mais seca ($C_{80}(3)$ entre +1 e +5 dB) é preferível para uma escuta técnica eficiente, podendo assim perceber facilmente detalhes de execução, enquanto que a escuta com mais *preenchimento do som* proporciona a formação de amalgamas sonoros, mais homogêneos e agradáveis à escuta, sendo, portanto, um modo de escuta de ordem mais estética. Provavelmente por isso as salas julgadas por entrevistados como as melhores (BERANEK, 2004, p. 527) tem $C_{80}(3)$ entre -1 e -5 dB. *Grosso modo*, os valores de $C_{80}(3)$ oscilam entre ± 4 dB. A análise de dados colhidos por Beranek (1996, p. 479-481) sobre aproximadamente 60 das principais salas de concerto em todo o mundo, mostra que a média de $C_{80}(3)$ é de -0,7 dB e o *tempo de reverberação* nas frequências médio-agudas, 1,7s.

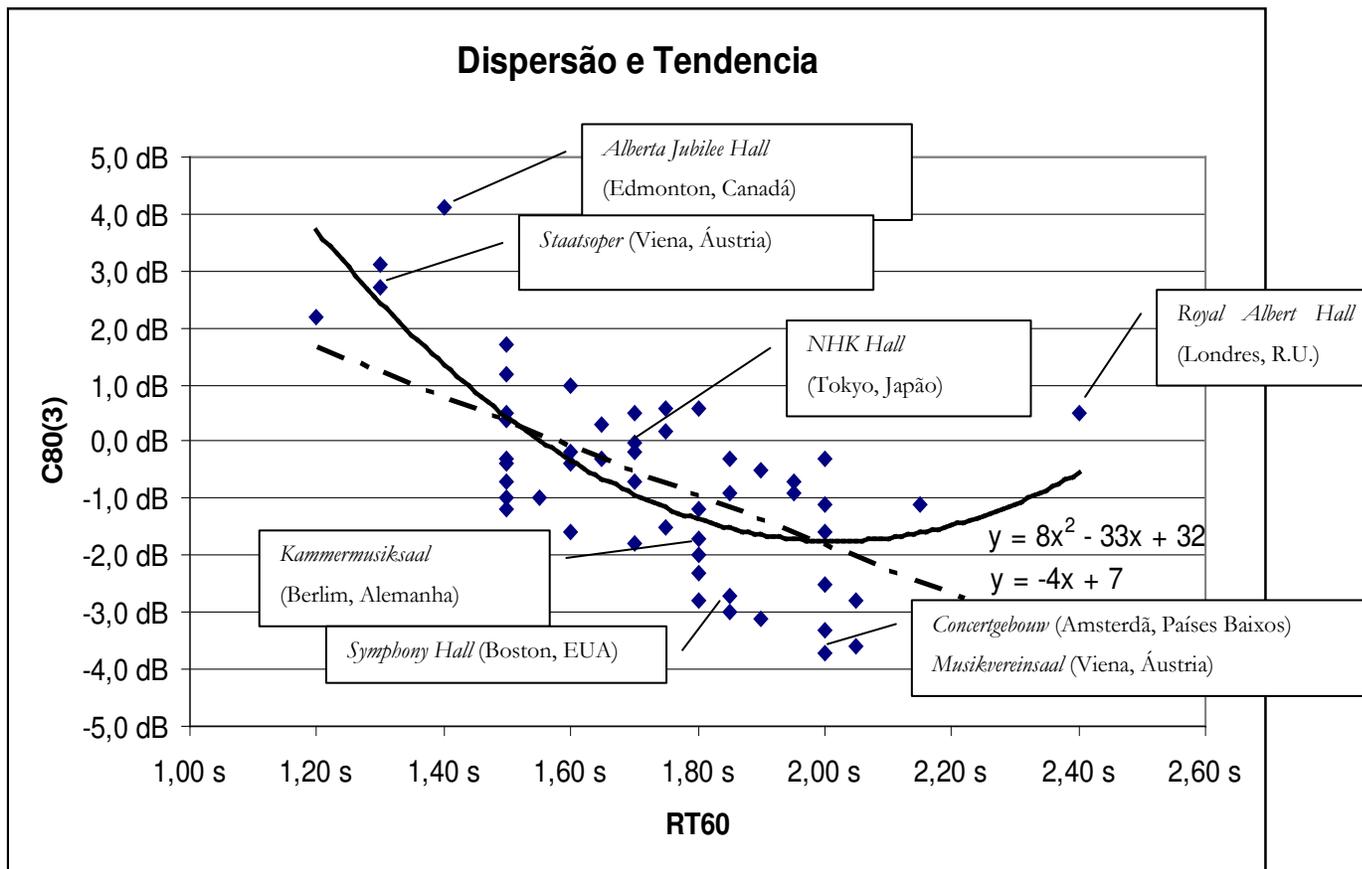


Figura 3.34 – Linha de tendência correlacionando $C_{80}(3)$ a RT_{60} (tempo de reverberação em 500Hz com a sala ocupada) a partir dos dados de importantes salas de concerto no mundo.

Para observar essa correlação, Beranek (1996, p. 482) propõe uma curva de tendência linear, em pontilhado na *Figura 3.34*, resultando aproximadamente em $y = -4x + 7$.

Calcula-se dessa forma a *clareza* esperada de uma sala de concerto em função do tempo de reverberação das frequências médio-agudas (x) em segundos. Observa-se que não há indicação na *Figura 3.34* de nenhuma referência de sala com tempo de reverberação inferior a 1,5s tendo *clareza* inferior a 0dB e, ou seja, nas salas com curto tempo de reverberação a energia média do campo difuso (em relação aos 80ms iniciais do som) se mostra proporcionalmente inferior à de salas com tempo de reverberação a partir de 1,5s.

Em levantamento de salas de música de câmara, portanto salas menores, Beranek (2004, p. 551) obtém os dados mostrados na *Figura 3.35*, abaixo.

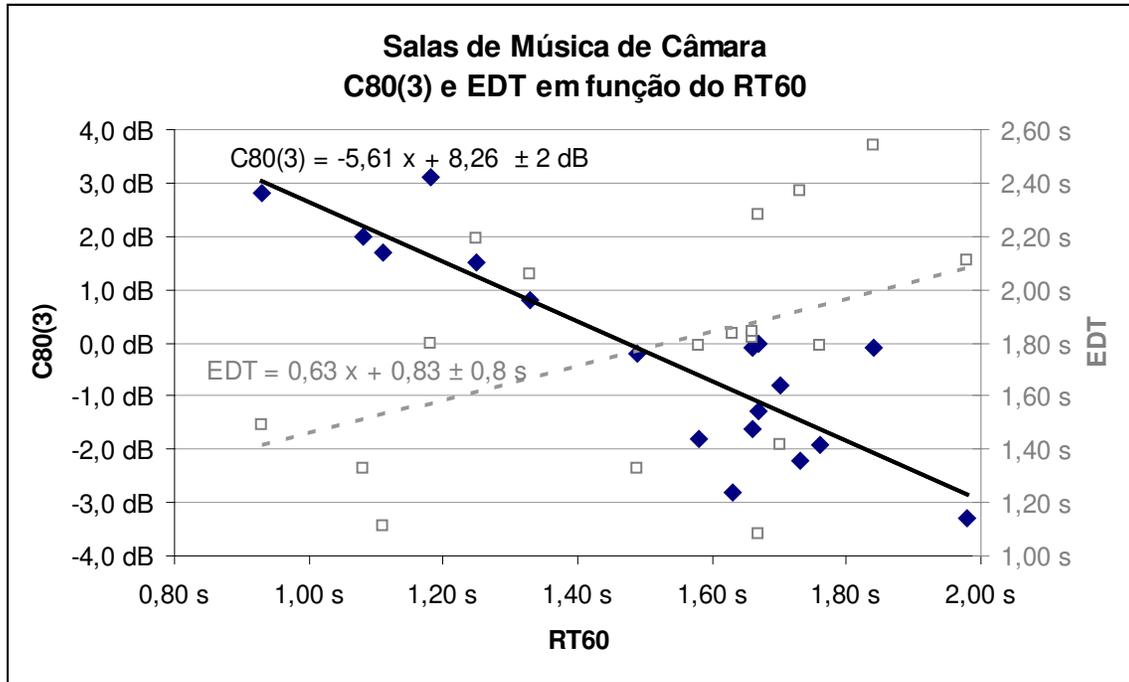


Figura 3.35 – Linhas de tendência correlacionando $C_{80}(3)$ (linha escura) e EDT (linha cinza pontilhada) ao RT_{60} (tempo de reverberação em 500Hz com a sala ocupada) em salas de música de câmara. Fonte: Beranek (2004, p. 551)

Assim como na *Figura 3.34*, na *Figura 3.35* não se encontra referência de sala com *clareza* inferior a 0dB tendo tempo de reverberação inferior a 1,5s, com exceção da Mozartsaal em Viena com -0,2dB, quase na intersecção das linhas contínua e pontilhada da *Figura 3.35*.

Em 2004 Beranek acrescentou dados de EDT (T_{10} nas frequências médias com a sala vazia) juntamente ao RT_{60} (T_{60} nas frequências médias com a sala ocupada) e ao $C_{80}(3)$, sendo possível constatar uma tendência à diminuição do EDT juntamente com o RT_{60} , porém com um inverso aumento simultâneo do EDT em relação ao RT_{60} , indicado na *Figura 3.37* na forma de razão de tempos $R_{T_{10}/T_{60}}$ em porcentagem, conforme a equação abaixo, exprimindo o quanto o EDT excede em relação ao RT_{60} .

$$R_{T_{10}/T_{60}} = \left(\frac{T_{10}}{T_{60}} - 1 \right) 100\% \quad \text{Eq. 3-35}$$

O EDT oscila irregularmente em queda em relação ao RT_{60} na *Figura 3.35*. Já na *Figura 3.37* a curva de tendência mostra o crescimento do EDT em relação ao *tempo de reverberação* (T_{60}) na medida em que este diminui. Nas salas analisadas por Beranek, muito conceituadas e de boa qualidade (Amsterdã, Berlim, Praga, Salzburg, Tóquio, Viena, Zurique), as variações do EDT em relação ao RT_{60} , chegam a atingir 80% com um desvio de + 40% sobre a linha de tendência, no caso da *Kleinersaal in Concertgebouw* em Amsterdã. No caso do *Hamarikyu Asabi Hall*, em Tóquio, o desvio é de - 48%.

Como indicador comparativo entre as taxas de caimento do EDT e do T_{60} temos o parâmetro $(EDT/RT_{60})-1$: Se for positivo o EDT permanece e cai menos que o RT_{60} ; se for nulo o caimento de ambos é igual; se for negativo o EDT cai mais rapidamente que o RT_{60} .

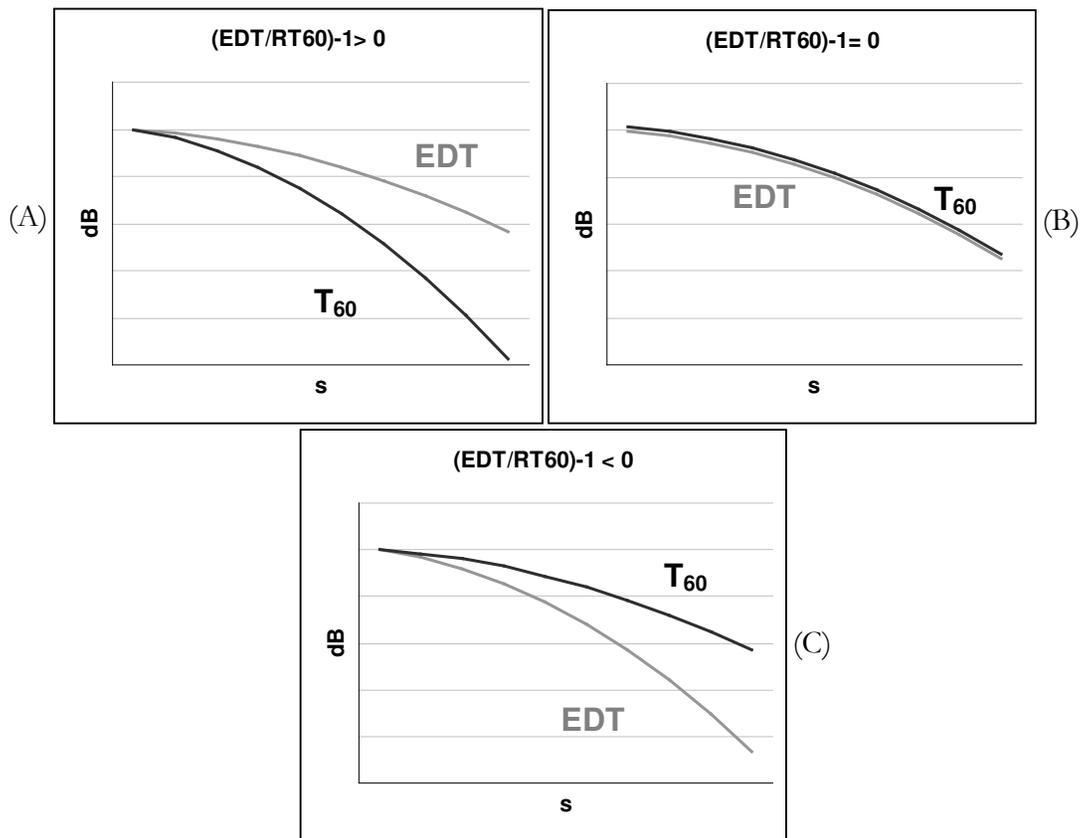


Figura 3.36 – Nível de pressão sonora x tempo para indicação de leitura do parâmetro $(EDT/RT_{60})-1$.

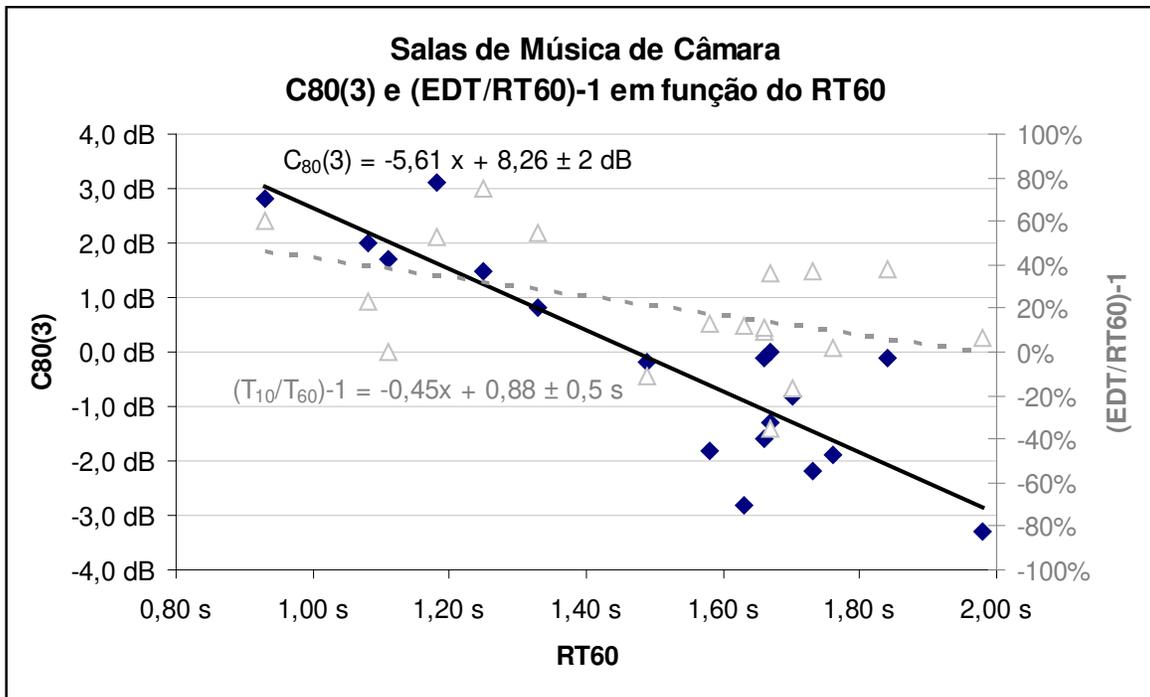


Figura 3.37 – Linhas de tendência correlacionando $C_{80}(3)$ (linha escura) e $(EDT/RT_{60})-1$ (linha cinza pontilhada) ao RT_{60} (tempo de reverberação em 500Hz com a sala ocupada) em salas de música de câmara. Fonte: Beranek (2004, p. 551)

3.3.3 Intimidade (Intimacy), Presença e Initial-time-delay gap (ITD)

Segundo Beranek (1962; 1996; 2004), a *intimidade* é um dos parâmetros subjetivos que mais aparece associado às salas de concerto com bom grau de aceitabilidade. Embora tenha significado específico, este parâmetro subjetivo pode não representar exatamente a mesma coisa para diferentes ouvintes. Um dos sentidos do termo é a sensação que permitiria a um ouvinte, de olhos fechados, perceber as dimensões do local onde se encontra, pela avaliação do som que está recebendo. Outro seria o de engenheiros de som e *Tonmeister* que se referem à *presença* como a sensação de estarem próximos ou diretamente relacionados à fonte sonora percebida.

A *intimidade* está diretamente relacionada ao parâmetro objetivo referente ao intervalo de tempo que separa o som direto que chega ao ouvinte, do início das *primeiras reflexões* (*early sound* ou *early reflexions*). Esse parâmetro, bem como esse intervalo de tempo, chama-se *initial-time-delay gap* (ITDG ou ITD).

O parâmetro objetivo *ITD* pode proporcionar ao ouvinte uma percepção do tamanho da sala em que se encontra e/ou a sensação de estar intimamente relacionado às fontes sonoras

que está percebendo, o que equivaleria ao termo *presença*. Numa sala pequena na qual o *ITD* chega a aproximadamente 20ms, há sensação de *intimidade*.

Para Beranek (1962; 1966; 2004), sendo este um dos principais parâmetros de avaliação subjetiva de uma sala, um desafio para os atuais projetistas de auditórios seria fazer uma sala de concerto soar como uma pequena sala, ou seja, projetar as superfícies para que, apesar de um grande volume interno, o *ITD* seja reduzido.

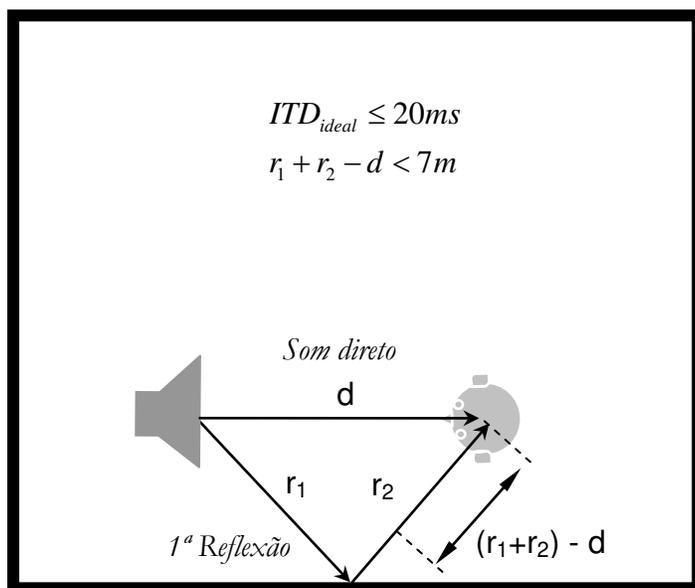


Figura 3.38 – Intimidade. A primeira reflexão chega ao ouvinte logo após o som direto. Quanto menor o intervalo de tempo entre ambos (*IDT*), melhor a *intimidade*. O *IDT* pode ser previsto e controlado pela diferença entre as trajetórias do som direto e da primeira reflexão.

Contudo, é preciso ainda atenção após a *primeira reflexão*. É importante para a qualidade de *intimidade* que o nível do *som direto* (palestrante, instrumentos e vozes musicais) não chegue ao ouvinte muito fraco em relação ao nível do *som reverberante*. Caso isso ocorra, o *som reverberante* acumulado pode atrapalhar a inteligibilidade dos novos *sons diretos* que vão chegando e isso o ouvinte toma como uma diminuição da *intimidade*.

A *intimidade* é um parâmetro importante para a avaliação subjetiva de uma sala e deve ser observado atentamente pelos projetistas.

$$\Delta t_{direct\ sound} = \frac{d}{c} \quad \Delta t_{first\ refl\ sound} = \frac{r_1 + r_2}{c}$$

$$ITD = \Delta t_{first\ refl\ sound} - \Delta t_{direct\ sound} = \frac{r_1 + r_2 - d}{c}$$

Eq. 3-36

Beranek (1996, p. 479-480) obteve das medições e análises das salas um *ITD* variando entre 2 e 40ms, sendo a média 25ms.

3.3.4 Vivacidade (*Liveness*) e Viveza

A *vivacidade* é o parâmetro subjetivo que se refere à qualidade de uma sala possuindo reverberação sensível. Enquanto o *preenchimento do som* considera os dois principais aspectos da reverberação, o *tempo de reverberação (RT)* (item 3.2.9.1) e o *early decay time (EDT)* (item 3.2.11), a *vivacidade* relaciona-se apenas ao *tempo de reverberação* nas frequências médias e agudas, acima de 350Hz (BERANEK, 1996, p. 23).

Uma sala com *vivacidade* é considerada uma sala ‘viva’, enquanto que seu oposto, uma sala ‘seca’, se caracteriza por ter pouca reverberação.

Salas revestidas preponderantemente com material absorvente costumam não ter muita *vivacidade*, como por exemplo, salas de cinema, salas de palestra e salas de monitoração de gravação em estúdios.

Grandes salas de concerto, igrejas, galpões, espaços amplos revestidos suficientemente com materiais reflexivos, costumam ser reverberantes e, portanto, ter *vivacidade*.

O excesso de reverberação não implica necessariamente num excesso da qualidade. Ao contrário, a partir de certo ponto, tal característica passa a interferir na *inteligibilidade* (Cf. item 3.3.2) e pode tornar-se um aspecto indesejável em uma sala para algumas aplicações. No caso de uma cisterna vazia, um grande galpão desocupado, uma igreja com grande tempo de reverberação, o *preenchimento do som* pode ser conveniente para música de órgão, canto gregoriano, músicas onde os sons devem se mesclar e se acumular sucessivamente, porém torna-se inadequado à fala (palestras, leituras, declamações, debates) ou músicas tendo ornamentações, gestos ágeis e rápidos, exigindo *inteligibilidade* (*definição* e *clareza*) (Cf. item 3.3.2), pois compromete as condições de percepção dos ouvintes.

Para Beranek (1962, p. 425) a *vivacidade* está objetivamente associada ao tempo de reverberação de uma sala nas bandas de 500 e 1KHz, cuja média é tida como o valor RT_{60} . Já na segunda edição revisada da mesma obra (BERANEK, 2004, p. 29) atribui à *liveness* os tempos de reverberação na faixa de frequências de 350 e 1400Hz, tida como banda de frequências médias (*mid-frequencies*), mas mantém a referência de RT_{60} com a média aritmética dos tempos de reverberação nas bandas de 500 e 1KHz

Prado (1962, p. 62-63) refere-se a Beranek (1954; 1993; p. 311-321) e expressa, através do termo *Viveza*, um parâmetro objetivo referente à *vivacidade*, nos seguintes termos:

$$v = 1 - \bar{\alpha} \quad \text{Eq. 3-37}$$

em %, sendo 50% atribuído a uma sala muito surda, 60% a uma sala surda; 75%, sala média surda; 85%, sala média; 90%, sala média viva; 95% e acima, sala viva.

Baseia-se para isso no fato de que as densidades médias de energia entre o som direto e o som reverberante têm a seguinte relação:

$$\frac{E_{DIR}}{E_{RVB}} = \frac{1 - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \quad \text{Eq. 3-38}$$

Para Beranek (1962, p. 426-427; 2004, p. 29), uma sala é considerada ‘seca’ (*dry*) ou ‘morta’ (*dead*) quando o tempo de reverberação²⁰ é inferior a 1,6 segundos. Acima desse valor, as salas passam a ser consideradas ‘vivas’ (*live*).

²⁰ nas bandas médias de frequências.

Salas secas	RT_{60}
Old Festspielhaus (Salzburg)	ca. 1,0 s
Orchestra Hall (Chicago)	ca. 1,3 s
Kleinhaus Music Hall (Buffalo)	1,32 s
Academy of Music (Philadelphia)	1,4 s
Kresge Auditorium (Cambridge)	1,47 s
Royal Festival Hall (Londres)	1,5 s

Salas vivas	RT_{60}
Grosser Musikvereinsaal (Viena)	2,05 s
Tanglewood Music Shed (Lenox)	2,05 s
Concertgebouw (Amsterdam)	2,0 s
Symphony Hall (Boston)	1,8 s
Teatro Colón (Buenos Aires)	ca. 1,8 s
Steadt-Casino (Basel)	1,7 s
Carnegie Hall (New York)	1,7 s

Tabela 3-4 – Salas secas e salas vivas. Fonte: Beranek (1962, p. 426-427)

3.3.5 Calor (Warmth) e Razão de baixos (Bass ratio)

Calor, calidez, warmth, bass strength, são termos usados para designar o parâmetro subjetivo que indica a sensação de conforto do ouvinte ao sentir a resposta uniforme e reforçada do *tempo de reverberação* nas bandas graves [T_{BAS}] em relação aos médios [T_{MED}]. Numa sala onde os graves ‘saem redondos’ o ouvinte tem a sensação de *calor*, de envolvimento. Este parâmetro subjetivo pode ser visto igualmente como *vivacidade dos graves, reforço de graves*, onde o tempo de reverberação dos graves é ligeiramente superior ao dos médios e agudos. Segundo Beranek (1962, p. 435), o *calor* pode ser avaliado através do parâmetro objetivo *razão de baixos (bass ratio)*, dado por:

$$BR = \frac{T_{BAS}}{T_{MED}} = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad \text{Eq. 3-39}$$

onde

T_f – tempo de reverberação com a sala ocupada na banda de frequência f

Segundo Beranek (1962; 1996) o valor ideal para a *razão de baixos (bass ratio (BR))* situa-se entre 1,10 e 1,25 para ambientes mais reverberantes, e entre 1,10 e 1,45 para ambientes com RT_{60} inferior a 1,8s. Abaixo e acima desses limites a qualidade do parâmetro *calor* diminui. Se a resposta do tempo de reverberação nos graves não for regular, ou seja, possuir depressões amplas e cretas expostas, o resultado sonoro é qualificado como “*boomy*”, sendo de qualidade não

desejada. Se o tempo de reverberação das frequências médias e agudas for superior ao das baixas frequências ($T_{MED} > T_{BAS}$), o resultado sonoro é igualmente não desejado e qualificado como “brittle” (*quebradiço*).

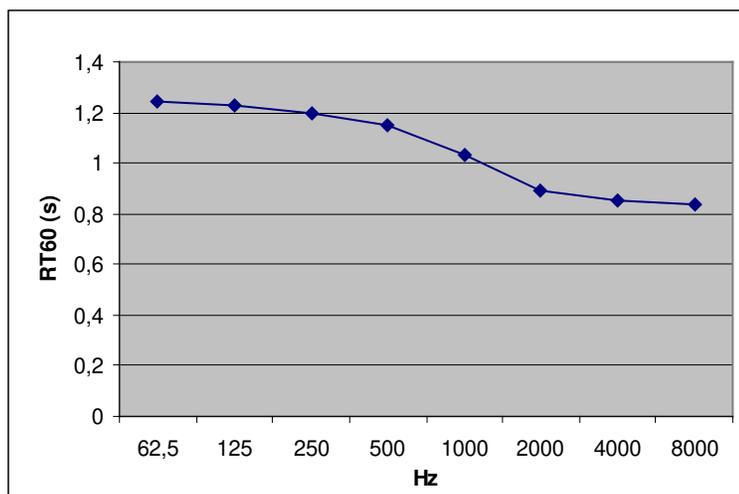


Figura 3.39 – Resposta típica do *tempo de reverberação* em função da frequência quando uma sala reverberante (RT_{60} acima de 1,8s) tem um bom parâmetro *calor*.

Em 2004, Beranek (p. 512-517) considera a *força de baixos (bass strength)* (G_{bass}) dada por G_{125Hz} medido com a sala desocupada, como indicador de resposta em baixas frequências mais correlacionado à qualidade de uma sala.

3.3.6 Correlação cruzada interaural – Interaural cross-correlation family IACF, IACC_A, IACC_E e IACC_L

Trata-se de uma série de parâmetros objetivos referentes à comparação entre os sinais recebidos pelos ouvidos.

Conforme Beranek (1993, p. 462), Schroeder *et al.* (1974) propuseram uma medição binaural para avaliação da qualidade de uma sala de concerto. O procedimento compreendia dois minúsculos microfones instalados nos ouvidos de uma pessoa ou numa cabeça artificial (*dummy head*). As saídas desses microfones eram conectadas a um computador que determinava uma quantidade matemática referente ao *interaural cross-correlation coefficient* (IACC).

Segundo Beranek (op. cit., p. 573; 2004, p. 506-509; appendix 3), a medida binaural da diferença dos sons recebidos pelos dois ouvidos oriundos de uma mesma fonte sonora no palco decorre da *função de correlação cruzada interaural (interaural cross-correlation function)* $IACF_t(\tau)$, dada por:

$$IACF_t(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2 dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2 dt}} \quad \text{Eq. 3-40}$$

Onde L e R designam os sinais recebidos pelos ouvidos esquerdo (*left*) e direito (*right*), respectivamente. O valor máximo da equação acima é a unidade (1), sendo que t_1 corresponde ao instante inicial (0s – zero segundos) no qual o som direto chega ao ouvinte. A integral de t_1 a t_2 corresponde à energia do som direto, das primeiras reflexões bem como da reverberação até o instante t_2 (ms).

Por causa do tempo para o som que passa por um ouvido chegar ao outro ser de aproximadamente 1 (um) milissegundo, é comum acrescentar ao tempo t a variante τ com âmbito de -1 a +1 milissegundo.

Obtém-se dessa forma o *coeficiente de correlação cruzada interaural (interaural cross-correlation coefficient)* ($IACC$):

$$IACC_t = \left| IACF_t(\tau) \right|_{\max} \quad \text{sendo } -1 < \tau < +1 \quad \text{Eq. 3-41}$$

Se os sons recebidos pelos ouvidos forem completamente distintos o valor ($1-IACC$) será 1,0 o que significa que a correlação entre ambos os sons é zero. Por outro lado, se os dois sons estiverem em perfeita correlação, o resultado será 0,0. Em uma sala de concerto o valor obtido está entre esses dois extremos.

Para reforçar a observação das primeiras reflexões laterais em uma sala, as medições do *LACC* foram separadas em diferentes partes.

Considerando períodos de integração distintos, temos $LACC_A$ ($t_1=0$ a $t_2=1000$ ms ou $t_2=2000$ ms)²¹; $LACC_{E(arly)}$ ($t_1=0$ a $t_2=80$ ms); e $LACC_{L(ate)}$ ($t_1=80$ a $t_2=1000$ ms). O *índice de correlação cruzada interaural inicial* – $E(arly)$ – mede a *extensão aparente da fonte* (*apparent source width*) (*ASW*), e o *índice de correlação cruzada interaural tardia*²² – $L(ate)$ – mede o *envolvimento do ouvinte* (*listener envelopment*) (*LEV*). Ambos serão vistos mais adiante.

3.3.7 Espacialidade (Spaciousness): extensão aparente da fonte (apparent source width) (ASW)

Iazzetta *et al.* (2004) definem, a partir de Barron (1971) e Schroeder (1979), *impressão espacial* (*spatial impression*) como o efeito psicoacústico causado pelas reflexões sonoras que atingem o ouvinte fazendo-o criar mentalmente uma sensação acústica espacial do ambiente, sendo influenciada pela difusão sonora e pela dissimilaridade biauricular, ou binaural, como vem sendo empregado neste trabalho.

Conforme Beranek (1996, p. 23), a *espacialidade* é um parâmetro subjetivo que compreende dois aspectos complementares: a *extensão aparente da fonte* que veremos a seguir, e, no próximo item, o *envolvimento do ouvinte*.

A *extensão aparente da fonte* diria respeito à emanção dos sons do palco para o público de tal modo que a percepção auditiva da fonte seja mais extensa (*larga*) do que as dimensões visuais percebidas pelo ouvinte (id., op. cit.). Isso diz respeito à imagem sonora formada no receptor. Conforme Blauert (1997, passim.) a relação entre o sinal que chega a um ouvido e a outro, a imagem pode se modificar. Blauert (op. cit., p. 206-207) mostra como a percepção espacial pode ser afetada pela variação de intensidade e atraso entre os sinais que chegam aos ouvidos esquerdo e direito em função da natureza do material sonoro: sons puros (senoidais), impulsos, fala. Ou seja, para uma mesma dissimetria dos sinais, a imagem varia em função da

²¹ (id., op. cit., p. 463)

²² Denominação empregada por Tenenbaum (2004)

natureza dos sons emitidos: contínuos, articulados ou seguidos de impactos. Portanto, entende-se que esse parâmetro seja influenciado pelo padrão de reflexões que o ouvinte recebe em sua posição na sala, mas também pela natureza das fontes sonoras e a tipo-morfologia dos sons emitidos. Dessa forma, a imagem sonora percebida de um coro imóvel no palco, seqüencialmente batendo palmas, assobiando e executando um cantochão, poderá eventualmente sofrer modificações ao passar de um tipo de som a outro. Essa suposição suscita que seja averiguado até que ponto o parâmetro ASW depende de fato da sala, da posição do ouvinte e natureza do sinal emitido pela fonte.

3.3.7.1 $IACC_E$

Beraneck (op. cit., p. 36) afirma que, no momento da referida publicação, a melhor medição para a ASW nas frequências médias corresponderia ao chamado coeficiente de correlação cruzada interaural (*interaural cross-correlation coefficient*) ($IACC_E$) sendo que o indicador E significa que somente foram consideradas as *primeiras reflexões* para análise. Esse cálculo mede, segundo Beraneck, o grau de dissimilaridade dos sons musicais chegando a cada um dos ouvidos. Quanto menos similares forem os sinais, menor o valor do $IACC_E$ e maior o valor da ASW .

Beraneck (op. cit., p. 464) cita Okano *et al.* (1994) cujos experimentos em laboratório avaliaram a percepção de ouvintes julgando quando as ASW s em diferentes bandas de frequência de oitava os agradavam. Durante os experimentos, perceberam que das seis diferentes bandas empregadas, quatro delas tiveram o mesmo nível de importância: 500, 1K, 2K e 4KHz.

3.3.7.2 $IACC_{E3}$

Como o nível sonoro na banda de 4KHz é relativamente fraco diante das demais bandas, optou-se por conservar as três principais bandas, chegando assim ao $IACC_{E3}$ como sendo a média do $IACC_E$ nas bandas de 500, 1K e 2KHz. Conforme demonstrado por Beraneck (op. cit., p. 464-465), como $IACC_{E3}$ (0 a 80ms) e $IACC_{E3}$ (0 a 1000ms) estão altamente correlacionados, esse parâmetro será considerado nas referidas bandas de frequência e no período de 0 a 80ms. Essa quantidade é a que se relaciona de fato à *extensão aparente da fonte* (ASW).

3.3.7.3 $IACC_{L3}$

O mesmo procedimento levou à adoção do $IACC_{L3}$ que indicará a quantidade referente ao envolvimento do ouvinte (LEV) conforme será visto no item 3.3.8 (*Espacialidade (Spaciousness): envolvimento do ouvinte (listener envelopment) (LEV)*, p. 128).

3.3.7.4 1- $IACC_{E3}$

O indicador empregado por Beranek para avaliação da qualidade em relação à ASW é ($1-IACC_{E3}$). Em suas medições e análises de salas de concerto, Beranek (op. cit. , p. 466) observou que as de qualidade *excelente a superior*, analisadas em todos os parâmetros adotados pelo autor, tem ($1-IACC_{E3}$) médio de 0,66. No grupo de qualidade *boa a excelente*, a média é de 0,56, e no grupo de qualidade *comum a boa*, a média é 0,42. Portanto, para Beranek, o âmbito aceitável para ($1-IACC_{E3}$) está entre 0,41 e 0,71.

3.3.8 *Espacialidade (Spaciousness): envolvimento do ouvinte (listener envelopment) (LEV)*

Em 1962 Beranek tratou do envolvimento do ouvinte como relativo ao parâmetro *difusão (diffusion)*: distribuição espacial do som reverberante, sendo tanto melhor quanto a reverberação chegar ao ouvinte de todas as direções e em proporções iguais.

3.3.8.1 $IACC_L$ e $IACC_{L3}$

No entanto, em 1996, Beranek (p. 23, 37 e 472) trata dessa sensação como uma parte da *espacialidade (spaciousness)* referente ao *envolvimento do ouvinte (listener envelopment) (LEV)*, tendo como parâmetro objetivo o *coeficiente de correlação cruzada interaural (interaural cross-correlation coefficient) $IACC_{L3}$* , sendo o $IACC_L$ ²³ médio das bandas de 500, 1K e 2KHz.

²³ L corresponde a *Later*

Tenenbaum e Vasconcellos (2004, p. 165) definem o *listener envelopment (LEV)* como um atributo de qualidade acústica de uma sala referindo-se ao som reverberante atingindo o ouvinte como se fosse proveniente de todas as direções. Essa qualidade subjetiva tem sido associada à correlação cruzada interaural tardia, na forma ($1-LACC_T$), ou seja, quanto menor for a correlação cruzada interaural tardia, maior será o envolvimento do ouvinte.

Para avaliação do *LEV* Beranek (op. cit., p. 473) considera o valor ($1-LACC_{L3}$) e obtém de suas medições e análises que as salas de concerto na categoria *excelente a superior* têm um ($1-LACC_{L3}$) médio de 0,88. No grupo de qualidade *boa a excelente*, a média é de 0,87 e no grupo de qualidade *comum a boa*, a média é de 0,85. Em algumas salas o valor obtido foi de 0,72. Beranek conclui que não há uma diferença sensível em relação ao nível de classificação das salas de concerto e que será necessário continuar as pesquisas com o $LACC_{F3}$ em salas ocupadas pelo público.

3.3.9 Difusão e superfícies irregulares (Diffusion)

Para Beranek (1996, p. 451-459) as salas de concerto soam melhor para um ouvinte quando as *primeiras reflexões* são suaves e o *som reverberante* vem de muitas direções. Irregularidades e ornamentações contribuem para a difusão do som e tornam a escuta mais suave. O autor aborda a *difusão* de forma mais ampla que em 1962, considerando sua participação distintamente nas *primeiras reflexões* e no *som reverberante*.

3.3.9.1 Difusão: primeiras reflexões

Beranek (op. cit., p. 451) diz que em algumas salas retangulares com paredes laterais lisas o som se torna quebradiço (*brittle*), ou duro (*hard*), ou agressivo (*harsh*), equivalente ao brilho na visão, algumas vezes chamado de *coloração de frequência*. Em experiências pessoais, diria que chega a ser notada certa sonoridade *metálica*. Segundo Beranek isso decorre de reflexões produzidas entre as paredes lisas paralelas. Nas salas modernas com poucas ornamentações essa sonoridade é freqüentemente constatada.

Uma das soluções adotadas, como no Carnegie Hall (New York), Baltimore Meyerhoff Symphony Hall, Davies Hall (San Francisco), é a instalação de difusores de Schroeder

por resíduo quadrático (QRD) (Cf. item 4. , p. 146) que podem contribuir para reduzir reflexões e ondas estacionárias entre paredes paralelas.

Conforme Beranek (op. cit., p. 454) o único inconveniente desses difusores é que absorvem o som nas baixas frequências e, por isso, não podem ser usados em grandes áreas.

3.3.9.2 Difusão: som reverberante

A qualidade do som reverberante depende do grau de difusão permitido às ondas sonoras pelas irregularidades e ornamentações no teto, paredes e pelo espaço adequado na parte superior traseira das salas, permitindo a formação plena do som reverberante.

Salas desocupadas²⁴ onde foram medidos *coeficientes de correlação cruzada interaural* $LACC_{L3}$,²⁵ resultaram em valores de $(1-LACC_{L3})$ entre 0,84 e 0,9 numa escala de zero a 1,0. Beranek afirma que esses resultados obtidos em salas vazias somente permitem distinguir salas pobres em difusão das demais. Medições em salas com público deveriam ser feitas antes de descartar esse parâmetro como indicador de qualidade.

Beranek cita estudos de Haan e Fricke (1993) relatando a qualidade acústica de salas de concerto através da observação visual, a partir de fotografias e desenhos, chegando a graus de irregularidades nas superfícies das paredes laterais e do teto. Chamaram de “grau de difusidade” (*degree of diffusity*) e refinaram o método atribuindo pesos às irregularidades na sala, e ponderações entre áreas com grande *difusidade* e áreas com baixa *difusidade*.

A classificação original era, segundo Beranek, para os tetos, mas foi ampliada para paredes:

Difusidade alta (High diffusity): Teto com alvéolos ou quadriculado com depressões profundas ou grandes vigas aparentes (irregularidades com mais de 10cm de profundidade) ou elementos de difusão distribuídos aleatoriamente por toda a extensão do teto (mais de 5cm de profundidade) e ausência integral de material absorvente.

²⁴ Medidas sem público.

²⁵ Bandas de 500, 1000 e 2000Hz.

Difusidade media (Medium diffusivity): Série angulada de superfícies articuladas de forma quebrada ou com ornamentação decorativa tendo depressões rasas (mais de 5cm de profundidade) ou superfície lisa de concreto por trás de tela acusticamente semi-transparente com materiais reflexivos.

Difusidade baixa (Low diffusivity): Grandes painéis separados, ou superfícies com curvas suaves, ou grade de tela metálica acusticamente semitransparente, ou material de revestimento altamente absoritivo.

Exemplos de salas classificadas nessas categorias:

Difusidade alta: Grosser Musikvereinsaal (Viena), Symphony Hall (Boston), Beethoven Hall (Bonn), Festspielhaus (Salzburg).

Difusidade média: Chicago Orchestra Hall, Tivoli Concertsal (Copenhague), Herkulesalle (Munique), Berlin Philharmonie Hall.

Difusidade baixa: Ford Auditorium (Detroit), Sender Freier Berlin Hall, Briston Colston Hall.

3.3.10 Fator de suporte (Support factor) (ST1)

Conforme Beranek (1996, p. 575) trata-se de um parâmetro objetivo que mede a diferença em decibels entre duas medições de nível de pressão sonora no palco ou no fosso da orquestra. A fonte sonora (caixa acústica) emite um impulso captado por um microfone omnidirecional a 1 m do centro da fonte. A primeira medição é a da energia no intervalo de tempo de 0 a 10ms, e a segunda, no intervalo de 20 a 100ms.

$$ST1 = 10 \log \left[\frac{\int_{20ms}^{100ms} p_8^2(t) dt}{\int_0^{10ms} p^2(t) dt} \right] (dB) \quad \text{Eq. 3-42}$$

Este parâmetro se refere à relação entre a energia que um músico emite e a energia que recebe como retorno. Portanto deve ser medido unicamente no palco ou no fosso. Beranek (2004, p. 538-539) indica valores desejáveis entre -12,0 e -14,4dB. Gade (1989a; 1989b *apud*

Pisani, 2001, p. 706) em uma pesquisa comparativa com três salas sugeriu valores ótimos de *fator de suporte* a partir das medidas do Tivoli Koncertsal de Copenhague:

mínimo -7,5dB; máximo -11dB; médio -9,25dB

Dados obtidos considerando o intervalo por banda de oitava entre 500Hz e 2KHz e, segundo Pisani, resulta bem correlato à preferência geral dos músicos.

3.3.11 Tempo central, Center time (CT), Centre time (t_s), Tempo baricêntrico, Baricentric time (T_s)

Pisani (2001, p. 705) denomina este parâmetro como *istante baricentrico dell'energia* ou *tempo central*. Farina (2001, p. 911) refere-se ao *centre time* (t_c) definido por Kürer (1969) com o termo original *Schwerpunktzeit*. Segundo Engel e Kosala (2005) o *tempo central* foi introduzido por Kürer (1969) e desenvolvido por Cremer, Müller e Schultz (1982).

$$CT = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad (s) \quad \text{Eq. 3-43}$$

O *tempo central* seria, então, o momento de primeira ordem (*first-order momentum*) do quadrado da pressão da resposta impulsiva, expresso em milissegundos.

Posteriormente, Farina (2006, 6ª página) emprega o termo *baricentric time* com abreviatura T_s .

Iazzetta *et al.* (2005) denominam esse parâmetro *center time* (T_c) como sendo o centro gravitacional da resposta impulsiva (IR) em milissegundos. Salientam ainda que para um pequeno valor de T_s a energia está concentrada no início da resposta, o que significa boa *clareza*, e que para valor maior, a energia está distribuída ao longo do tempo, dando a impressão de um espaço mais reverberante. No aplicativo AcMus desenvolvido na USP sob a coordenação de Fernando Iazzetta, este parâmetro é representado pela abreviatura *CT*.

Pisani (op. cit., p. 705) indica valores de referência para *CT* entre 0 e 50 milissegundos para a fala e entre 50 e 250 milissegundos para a música.

3.3.12 Tonal balance (TB) (Balanço tonal)

Capra *et al.* (2006, 7ª p.) empregam o parâmetro *Tonal Balance* como sendo o *balanço entre médios e baixos*, considerando a variação num âmbito entre -0,10 e 0,20.

Segundo Pisani (2001, p. 699-708) *TB* é um parâmetro introduzido por Jordan (1980), calculado da seguinte forma:

$$TB = \frac{EDT_{2K\text{oit}} - EDT_{250\text{oit}}}{3} \quad \text{Eq. 3-44}$$

onde os tempos de reverberação $T_{10} = EDT$ são tomados em bandas de oitava nas frequências de 250 e 2KHz. O valor ideal, segundo Pisani, é próximo a zero $TB \sim 0$.

Porém, observando o parâmetro *razão de baixos* em Beranek (1962, p. 435) e Pisani (op. cit., p. 699), os valores ideais para música se situam, respectivamente em $1,1 \leq BR \leq 1,25$ (Beranek) e $1,2 \leq BR \leq 1,25$ (Pisani). O valor ideal do *Tonal Balance TB*, de acordo com estes valores de *BR* seria $TB = -0,1s$.

Constatando a existência de diferentes recomendações para *fala* e para *música* do tempo de reverberação em função da frequência, como encontrado em AHNERT e SCHMIDT (s.d.) (Cf. *Figura 3.40*) entende-se a ordem dos numeradores da fração ($EDT_{2KH\zeta\text{oitava}} - EDT_{250KH\zeta\text{oitava}}$), bem como os valores esperados, como estabelecidos preferencialmente em referência a um padrão de *fala*.

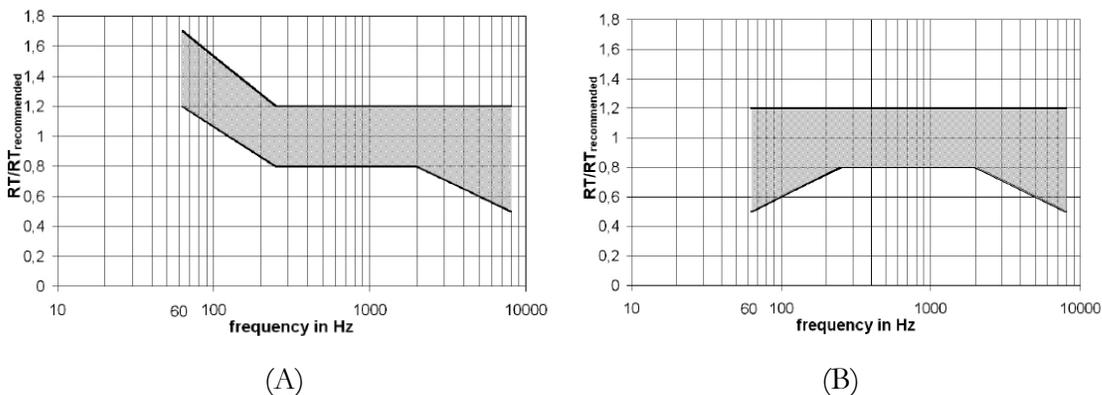


Figura 3.40 – Âmbito de tolerância em função da frequência do *Tempo de Reverberação RT* em relação ao $RT_{\text{recomendado}}$ para música (A) e para a fala (B). Fonte: AHNERT e SCHMIDT (s.d.) (Fig. 1-2, p. 9; Fig. 1-3, p.10) <http://www.renkus-heinz.com/easera/EASERAAppendixUSPV.pdf>

3.3.13 Ausência de eco (*Freedom from echo*)

Com base no exposto no item 3.2.10 *Primeiras reflexões (Early sound ou Early reflections)*, mais especificamente no que diz respeito ao *limiar de mascaramento* (PETZOLD, 1927, p. 8) ao qual Haas (1972, p. 146) se refere, um som que se repete posteriormente a um som idêntico original com um intervalo de tempo menor do que 60ms não é percebido pois a repetição acaba mascarada pelo som original.

Em experimentos com a palavra falada, à razão de 5,3 sílabas por segundo, Haas (1949 *apud* BOLT; DOAK, p. 507, fig. 1)²⁶ obteve os resultados plotados no gráfico da *Figura 3.41*, que apresenta a porcentagem de incômodo em função do nível sonoro e do atraso do *eco*:

Observando como a curva de -3dB da *Figura 3.41*, se inicia com um incômodo de 10% em aproximadamente 50ms, há coerência entre Petzolt (1927) e Haas (1949; 1972).

Como estamos tratando do *eco* numa sala de concerto, dado por reflexão posterior ao som direto, sendo que esta invariavelmente tem menor intensidade do que o som direto, pode-se considerar que o que chamamos de *eco* como fenômeno natural e perceptível, ocorrendo em meio aéreo, seja a repetição de um mesmo sinal a mais de 50 ou 60ms a partir da chegada no ouvinte do som direto.

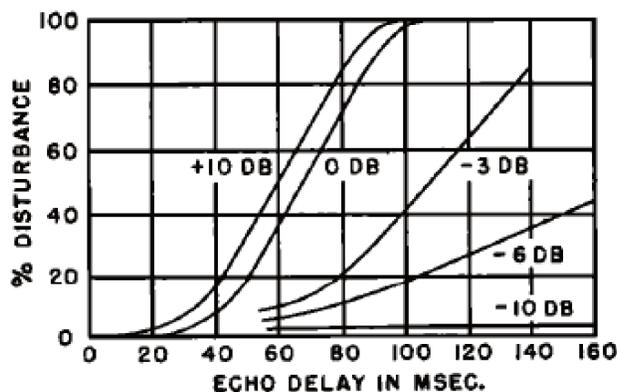


Figura 3.41 – Incômodo (em %) produzido pelo *eco* em função da intensidade e do atraso do som refletido.
Fonte: Haas (1972, p. 156, fig. 12)

²⁶ A mesma ilustração foi usada por Haas em seu artigo de 1972 (HAAS, 1972, p. 156, fig. 12).

A um atraso de 50 ± 10 ms, corresponde um trajeto do som no ar de 17 ± 3 m (HASS, 1972, p. 146). Um percurso de 14m equivale a uma superfície reflexiva situada a 7m atrás do ouvinte, se a fonte sonora estiver alinhada nesse eixo, a uma reflexão produzida por um teto demasiadamente distante da platéia ou a um retorno devido a uma superfície côncava com foco na audiência ou no palco.

Portanto, quando Beranek fala de *ausência de eco*, está se referindo ao cuidado que o projetista precisa ter para controlar as reflexões pelas superfícies que está concebendo.

Além de ser um incômodo evidente para o público, que não pode fruir adequadamente do que se propôs a ouvir, quando o *eco* é sentido no palco, há um desconforto muito grande por parte dos músicos, fazendo com que eles percam a fluidez da execução. Em geral, ao perceber compulsoriamente o *eco*, os intérpretes tem tendência a ‘esperar’ as repetições passarem para agirem, causando diminuição do andamento da música.

Especificamente em relação ao *eco*, Beranek (op. cit., p. 493-495) comenta que as reflexões após 35ms do som direto, para serem benéficas devem chegar ao ouvinte seqüencialmente e perdendo um pouco da intensidade a cada vez. Isso beneficia o *EDT* e o *RT* da sala. Indica ainda que se o som de um bater de palmas fizer um trajeto correspondendo a um atraso de 60ms, este será percebido como um *eco* se estiver em torno de 3dB abaixo do som direto, mas não o será se estiver a mais de 6dB. A 80ms de atraso o som será percebido como um *eco* se a reflexão estiver acima de 11dB abaixo do som direto. A 100ms, acima de 15dB abaixo do som direto, a 200ms, 20dB e a 300ms, 30dB.

3.3.14 Sonoridade (Tonal quality)

Para Beranek (1962, p. 70; 1996, p. 26) a *sonoridade (tonal quality)* refere-se à qualidade do som. Assim como um bom instrumento tem um som agradável, uma sala de concerto pode ressoar de forma fina, harmônica e elegante.

Observa-se que não se trata de um parâmetro mensurável, apenas uma impressão subjetiva.

Em ambas as referências o autor salienta que a *sonoridade* de uma sala pode ser prejudicada por efeitos indesejáveis, como:

- Absorção anormal por superfícies, materiais ou instalações ocasionando perdas em determinadas bandas de frequência;
- Ruídos devido a vibrações entre elementos ou partes de elementos próximos ou em contato nas estruturas da sala;
- Sonoridade áspera resultante de certas excitações sonoras (tipo de distorção);
- Filtragens e interferências devidas a *flutter echo*, *eco*, *modos normais*, *distorção* e *não-uniformidade* (Cf. próximo item);
- Focalização do som em algumas áreas da audiência e não em outras, ocasionando efeito de disparidade entre a localização da fonte pela audição e a localização pela visão;
- Vazamentos sonoros devidos ao mau isolamento da sala com o ambiente exterior (via aérea ou transmissão via estrutural).

A *sonoridade (tonal quality)* relaciona-se igualmente à qualidade de sua resposta aos instrumentos e vozes, sobretudo como nela se desenvolvem os timbres e colorações que produzem.

O timbre é, *grosso modo*, a qualidade do som permitindo distinguir um instrumento de outro, uma voz de outra. Mas também é um fator extremamente importante na expressividade de cada instrumento/voz, no fraseado, nos modos de ataque e nas articulações, nas diferenciações entre as vozes executadas por um mesmo instrumento (por exemplo, numa fuga executada ao piano), na caracterização de diferentes momentos de uma mesma obra, enfim, o *timbre* aparece em um enorme número de situações relacionadas à música bem como ao discurso musical propriamente dito. Além disso, a música durante o séc. XX incorporou definitivamente o timbre na escrita musical como um elemento de linguagem tão importante e determinante quanto a altura, o ritmo, a duração e a intensidade.

O timbre é decorrente do ataque, da sustentação e da forma como desaparecem os sons, da combinação dos parciais (harmônicos ou não) de cada som: da evolução dinâmica de cada um, da relação de cada parcial com a(s) fundamental(ais) e com os demais parciais, tanto em altura como em intensidade.

Portanto, além de envolver o *balanço* e da *mistura*, outros parâmetros poderiam estar igualmente em jogo na avaliação da sonoridade de uma sala, como *calor, espacialidade, textura, intimidade, vivacidade, clareza e preenchimento do som*.

3.4 ASPECTOS INDESEJÁVEIS EM SALAS DE CONCERTO: ECO, RUÍDO, DISTORÇÃO E NÃO-UNIFORMIDADE

Imagine-se numa tarde ensolarada de janeiro, à beira da praia, a brisa muito fraca, numa choperia renomada, lhe servem uma cerveja quente e choca. Ou então, num distinto e refinado restaurante, seu prato chega com uma adição extraordinariamente exagerada de sal²⁷. Ou ainda, a porta bandeira deslumbrante da sua escola torceu o pé na última hora e, para salvar o desfile, no lugar dela veio a Dona Durvalina, que cuida da cantina da quadra, apenas que, como a fantasia da porta bandeira não cabia nela, vestiu seu velho maiô inteiro de praia..

A cerveja quente e choca, o paladar estupidamente salgado e a impertinência da solução dada ao impedimento da porta bandeira, teriam seus equivalentes em acústica como: Ecos, Ruídos, Distorção e Não-Uniformidade das condições de escuta. À parte músicas conceituais, ou que, de forma expressa, valorizem processos de deterioração ou materiais deteriorados, esses fatores, na grande maioria das vezes, prejudicam a qualidade de uma audição e não acrescentam, acusticamente, nenhum valor ao que está sendo transmitido.

3.4.1 Eco

Esse efeito indesejável de repetição do sinal já foi exposto no *item 3.3.13*.

3.4.2 Ruído

Os *ruídos* indesejados numa sala de concerto podem ter diversas origens, dentre as quais:

²⁷ Exemplo de Beranek

- Ventilação e ar condicionado;
- Maquinaria do teatro em operação durante o espetáculo;
- Vibrações de máquinas em funcionamento nos arredores;
- Ruídos hidráulicos;
- Metrô, trens; aviões, tráfego;
- Campainhas, sinais de chamada;
- Comunicações em celulares, telefones, interfones, *walkie-talkies*;
- Comunicações entre pessoas do corpo técnico durante o espetáculo;
- Cadeiras e portas batendo ou rangendo;
- Piso rangendo;
- Ruídos gerados por objetos vibrando por simpatia em determinadas frequências;
- Ruídos gerados por vibrações induzidas, por exemplo, reatores;
- Pessoas circulando pelo auditório;
- Vazamento de sons produzidos em outras dependências, sobretudo cabines técnicas (luz, som e projeção) sem o isolamento adequado: conversas, ensaios, ruídos produzidos pela operação de ferramentas, manipulação de materiais, atividades mecânicas e outros.

3.4.3 Distorção

A *Distorção* numa sala de concerto (BERANEK, 1962, p. 457-460; 1996, p. 497-501; 2004, p. 572) pode ocorrer principalmente de duas maneiras:

- Adicionando à música sons ou partes de sons não executados pelos músicos;
- Suprimindo sons ou partes de sons executados pelos músicos.

3.4.3.1 Absorção sonora seletiva (Selective sound absorption)

Distorções podem ocorrer devido a ressonâncias nas paredes laterais ou no teto, em frequências específicas, removendo energia e partes dos sons próximos a essas frequências.

Beranek (1962, p. 457-460) identificou os seguintes casos:

- Absorção em torno de 250Hz produzida pelas almofadas das poltronas que, quando não perfuradas, criam espaços de ressonância;
- Perda nas baixas frequências devido a superfícies de madeira pouco espessa tendo por trás camada de ar (*Figura 3.45*);
- Frequências agudas dos violinos enfraquecidas por absorção em materiais pouco espessos e delicados com frequência crítica de coincidência próxima a essa região do instrumento.

3.4.3.1.1 *Frequência de ressonância em sistemas de membrana absorvedores de energia sonora*

Conforme Bertoli (2000, Aula 3, p. 5) a frequência de ressonância de uma membrana é dada por:

$$f = \frac{60}{\sqrt{Md}} \quad \text{Eq. 3-45}$$

sendo:

M	densidade superficial do painel (Kg/m^2)
d	distância do espaço de ar atrás do painel (m)
f	frequência de ressonância (Hz)

Para Bertoli as membranas são absorvedores eficientes em baixas frequências e conforme Kuttruff (2000, p.154-158), são empregadas para regular os tempos de reverberação nas baixas frequências. Conforme Paul Sabine e Ramer (1948, p. 267), que estudaram membranas com painéis de compensado, a absorção sonora por parte de placas de compensado nas salas de

concerto deve-se à ressonância mecânica e ocorre geralmente em frequências abaixo de 512Hz, sendo esta uma propriedade referente à mecânica do sistema mais do que ao material especificamente em si.

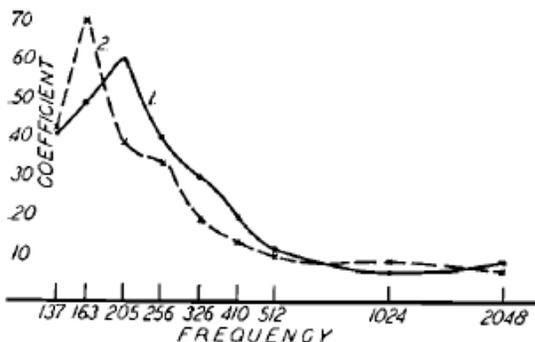
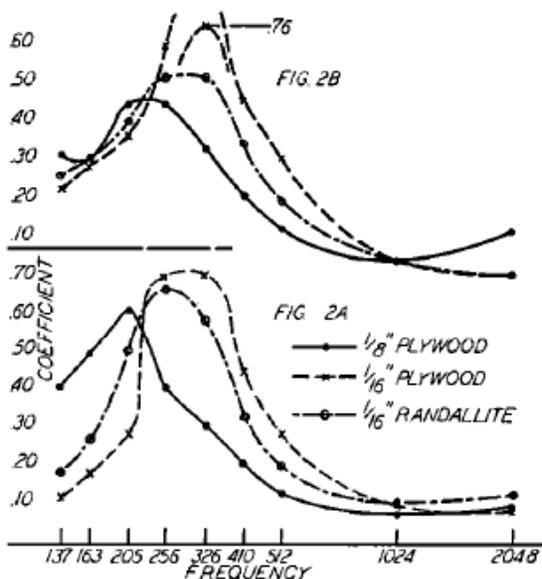


Figura 3.42 – Coeficientes de absorção de painéis de compensado de 1/8 inch (1) firmemente montado nas bordas, e (2) com as bordas sobre material resiliente. Fonte: P. E. Sabine e Ramer (1948, p. 269, fig. 4)

Figura 3.43 – Absorção sonora de painéis de compensado com absorventes por trás. (2A) com absorvente não fixado; (2B) com absorvente fixado ao compensado. Fonte: P. E. Sabine e Ramer (1948, p. 268, fig. 2)



Segundo Bertoli (2000) uma membrana consiste em uma placa colocada sobre um suporte, delineando seu contorno, contra uma parede, da qual está separada por uma distância d que, juntamente com a densidade superficial da placa, determina a frequência de ressonância do sistema (Eq. 3-45). Os gráficos obtidos por P. E. Sabine e Ramer (1948) mostram que, seja com ar por trás (Figura 3.42), seja com material absorvente solto ou fixado (Figura 3.43), o painel de compensado absorve os sons seguindo um padrão similar.

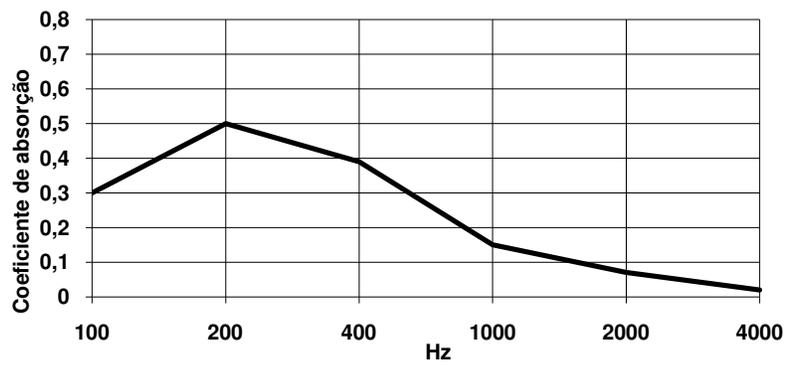
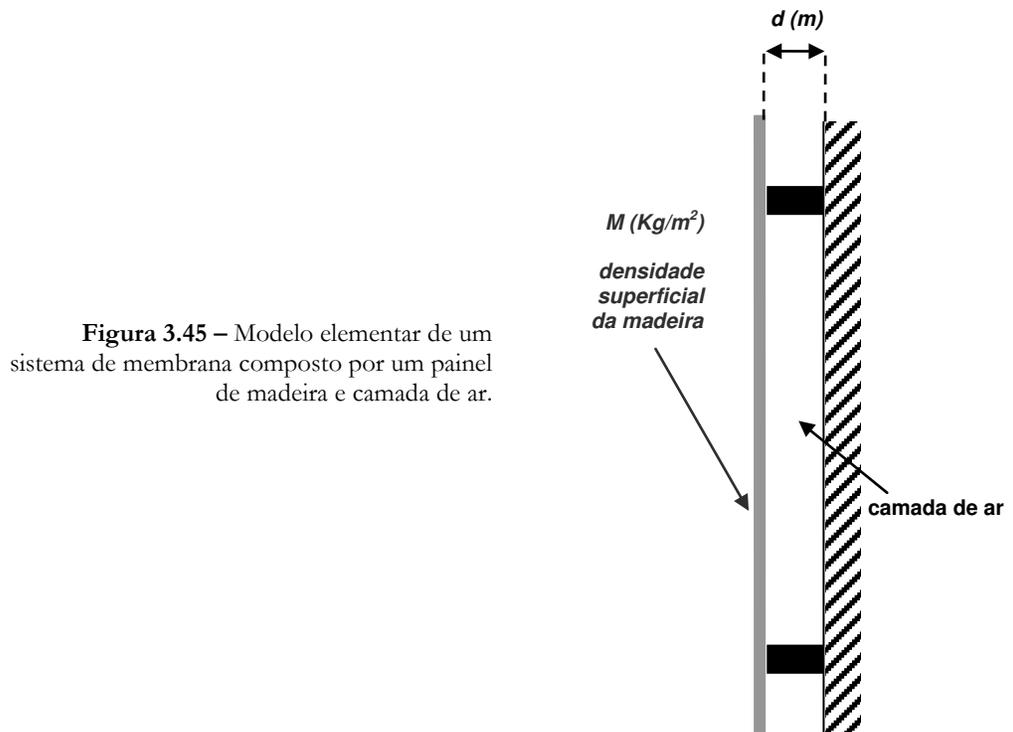


Figura 3.44 – Absorção característica de uma membrana, conforme Kuttruff (2000)



3.4.3.2 Halos sonoros simpáticos (Sympathetic ringing tones)

Segundo Beranek (1962), ressonâncias podem ser percebidas após uma interrupção abrupta de um acorde quando este contém frequências idênticas às de ressonância por simpatia que porventura houver em elementos da sala.

Alguns casos identificados por Beranek:

- Grade metálica vazada (580Hz)
⇒ Solução: aplicação de material inibidor de vibrações em cada elemento da grade.
- Ressonância ocorrida entre vigas uniformemente espaçadas na estrutura do teto;
⇒ Solução: enclausurar as vigas expostas de forma irregular, com pesado teto de concreto (*concrete ceiling*) suspenso.

3.4.3.3 Difração acústica por saliências regulares e constantes (Acoustic diffraction grating)

É o que ocorre, em exemplo de Beranek (1962), com paredes possuindo elementos verticais (colunas) regularmente espaçados.

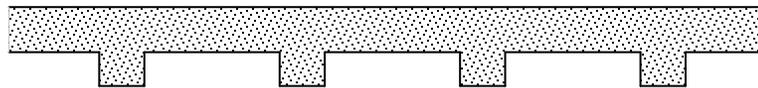


Figura 3.46 - Vista superior de parede lateral com irregularidades constantes.

Essa estrutura, conforme Beranek (1962), pode ocasionar a reflexão seletiva de frequências. Para evitar esse inconveniente, a profundidade e o espaçamento dos elementos deve ser variados randomicamente.

3.4.3.4 Flutter echo e Comb filter

Uma boa forma de observar um *flutter echo* é no interior de um espaço com paredes paralelas separadas por uma distância de aproximadamente 6m.

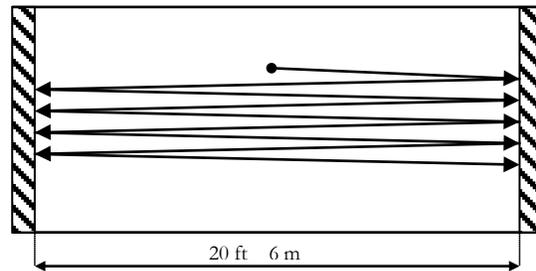


Figura 3.47 - *Flutter echo*: rebotes entre superfícies paralelas.

Mas o *flutter echo* pode ser produzido por outras configurações geométricas de superfícies, como mostrado na *Figura 3.48* (LONG, 2006, p. 752).

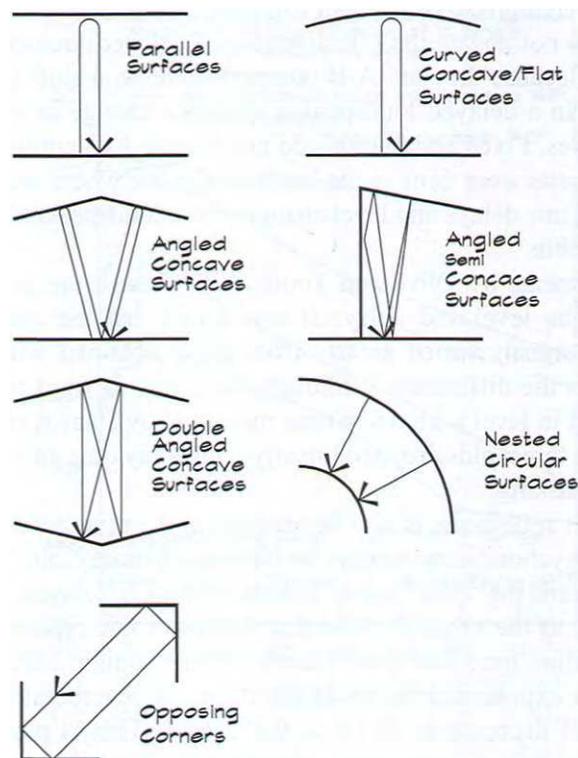


Figura 3.48 – Configurações de superfícies gerando *flutter echo*.
 Fonte: Long (2006, p. 752, fig.21-8)

Nos espaços propícios à ocorrência de *flutter echo*, a um impacto, como por exemplo, bater palmas, observa-se o efeito de repetição iterativa (rebotes sucessivos) em amortecimento progressivo.

Numa sala de concerto que posua esse problema, o efeito pode ser percebido após sons breves, em *staccato*, e impactos. O *flutter echo* prejudica a sonoridade da sala produzindo repetições iterativas em amortecimento, timbre metálico e filtragem própria a um *comb filter*.

Conforme Queiroz (2003, p. 152-153) o termo *comb filtering* aplica-se a um tipo particular de *source-boundary interference* correspondendo à sobreposição ao som direto da reflexão em uma parede próxima.

Comb filtering designa então uma filtragem em decorrência da sobreposição de um sinal a outro idêntico a ele mesmo, porém com atraso de um curto intervalo de tempo, o que gera cancelamentos e reforços de fase. O gráfico da resposta em frequência (Figura 3.50) consiste em uma série de arcos alinhados, o que em alguns casos lembra a um ‘pente’, em inglês *comb*.

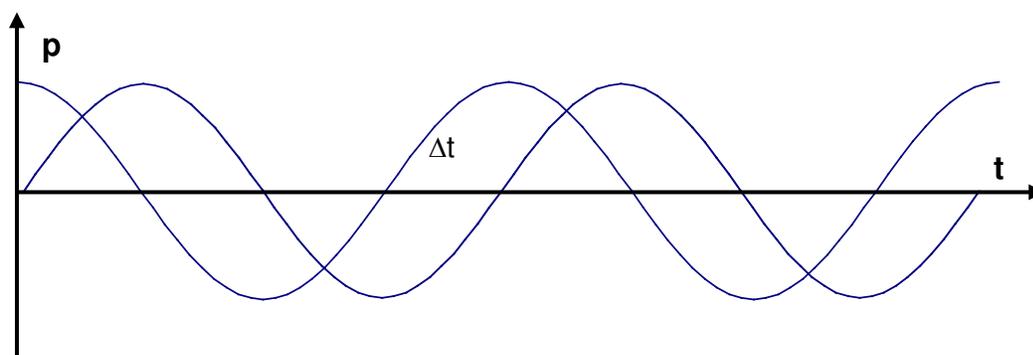


Figura 3.49 – Sobreposição de um sinal a ele mesmo (pressão sonora x tempo) defasado de Δt .

Tendo o intervalo de atraso como o período T podemos inferir a frequência f_0 sobre os harmônicos da qual teremos os máximos. Os harmônicos ímpares de $f_0/2$ serão os mínimos.

A filtragem produzida num processo de *comb filtering* é similar à filtragem em decorrência de um *flutter eco*, somente que esta não tem somente a interferência de uma reflexão sobre o som direto, mas ocorre com uma realimentação constante e decrescente da onda atrasada realçando ainda mais o efeito de filtragem.

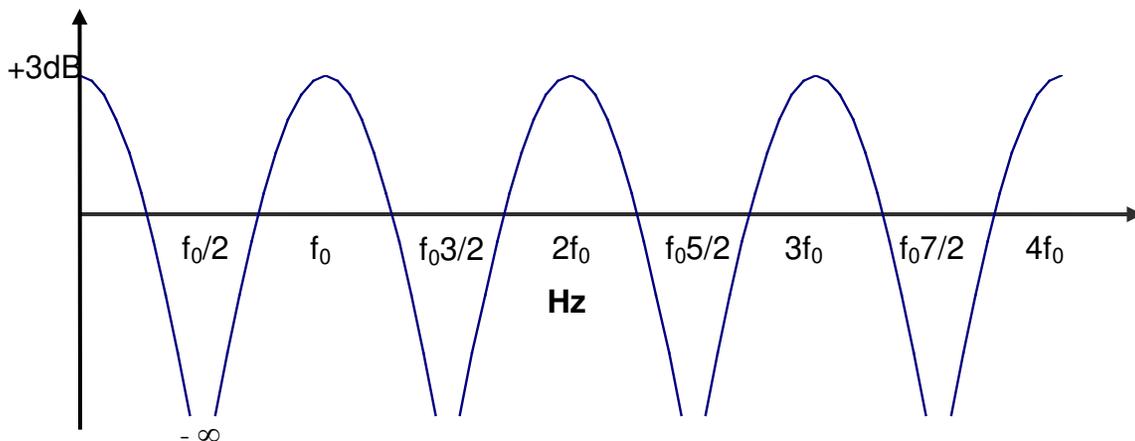


Figura 3.50 – Alteração típica do nível de pressão sonora em decibels (em função da frequência) de um sinal que passou por um processo de filtragem tipo *comb filter*.

Os harmônicos pares referentes à frequência f_0 correspondente ao atraso com período T , serão reforçados de até 3dB, os harmônicos ímpares da frequência oitava abaixo de f_0 , serão praticamente anulados. Pode-se afirmar que, além de uma falta de uniformidade nas fundamentais dos sons produzidos num campo acústico onde ocorre esse fenômeno, toda vez que essas coincidem com as frequências de reforço bem como de anulação, prejudicando a audição correta das intensidades produzidas pelos intérpretes, o espectro dos sons produzidos será deformado, tornando-se metálico, quebradiço (*brittle*), ou duro (*hard*), ou agressivo (*harsh*) e, portanto, desagradável (BERANEK, 1996, p. 451) (*item 3.3.9.1 Difusão: primeiras reflexões*)

3.4.3.5 Focalização

Conforme Beranek (2004, p. 572) focalizações podem ocorrer devido a certas formas de superfícies em uma sala, neste caso, côncavas, concentrando a reflexão das ondas incidentes num único ponto.

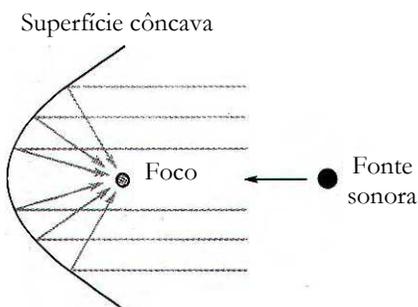


Figura 3.51 – Convergência de reflexões em um foco devido a superfície reflexiva côncava.
Fonte: Cooper (1996, p. 57, fig. 2-21)

4. REVISÃO DA LITERATURA II: DIFUSORES DE SCHROEDER

A reflexão com interferência de fase (*reflection phase-grating*) foi idealizada por Manfred R. Schroeder (1979) inicialmente para produzir um espalhamento sonoro com o objetivo de solucionar o problema gerado por auditórios modernos com teto baixo cuja imagem sonora percebida pelos ouvintes é prejudicada pelas primeiras reflexões produzidas pelo teto, interferindo com as primeiras reflexões laterais, essenciais para o relevo sonoro. Instalados os difusores, as reflexões no teto que antes eram especulares tornam-se difusas e, assim, melhoram o conforto acústico do local. Inúmeras são as aplicações dos difusores de Schroeder (D'ANTONIO e KONNERT, 1984a; COX e D'ANTONIO, 2003; 2004), empregados de forma variada em muitos projetos acústicos.

A *reflexão com interferência de fase* produz um espalhamento equilibrado de intensidades sonoras em todas as ordens de difração, com exceção da ordem zero, correspondendo à direção especular, e pode ser produzida por uma superfície rígida dotada de cavidades com diferentes profundidades d_n (Cf. Figura 4.1).

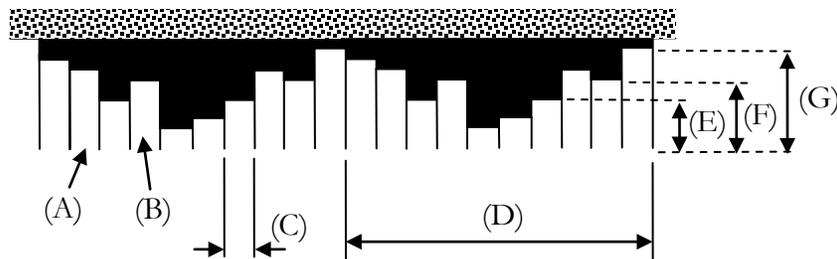


Figura 4.1 - Esquema básico de um difusor por *reflexão com interferência de fase*. – (A) e (B) cavidades ; – (C) largura W da cavidade; – (D) período de seqüenciamento das cavidades; – (E), (F) e (G) profundidades das cavidades $[d_n]$.

Na reflexão, a fase da onda incidente é modificada de $2d_n 2\pi/\lambda$, sendo λ o comprimento de onda. Se as diferentes profundidades d_n são definidas por:

$$d_n = \frac{1}{2} \frac{\lambda g^n}{p} \quad \text{Eq. 4-1}$$

onde g é *raiz primitiva*²⁸ do número primo p , e g^n o menor resíduo módulo p , as ondas refletidas terão amplitudes complexas em sua frente de onda

$$a_n = e^{\frac{2\pi i g^n}{p}} \quad \text{Eq. 4-2}$$

Em outras palavras, as diferenças de fase farão com que, em função da frequência, a onda se espalhe devido à interferência ocorrida.

Estes difusores podem se apresentar com seqüenciamento de cavidades bem definidas ou de saliências, como será visto mais adiante. Os efeitos de interferência de fase são mais intensos nos difusores com cavidades (Cf. *Figura 4.1; Figura 4.4 (A), p. 155; Figura 4.5 (A) p. 159*) do que naqueles com saliências (Cf. *Figura 4.4 (B), p. 155; Figura 4.5 (B) p. 159*).

4.1 PARÂMETROS DE DESIGN DE UM DIFUSOR POR REFLEXÃO COM INTERFERÊNCIA DE FASE

A partir de D'Antonio e Konnert (1984a) serão apresentados, a seguir, os parâmetros de *design* de difusores por reflexão com interferência de fase.

4.1.1 Largura de banda [f_0 a f_{max}]

A largura de banda corresponde ao âmbito delimitado pela frequência mais baixa f_0 e a frequência mais alta f_{max} dentro do qual o difusor estará atuando. Trata-se de um parâmetro de projeto, pois efetivamente o difusor continua tendo certo desempenho acima e abaixo desses limites. f_0 , também chamada de frequência de *design* do difusor, está associada a $\lambda_0 (= c/f_0)$, o comprimento de onda de *design*. Inversamente, à f_{max} corresponde λ_{min} .

²⁸ *primitive root*

4.1.2 Largura das cavidades [W]

Para a correta atuação de um difusor de Schroeder, a onda que se propaga pelas cavidades deve ser plana. Assim, a largura das cavidades W limita o comprimento de onda (λ_{min}) referente à frequência máxima (f_{max}) de design do difusor.

$$W = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad \text{Eq. 4-3}$$

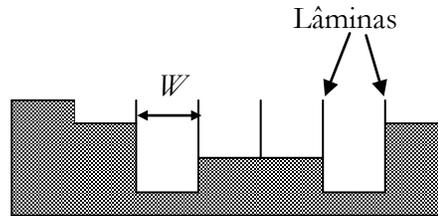


Figura 4.2 – Largura das cavidades W , delimitadas por lâminas separadoras. A figura mostra o corte transversal de um difusor.

Uma onda com $\lambda < \lambda_{min}$ sem incidência normal não poderia adentrar as cavidades como onda plana, conforme ilustra a *Figura 4.3*.

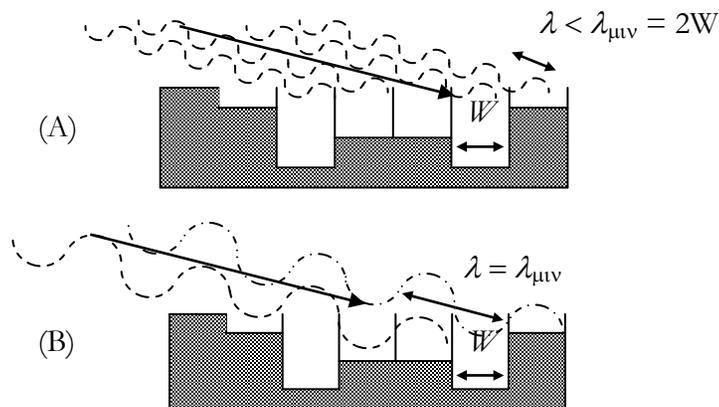


Figura 4.3 – Incidência de onda : (A) $\lambda < \lambda_{min}$; (B) $\lambda = \lambda_{min} = 2W$.

4.1.3 Número primo [N]

N é um número primo de cujo módulo serão obtidos resíduos que constituirão uma seqüência numérica.

No projeto de um difusor de Schroeder, N acaba sendo o número de cavidades compreendidas num período de profundidades de cavidades.

Além disso, quanto à eficiência de um difusor, quanto mais elevado N , melhor o desempenho.

4.1.4 Tipo de seqüência matemática [QR, PR₂, PR₃]

4.1.4.1 Resíduos quadráticos [QR]

A seqüência com *resíduos quadráticos* aqui empregada consiste na operação módulo N sobre uma seqüência de números inteiros ($n \in \mathbb{Z}$) onde $n = 0, 1, 2, 3...N-1$, sendo N um número primo, na qual cada número é elevado ao quadrado:

$$n^2 = 0, 1, 4, 9... (N - 1)^2$$

A seqüência com *resíduos quadráticos* é, então, definida por:

$$\sigma_n = n^2 \bmod N \quad \text{Eq. 4-4}$$

onde ($n \in \mathbb{Z}$) e $n = 0, 1, 2, 3...N-1$, sendo N um número primo.

Para melhor esclarecimento, a operação módulo, ou seja, $n \bmod N$, resulta no resto da divisão de um número (n) por outro (N), definindo, assim, um conjunto de números inteiros no qual a diferença de dois de quaisquer de seus elementos resulte sempre num número que pertença ao mesmo conjunto. Assim, todos os resultados da operação $\bmod N$ estão compreendidos no conjunto de inteiros entre 0 e $N-1$.

Por exemplo, se tomarmos $N=5$ e $n=7$, teremos $7 \bmod 5 = 2$, pois $7/5 = 1$ com resto 2.

Da mesma forma, $2 \bmod 5=2$; $4 \bmod 5=4$; $5 \bmod 5=0$; $0 \bmod 5=0$; $6 \bmod 5=1$; $25 \bmod 5=0$ e $27 \bmod 5=2$.

4.1.4.2 Raiz primitiva 2 [PR₂]

A seqüência de *raiz primitiva 2* é definida por:

$$\sigma_n = 2^n \bmod N \quad \text{Eq. 4-5}$$

onde ($n \in \mathbb{Z}$) e $n = 1, 2, 3 \dots N-1$ sendo N um número primo.

4.1.4.3 Raiz primitiva 3 [PR₃]

A seqüência de *raiz primitiva 3* é definida por:

$$\sigma_n = 3^n \bmod N \quad \text{Eq. 4-6}$$

Onde ($n \in \mathbb{Z}$) e $n = 1, 2, 3 \dots N-1$ sendo N um número primo.

4.2 PROCEDIMENTOS PARA DESIGN DE DIFUSORES

4.2.1 *Freqüência máxima* [f_{max}]

A *freqüência máxima* (f_{max} da largura de banda) é definida a partir da largura [W] das cavidades:

$$f_{max} = \frac{c}{2W} \quad \text{Eq. 4-7}$$

Considerando-se a espessura [T] das separações das cavidades (lâminas) temos:

$$f_{max} = \frac{c}{2(W + T)} \quad \text{Eq. 4-8}$$

As reflexões abaixo de f_0 e acima de f_{max} tendem a ser especulares.

4.2.2 Freqüência mínima [f_0] e número primo N

N , o número de cavidades por período e igualmente o número primo gerador da série, é obtido através da expressão:

$$N = \frac{m_{\max} c}{f_0 (W + h)} \quad \text{Eq. 4-9}$$

ou então,

$$N = \frac{2m_{\max} f_{\max}}{f_0} \quad \text{Eq. 4-10}$$

Quanto maior [m_{\max}], maior é a difusão, ou seja, maior o número de lóbulos no diagrama polar de espalhamento. Para uma boa difusão em f_0 , m_{\max} deve ser pelo menos igual a 2.

Por outro lado, observa-se que quanto maior for o número de cavidades por período N , menor será a freqüência f_0 e, por conseguinte, maior a largura de banda do difusor (de f_0 a f_{\max}).

O resultado de N , obtido através da Eq. 4-9 ou Eq. 4-10 deve ser ajustado para o número primo imediatamente superior²⁹ da seqüência de números primos

4.2.3 Sequenciamento [S_n] e Profundidades das cavidades [d_n]

Tendo determinado N e definido f_0 pode-se calcular a seqüência de profundidades,

$$d_n = \frac{\sigma_n c}{2Nf_0} = \frac{\sigma_n \lambda_0}{N \cdot 2} \quad \text{Eq. 4-11}$$

sendo

$$\sigma_n = n^2 \pmod{N} \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots N-1 \quad (\text{QR - resíduo quadrático})$$

ou

$$\sigma_n = 2^n \pmod{N} \quad n = 1, 2, 3 \dots N-1 \quad (\text{PR2 - raiz primitiva 2})$$

ou

²⁹ 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97, 101, 103, 107, 111, 113, etc.

$$\sigma_n = 3^n \bmod N \quad n = 1, 2, 3 \dots N-1 \quad (\text{PR3} - \text{raiz primitiva } 3)$$

Conforme Cox e D'Antonio (2003), no caso de raízes primitivas a Eq. 4-11 deve ser adequada como segue:

$$d_n = \frac{\sigma_n \lambda_0}{2(N-1)} \quad \text{Eq. 4-12}$$

pois enquanto a série de resíduos quadráticos tem N termos, a série de raízes primitivas tem $(N-1)$ termos.

Através da equação:

$$f_0 = \frac{\sigma_{\max}}{N} \frac{c}{2d_{\max}} \quad \text{Eq. 4-13}$$

vê-se que é possível ampliar a resposta do difusor nas baixas frequências diminuindo a razão σ_{\max}/N , (COX e D'ANTONIO, 2003, p. 9) introduzindo, para isso, uma constante k na Eq. 4-4 (p. 149), tal que:

$$\sigma_n = (n^2 + k) \bmod N \quad n = 1, 2, 3 \dots N \quad \text{Eq. 4-14}$$

Para $N = 13$ e a constante $k = 0$, temos:

$$\sigma_n = \{0, 1, 4, 9, 3, 12, 10, 10, 12, 3, 9, 4, 1\}, \quad \frac{S_{\max}}{N} = \frac{12}{13}$$

Para a constante $k = 4$, temos

$$\sigma_n = \{4, 5, 8, 0, 7, 3, 1, 1, 3, 7, 0, 8, 5\}, \quad \frac{S_{\max}}{N} = \frac{8}{13}$$

4.2.4 Exemplos de seqüenciamentos [σ_n]

$N = 7$

$$QR \quad \sigma_n = \{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\} \quad 1 \leq n \leq N$$

$$PR_2 \quad \sigma_n = \{2, 4, 1, 2, 4, 1\} \quad 1 \leq n \leq N - 1$$

$$PR_3 \quad \sigma_n = \{3, 2, 6, 4, 5, 1\} \quad 1 \leq n \leq N - 1$$

$N = 11$

$$QR \quad \sigma_n = \{0, 1, 4, 9, 5, 3, 3, 5, 9, 4, 1\} \quad 1 \leq n \leq N$$

$$PR_2 \quad \sigma_n = \{2,4,8,5,10,9,7,3,6,1\} \quad 1 \leq n \leq N-1$$

$$PR_3 \quad \sigma_n = \{3,9,5,4,1,3,9,5,4,1\} \quad 1 \leq n \leq N-1$$

$$N = 17$$

$$QR \quad \sigma_n = \{0,1,4,9,16,8,2,15,13,13,15,2,8,16,9,4,1\} \quad 1 \leq n \leq N$$

$$QR_{k=4} \quad \sigma_n = \{4,5,8,13,3,12,6,2,0,0,2,6,12,3,13,8,5\} \quad 1 \leq n \leq N$$

$$PR_2 \quad \sigma_n = \{2,4,8,16,15,13,9,1,2,4,8,16,15,13,9,1\} \quad 1 \leq n \leq N-1$$

$$PR_3 \quad \sigma_n = \{3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1\} \quad 1 \leq n \leq N-1$$

4.3 SIMETRIAS OBSERVADAS NOS SEQÜENCIAMENTOS σ_N OBTIDOS ATRAVÉS DE RESÍDUOS QUADRÁTICOS E RAÍZES PRIMITIVAS

Nos seqüenciamentos σ_n para obter as profundidades das cavidades d_n (Cf. Itens 4.2.3; 4.2.4) constatou-se a presença de simetrias, havendo um tipo específico para cada seqüenciamento.

Nos seqüenciamentos por *resíduo quadrático* (QR) temos uma *simetria axial*, do mesmo tipo que, em música, leva o nome de *retrogrado*: os elementos se apresentam até a metade da seqüência e a partir daí se repetem na ordem contrária – do último ao primeiro.

$$N = 7$$

$$QR \quad \sigma_n \rightarrow 0, 1, 4, 2, 2, 4, 1, 0, 1, 4, 2, 2, 4, 1, 0, 1, 4, 2, 2, 4, 1, 0...$$

$$N = 11$$

$$QR \quad \sigma_n \rightarrow 0, 1, 4, 9, 5, 3, 3, 5, 9, 4, 1, 0, 1, 4, 9, 5, 3, 3, 5, 9, 4, 1, 0...$$

$$N = 17$$

$$QR \quad \sigma_n \rightarrow 0, 1, 4, 9, 16, 8, 2, 15, 13, 13, 15, 2, 8, 16, 9, 4, 1, 0, 1, 4, 9, 16, 8, 2, 15, 13, 13, 15, 2, 8, 16, 9, 4, 1, 0...$$

Nos seqüenciamentos por *raiz primitiva 2* (PR₂) temos uma *simetria translacional*, sendo uma simples repetição dos termos, na mesma ordem em que se apresentaram.

4.4 SEQUENCIAMENTO DE PROFUNDIDADES OU SALIÊNCIAS EM DIFUSORES UNIDIMENSIONAIS

Vejam os detalhes do processo de *design* para cada um dos três tipos de sequenciamentos: QR , PR_2 e PR_3 . Antes, porém, é importante observar que o período de profundidades das cavidades no difusor QR é de 17 cavidades e se repete a partir da 18ª. Nos difusores PR , o período é de 16 cavidades e se repete a partir da 17ª. Nos difusores PR as séries de profundidades serão calculadas com a Eq. 4-12 (p. 152).

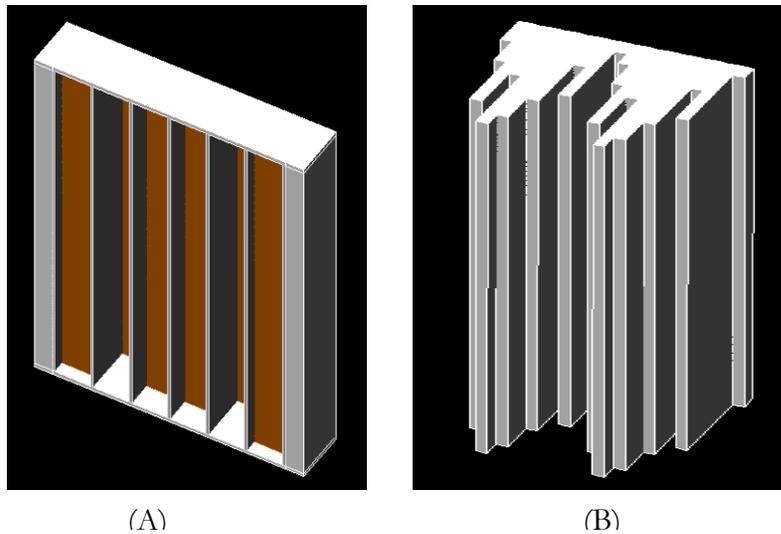


Figura 4.4 – Imagens de difusores unidimensionais: (A) com separadores de cavidades e (B) com saliências.

Dados de *design*:

$$f_{max} = 3\text{KHz}$$
$$f_0 = 710\text{Hz}$$
$$m_{max} = 2$$
$$b = 3\text{mm (espessura dos separadores de cavidades)}$$
$$\text{Temperatura média do ar} = 20^\circ\text{C}$$

Resultados:

$$c = 342,9\text{m/s}$$
$$N = 17$$
$$W = 5,71\text{cm}$$
$$W+T = 5,74\text{cm}$$
$$N = 17 > c/(2Wf_0) = 4,22$$

QR - Quadratic residue			
$\sigma_n = n^2 \pmod{N}$			
		d_n	d_n
n	$n^2 \pmod{N}$	cm	in
0	0	0,000	0,000
1	1	1,420	0,559
2	4	5,682	2,237
3	9	12,784	5,033
4	16	22,727	8,948
5	8	11,364	4,474
6	2	2,841	1,118
7	15	21,307	8,389
8	13	18,466	7,270
9	13	18,466	7,270
10	15	21,307	8,389
11	2	2,841	1,118
12	8	11,364	4,474
13	16	22,727	8,948
14	9	12,784	5,033
15	4	5,682	2,237
16	1	1,420	0,559
17	0	0,000	0,000
18	1	1,420	0,559
19	4	5,682	2,237
20	9	12,784	5,033
21	16	22,727	8,948
22	8	11,364	4,474
23	2	2,841	1,118
24	15	21,307	8,389
25	13	18,466	7,270
26	13	18,466	7,270
27	15	21,307	8,389
28	2	2,841	1,118
...

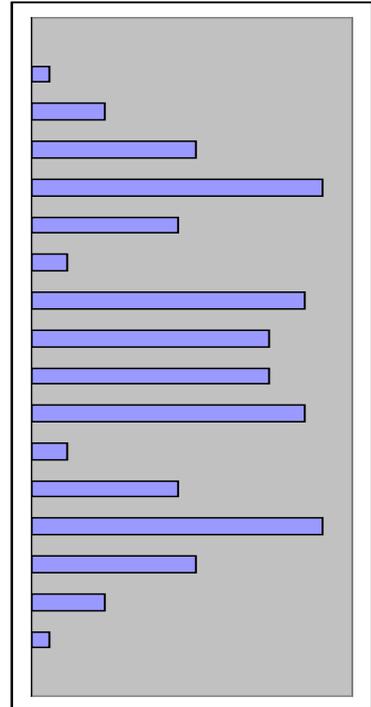


Tabela 4-1 – Seqüenciamento das profundidades num *QRD* unidimensional. À direita representação das profundidades de acordo com os resultados obtidos, onde se pode observar a *simetria axial* da mesma.

PR ₂ - Primitive root			
$\sigma_n = 2^n \bmod N$			
		d_n	d_n
n	$2^n \bmod N$	cm	in
0	-	-	-
1	2	3,018	1,188
2	4	6,037	2,377
3	8	12,074	4,754
4	16	24,148	9,507
5	15	22,639	8,913
6	13	19,620	7,724
7	9	13,583	5,348
8	1	1,509	0,594
9	2	3,018	1,188
10	4	6,037	2,377
11	8	12,074	4,754
12	16	24,148	9,507
13	15	22,639	8,913
14	13	19,620	7,724
15	9	13,583	5,348
16	1	1,509	0,594
17	2	3,018	1,188
18	4	6,037	2,377
19	8	12,074	4,754
20	16	24,148	9,507
21	15	22,639	8,913
22	13	19,620	7,724
23	9	13,583	5,348
24	1	1,509	0,594
25	2	3,018	1,188
26	4	6,037	2,377
...

Tabela 4-2 – Seqüenciamento das profundidades num PR₂D unidimensional. No esquema representativo das profundidades à direita, destaque para a *simetria translacional*.

PR ₃ - Primitive root			
	$\sigma_n = 3^n \bmod N$		
		d_n	d_n
n	3ⁿ mod N	cm	in
0	-	-	-
1	3	4,528	1,783
2	9	13,583	5,348
3	10	15,092	5,942
4	13	19,620	7,724
5	5	7,546	2,971
6	15	22,639	8,913
7	11	16,602	6,536
8	16	24,148	9,507
9	14	21,129	8,319
10	8	12,074	4,754
11	7	10,565	4,159
12	4	6,037	2,377
13	12	18,111	7,130
14	2	3,018	1,188
15	6	9,055	3,565
16	1	1,509	0,594
17	3	4,528	1,783
18	9	13,583	5,348
19	10	15,092	5,942
...

Tabela 4-3 – Seqüenciamento das profundidades num PR₃D unidimensional. Seqüência de profundidades à direita com *simetria rotacional*.

4.5 SEQUENCIAMENTO DE PROFUNDIDADES OU SALIÊNCIAS EM DIFUSORES BIDIMENSIONAIS

Seguindo os princípios de Schroeder, uma seqüência de profundidades de cavidades S_n pode ser distribuída de forma bidimensional (FUJIWARA e MIYAJIMA, 1992, p. 150) da seguinte forma:

σ_1	σ_2	σ_3	...	σ_k	...	σ_N
σ_2	$(\sigma_2 + \sigma_2)_{\text{mod } N}$	$(\sigma_2 + \sigma_3)_{\text{mod } N}$...		
σ_3	$(\sigma_3 + \sigma_2)_{\text{mod } N}$	$(\sigma_3 + \sigma_3)_{\text{mod } N}$				
...						
σ_i	...			$(\sigma_i + \sigma_k)_{\text{mod } N}$...	
...				...		
σ_N	...					$(\sigma_N + \sigma_N)_{\text{mod } N}$

Tabela 4-4 – Procedimento para obter as profundidades num difusor bidimensional a partir de uma série de profundidades original.

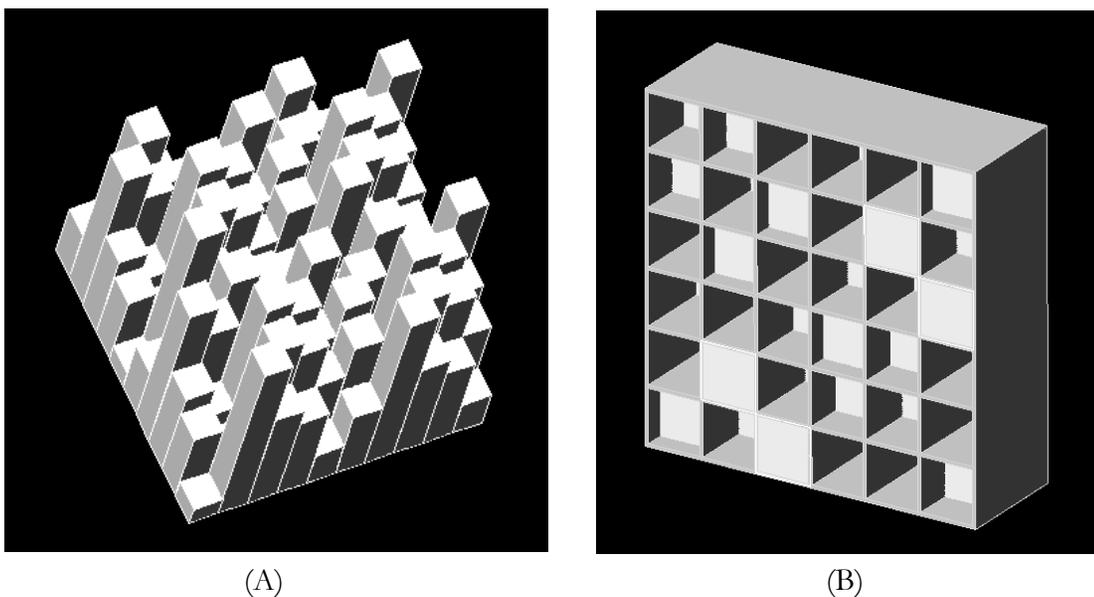


Figura 4.5 - Difusores bidimensionais: (A) com saliências e (B) com separadores de cavidades.

Para difusores QR, $1 \leq n \leq N$ e para difusores PR, $1 \leq n \leq N - 1$.

Dados de *design*: QR

$$N = 7$$

$$f_0 = 1150\text{Hz}$$

$$f_{max} = 2000\text{Hz}$$

$$m_{max} = 2$$

$$W = 8,6\text{cm}$$

$$W.N = 60\text{cm}$$

Resultado: $\sigma_n = \{0,1,4,2,2,4,1\}$

0	1	4	2	2	4	1
1	2	5	3	3	5	2
4	5	1	6	6	1	5
2	3	6	4	4	6	3
2	3	6	4	4	6	3
4	5	1	6	6	1	5
1	2	5	3	3	5	2

Tabela 4-5 – Resultado do desdobramento da série QR original em seqüências complementares para obter o difusor bidimensional.

0,0	2,1	8,5	4,3	4,3	8,5	2,1
2,1	4,3	10,6	6,4	6,4	10,6	4,3
8,5	10,6	2,1	12,8	12,8	2,1	10,6
4,3	6,4	12,8	8,5	8,5	12,8	6,4
4,3	6,4	12,8	8,5	8,5	12,8	6,4
8,5	10,6	2,1	12,8	12,8	2,1	10,6
2,1	4,3	10,6	6,4	6,4	10,6	4,3

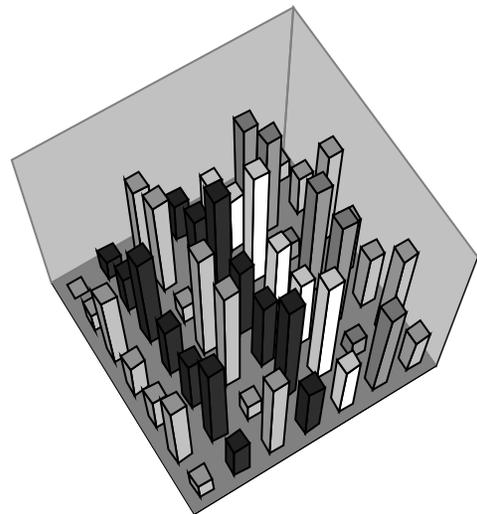


Tabela 4-6 – Profundidades em centímetros e representação proporcional.

Dados de *design*: PR_2

$$N = 11$$

$$f_0 = 725\text{Hz}$$

$$f_{max} = 2000\text{Hz}$$

$$m_{max} = 2$$

$$W = 8,6\text{cm}$$

$$W.N = 94,3\text{cm}$$

Resultado: $\sigma_n = \{2,4,8,5,10,9,7,3,6,1\}$

2	4	8	5	10	9	7	3	6	1
4	8	1	9	3	2	0	7	10	5
8	1	5	2	7	6	4	0	3	9
5	9	2	10	4	3	1	8	0	6
10	3	7	4	9	8	6	2	5	0
9	2	6	3	8	7	5	1	4	10
7	0	4	1	6	5	3	10	2	8
3	7	0	8	2	1	10	6	9	4
6	10	3	0	5	4	2	9	1	7
1	5	9	6	0	10	8	4	7	2

Tabela 4-7 – Resultado do desdobramento da série PR_2 original em seqüências complementares para obter o difusor bidimensional.

4,3	8,6	17,2	10,7	21,5	19,3	15,0	6,4	12,9	2,1
8,6	17,2	2,1	19,3	6,4	4,3	0,0	15,0	21,5	10,7
17,2	2,1	10,7	4,3	15,0	12,9	8,6	0,0	6,4	19,3
10,7	19,3	4,3	21,5	8,6	6,4	2,1	17,2	0,0	12,9
21,5	6,4	15,0	8,6	19,3	17,2	12,9	4,3	10,7	0,0
19,3	4,3	12,9	6,4	17,2	15,0	10,7	2,1	8,6	21,5
15,0	0,0	8,6	2,1	12,9	10,7	6,4	21,5	4,3	17,2
6,4	15,0	0,0	17,2	4,3	2,1	21,5	12,9	19,3	8,6
12,9	21,5	6,4	0,0	10,7	8,6	4,3	19,3	2,1	15,0
2,1	10,7	19,3	12,9	0,0	21,5	17,2	8,6	15,0	4,3

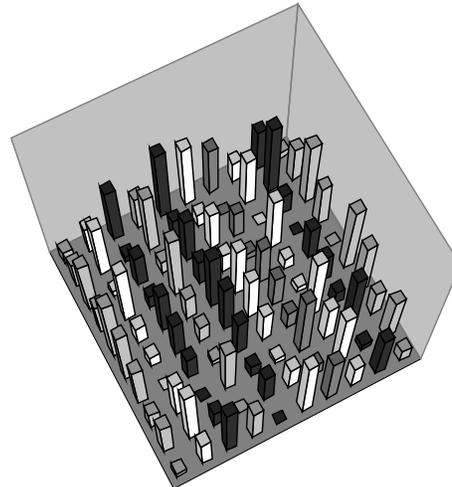


Tabela 4-8 – Profundidades em centímetros e representação proporcional.

4.6 CRÍTICA AOS DIFUSORES DE SCHROEDER

Apesar da ampla utilização dos difusores de Schroeder, estes tem necessitado de aperfeiçoamento e melhorias e conseqüentemente suscitado uma quantidade significativa de estudos e pesquisas nos últimos anos.

4.6.1 Problemas apresentados pelos difusores de Schroeder

4.6.1.1 Absorção, filtragem e atenuação

Kyoji Fujiwara (1995) constatou a absorção de energia em um difusor³⁰ $QR\ 2D$, $N=7$, $d_c = 42\text{cm}$, $W=7\text{cm}$, $T=2\text{mm}$, $W.N=49\text{cm}$, $\sigma_n = \{2,3,6,4,4,6,3\}$

$$f_0 = 350\text{Hz}$$

$$f_{max} = 2450\text{Hz}$$

2	3	6	4	4	6	3
3	6	2	0	0	2	6
6	2	5	3	3	5	2
4	0	3	1	1	3	0
4	0	3	1	1	3	0
6	2	5	3	3	5	2
3	6	2	0	0	2	6

14,0	21,0	42,0	28,0	28,0	42,0	21,0
21,0	42,0	14,0	0,0	0,0	14,0	42,0
42,0	14,0	35,0	21,0	21,0	35,0	14,0
28,0	0,0	21,0	7,0	7,0	21,0	0,0
28,0	0,0	21,0	7,0	7,0	21,0	0,0
42,0	14,0	35,0	21,0	21,0	35,0	14,0
21,0	42,0	14,0	0,0	0,0	14,0	42,0

Tabela 4-9 – Série desdobrada e profundidades de um difusor QRD bidimensional tendo $N=7$.

³⁰ O experimento foi efetuado com $N = 7 = c/2Wf_0$. Cox e D'Antonio (2003) alertam que para minimizar o efeito das frequências críticas recomenda-se ter $N > c/2Wf_0$. O difusor medido por Fujiwara, possuindo $N=7$, $W=7\text{cm}$ e $d=42\text{cm}$ (banda de 350 a 2450Hz), necessitaria portanto de $m_{max} > 1$. Porém, D'Antonio e Konnert (1984a, p. 231) alertam que para uma boa difusão em f_0 , com cinco lóbulos, devemos ter $m_{max} = 2$, o que exigiria que N fosse pelo menos 13.

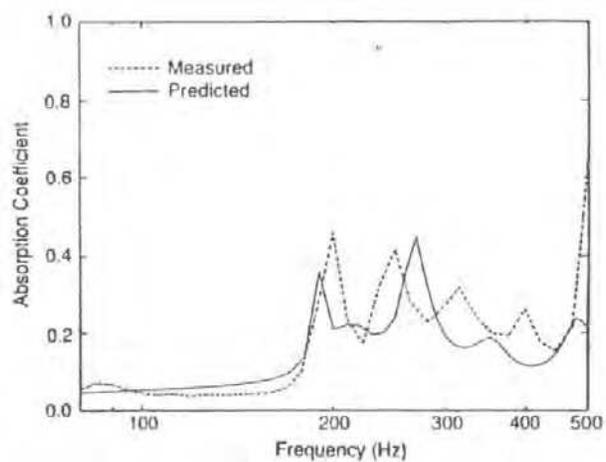


Figura 4.6 - Predição e medição de coeficiente de absorção de um QRD bidimensional, $N=7$.
 Fonte: Fujiwara (1995, p. 214, fig. 21.3)

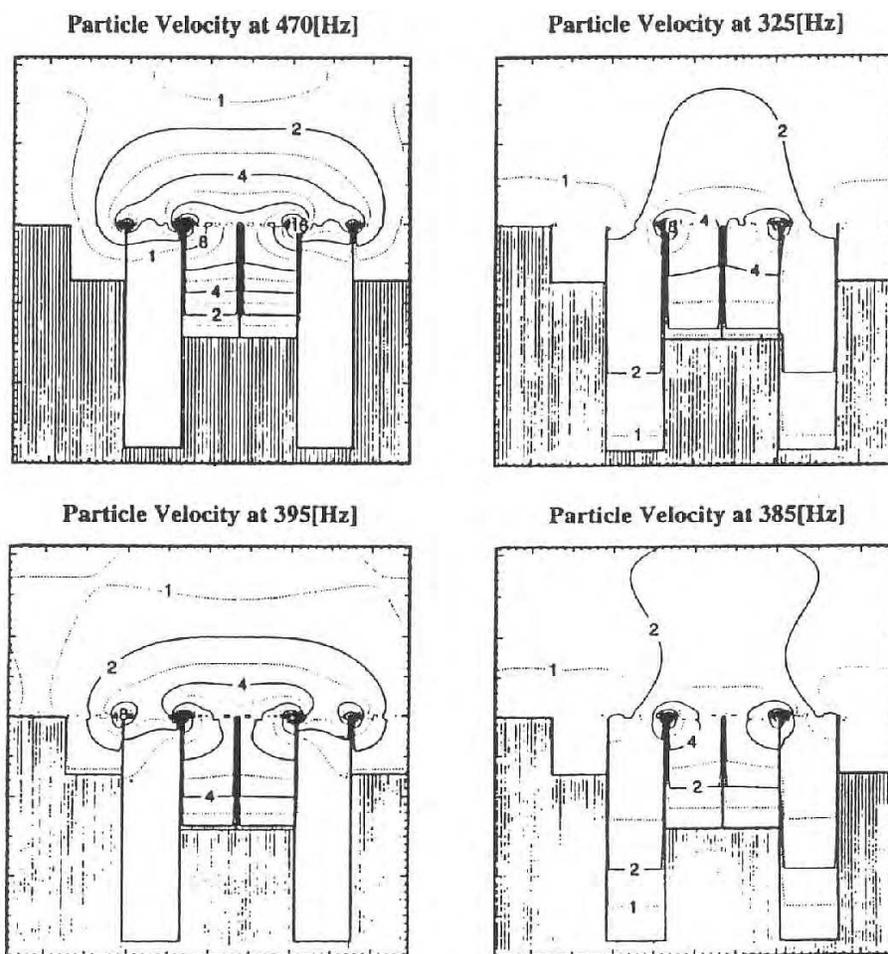


Figura 4.7 - Distribuição das velocidades de partícula ao redor de um QRD unidimensional.
 Fonte: Ando e Noson (1997, p. 216, fig. 21.5)

Após medição do difusor acima, Fujiwara e Moriyasu (1993a) obtiveram um coeficiente de absorção de 0,3 a partir de 200Hz (*Figura 4.6*) o que equivale a uma atenuação de 1,55 dB³¹ causada pelo grande aumento de velocidade das partículas no interior e justo acima do difusor, que em um caso extremo chegou a ser 17 vezes maior que a da onda incidente (*Figura 4.7*).

Observe na *Figura 4.7* a distribuição de velocidades, da menor (1) para a maior (17), num *QRD* e em várias frequências. Como se percebe, a velocidade das partículas da onda incidente é mais baixa: 1. Na superfície do difusor e no interior das cavidades a velocidade chega a 2 e mesmo a 4. No fundo da cavidade, a velocidade é 1. Entretanto, ao redor das bordas externas se encontram as maiores velocidades 8, 16 e 17.

Na *Figura 4.8* Onitsuka e Kawakami (1997) mostram como a dissipação de energia nas bordas varia em função da relação de profundidade entre as cavidades adjacentes e como se eleva nas bordas, para $0,3 < \Delta d/d < 0,8$.

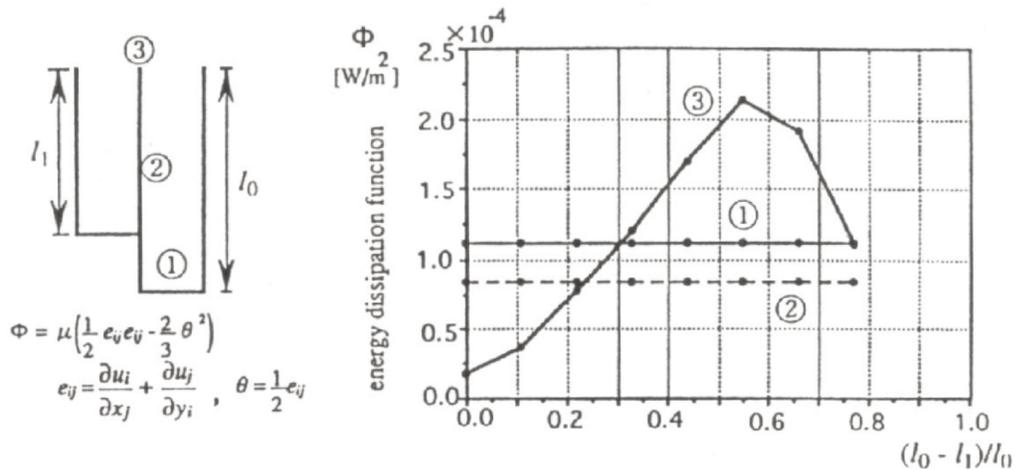


Figura 4.8 - Características espaciais da dissipação de energia.
Fonte: Onitsuka e Kawakami (1997, p. 207, fig. 20.3)

³¹ $10 \cdot \log 0,7$

Onitsuka e Kawakami (1997) concluem que a absorção do som nas baixas frequências num difusor QR é causada pela ressonância do ar entre as cavidades, bem como pela dissipação de energia na entrada das mesmas.

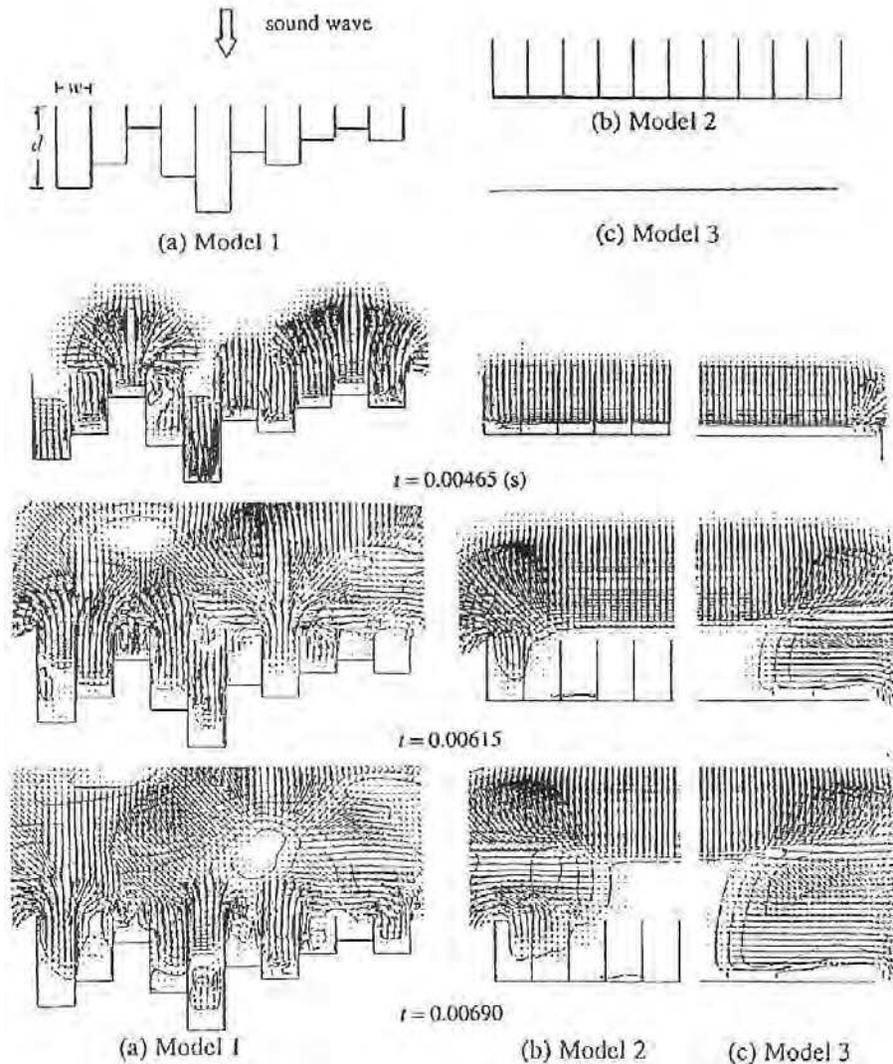


Figura 4.9 - Vetores das velocidades de partícula e contornos em três instantes diferentes : 4,65ms , 6,15ms e 6,90ms. Modelo 1 - QRD(sic) ($W = 180\text{mm}$, $d = 120\text{-}540\text{mm}$); Modelo 2 – cavidades iguais ($d = 300\text{mm}$); Modelo 3 – superfície plana. Fonte: Onitsuka e Kawakami (1997, p. 205, fig. 20.1).

F. Alton Everest (1997, p.154-156) confirma a absorção nos difusores por reflexão com interferência de fase devida ao fluxo de partículas com velocidade incrementada entre uma cavidade e outra, para igualar a pressão na entrada do difusor, havendo, após a difusão, uma atenuação de aproximadamente 8 a 10dB em relação à onda incidente.

Cox e D'Antonio (2003, p. 21-23) citam diversas publicações sustentando que as absorções são causadas devido ao mal acabamento dado aos difusores (FUJIWARA e MIYAJIMA, 1992), e mencionam que Kuttruff (1994), Mechel (1995) , Fujiwara e Miyajima (1995), e Wu *et al.* (2000; 2001) investigaram teórica e praticamente o mecanismo de absorção. Estes trabalhos citados mostram que os difusores de Schroeder são também absorvedores, devido ao alto fluxo de energia entre a entrada das cavidades em ressonância e a entrada das cavidades que não estão em ressonância; e à absorção por ressonância de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, sobretudo se as cavidades são estreitas. Na conclusão do artigo comentam que, devido aos efeitos de absorção e ao aspecto visual e estético dos difusores de Schroeder, o *design* dos difusores modernos está se direcionando para superfícies curvas e formas geométricas.

4.6.1.2 Influência da periodicidade

Conforme Cox e D'Antonio (2003, p. 6-8 e p. 15-20) se a largura de um período de cavidades $N.W$ for demasiadamente estreita, a frequência de base do difusor f_0 terá somente um lóbulo maior e, então, o princípio da igualdade de distribuição de energia nos lóbulos de difusão, próprio aos difusores por resíduo quadrático, será perdido.

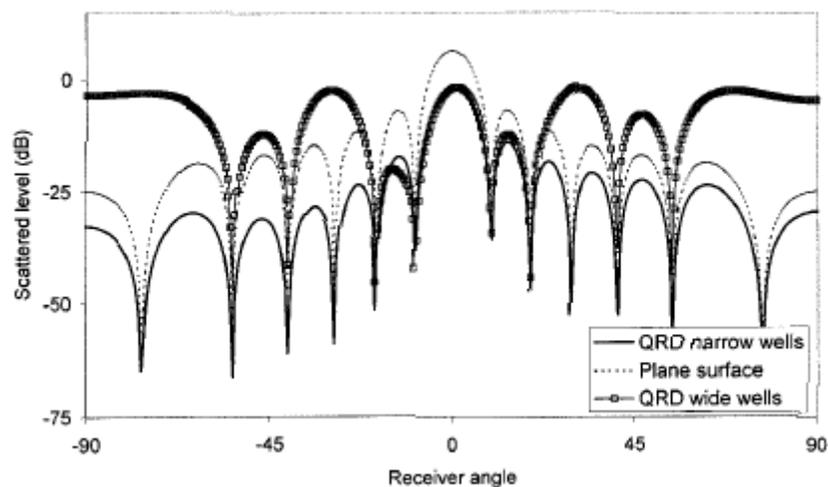


Figura 4.10 – Espalhamento produzido por dois *QRD* em 1KHz, um com $W=3$ cm e outro com $W=10$ cm. A largura de ambos permanece a mesma, aumentando-se o número de períodos. A superfície plana tem a mesma extensão. Fonte: Cox e D'Antonio (2003, p. 6, fig. 6)

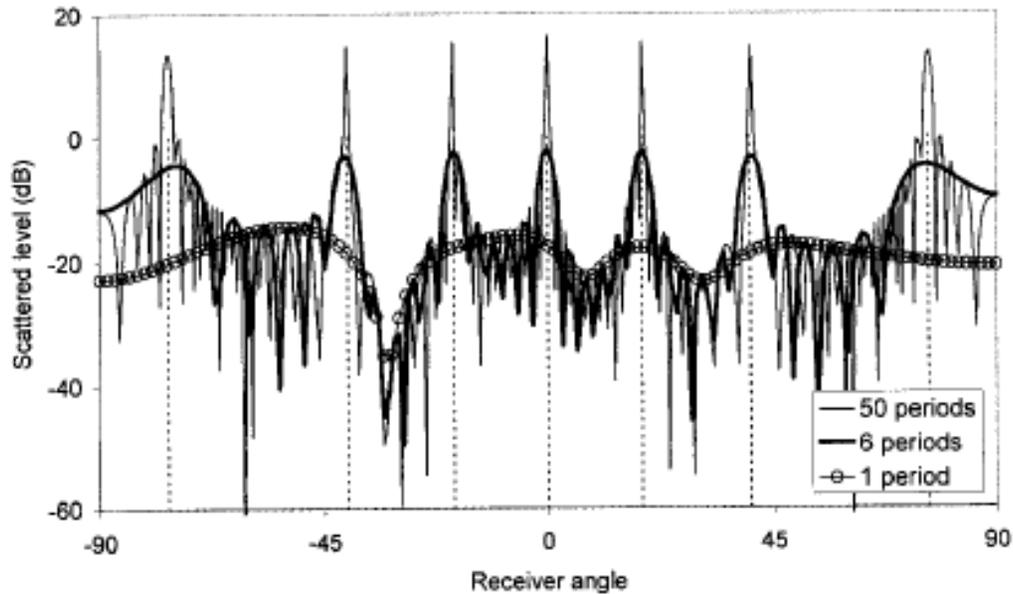


Figura 4.11 – QRD com $N=7$ em 3KHz com diferentes números de períodos.
 Fonte: Cox e D’Antonio (2003, p. 7, fig. 8)

Se, além de um período de cavidades estreito, tivermos, ainda, cavidades também estreitas, ou seja, uma grande profundidade d_n em relação à largura W , a frequência limite em que ocorrerá a difusão não será mais determinada pela profundidade máxima $\lambda_0/2$, mas pela largura do período $N.W$.

Comparando um difusor *QRD* com cavidades estreitas; uma superfície plana; e um *QRD* com cavidades largas, observa-se na *Figura 4.10* o melhor desempenho do último e o comportamento semelhante dos dois primeiros.

Para que o difusor tenha desempenho otimizado é necessário, em princípio, que ele seja periódico, pois a distribuição equilibrada de energia pelos lóbulos de difração é gerada pela periodicidade da superfície (COX e D’ANTONIO, 2003, p. 8). A *Figura 4.11* ilustra o espalhamento de difusores contendo 1, 6 e 50 períodos. Para os difusores periódicos, os níveis similares alinham-se com os lóbulos de difusão (linhas pontilhadas). No caso de um único período, há somente pontos arbitrários na resposta polar. Essas direções são desprezíveis se não houver periodicidade, pois, para uma boa resposta polar de uma superfície, é necessária uma distribuição de ângulos que caracterize espalhamento uniforme. Por isso, ao usar somente um período no difusor, estaríamos prejudicando o uso de seqüências de resíduo quadrático, ou de qualquer outra seqüência matemática baseada numa performance periódica. Contrariamente, um

grande número de períodos fará com que os lóbulos se tornem muito estreitos, o que leva a um espalhamento não equilibrado devido ao grande número de nulos, como se constata na *Figura 4.11*.

Por essas razões, seria mais adequado projetar um difusor com pequeno número de períodos, o suficiente para assegurar uma periodicidade mínima e ao mesmo tempo não chegar a ter lóbulos de difração demasiadamente estreitos. Testes revelaram que quatro a cinco períodos são o mínimo necessário (HARGREAVES et al., 2000).

A largura do período $N.W$ deve permanecer larga para assegurar a presença de um grande número de lóbulos, o que implica em um número primo N suficientemente grande. Se a largura de cavidade W for grande, a ponto de provocar reflexões especulares de ondas de alta frequência no fundo das cavidades, sobretudo das ondas frontais, ela poderá comprometer o desempenho do difusor. Outra solução seria aplicar uma modulação na seqüência de profundidades d_m , como será visto mais adiante.

Para atingir a frequência máxima da banda de frequência, a largura de cavidade W do difusor de Schroeder deve ser proporcionalmente estreita, o que pode eventualmente implicar em dois inconvenientes: dificuldade e custo de manufatura e aumento da absorção pois, na medida em que a largura se reduz, a viscosidade nas “camadas de escoamento”³² torna-se significativa em relação à largura da cavidade e, conseqüentemente, a absorção aumenta.

Na prática, as larguras usadas são, no mínimo, 2,5cm e, comumente, ao redor de 5cm.

As figuras acima (*Figura 4.10 e Figura 4.11*) evidenciam os lóbulos gerados pela periodicidade das cavidades dos difusores. Se por um lado a energia é distribuída equilibradamente, por outro surge um grande número de nulos entre os lóbulos, não havendo então distribuição contínua da energia em todas as direções. Nesse sentido tem-se obtido bons desempenhos ao tornar o difusor aperiódico, sendo, assim, eliminados os lóbulos decorrentes da periodicidade das cavidades. Vendo dessa forma, o difusor de um único período da *Figura 4.11* teria melhor performance que os difusores periódicos.

³² *viscous boundary layer*

Angus (1995b; 1997; 2000) tem apresentado diversos trabalhos propondo esquemas de modulação entre dois difusores por reflexão com interferência de fase, procurando, desta forma, contornar os problemas de periodicidade. Nesse sentido, a *Figura 4.12* mostra um exemplo de modulação ortogonal entre dois QRD, um com $N=7$ e outro com $N=5$, ambos com mesmo $d_{max} = \lambda_0/2$, arranjando as profundidades numa ordem pseudo-randômica $\{1,0,0,1,0,1\}$, evitando, dessa forma, repetições.

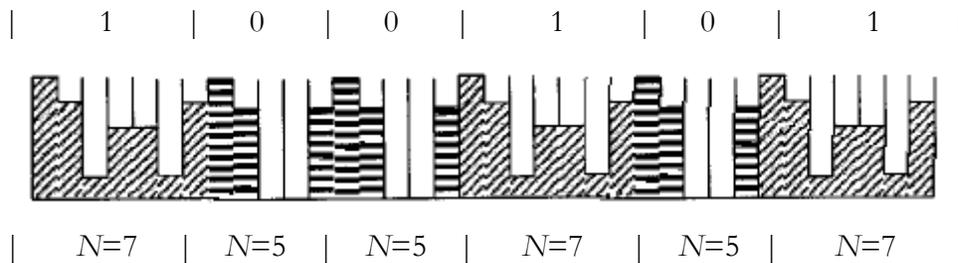


Figura 4.12 - Corte vertical de difusor QRD com modulação entre $N=5$ e $N=7$ e seqüência de modulação $\{1,0,0,1,0,1\}$. Fonte: Cox e D'Antonio (2003, p. 15, fig. 13)

Temos, então, associados ao termo 1 da seqüência de modulação, um período de $N=7$, e ao 0, um período de $N=5$.

Uma seqüência de modulação pode ser gerada por um processo semelhante ao das seqüências de profundidade.

$$\text{Assim como } N=7, \sigma_n = n^2_{\text{mod } 7} = \{0,1,4,2,2,4,1\}$$

uma seqüência de resíduos quadráticos binários seria obtida a partir de uma seqüência $n^2 = \{0,1,4,9,16,25,36\dots\}$ substituindo-se 1, 2 e 4 por 1 e os demais por 0 : $R_n = \{0,1,1,0,1,0,0\dots\}$

Uma outra técnica, chamada *sequence inversion keying* (SIK) (ANGUS, 1995a, p. 6), consiste em modular uma seqüência σ_n de N cavidades a partir de uma seqüência binária de dispersão pseudo-randômica³³.

³³ *binary pseudorandom spreading sequence*

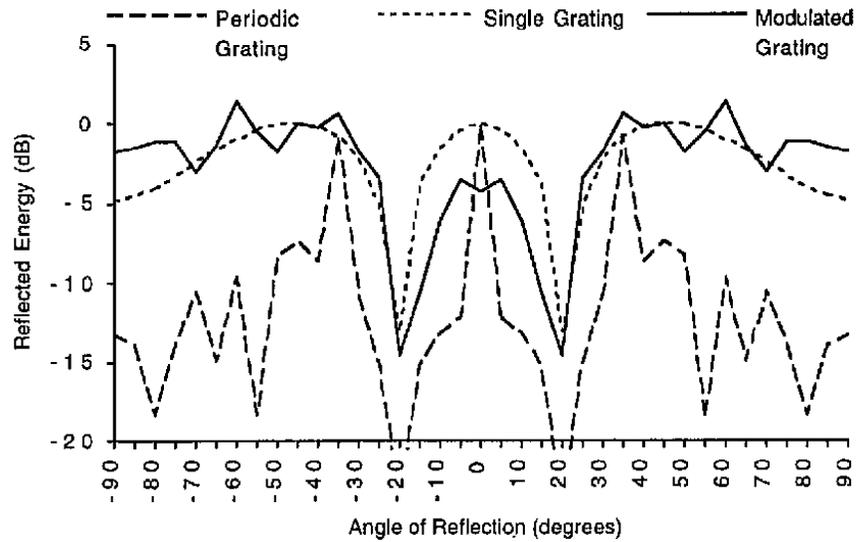


Figura 4.15 - Energia refletida em função ângulo comparando um difusor periódico, um difusor com um único período e um difusor modulado. Fonte: Angus (1995, p. 9, fig. 7)

Um outro exemplo de seqüência de modulação ainda mais eficiente é a seqüência de Barker. Dado um QRD $N=7$ com 5 períodos e a seqüência de Barker para $N=5$ sendo $\{1, -1, 1, 1, 1\}$, aplica-se, a cada ocorrência do elemento $[1]$ na seqüência de Barker, a seqüência original S_n $\{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$ atribuída às profundidades das cavidades, e a cada $[-1]$, a inversão SI_n $\{7, 6, 3, 5, 5, 3, 6\}$. Assim obtêm-se o encadeamento de períodos: S_n, SI_n, S_n, S_n, S_n ilustrado a seguir, na *Figura 4.16*.

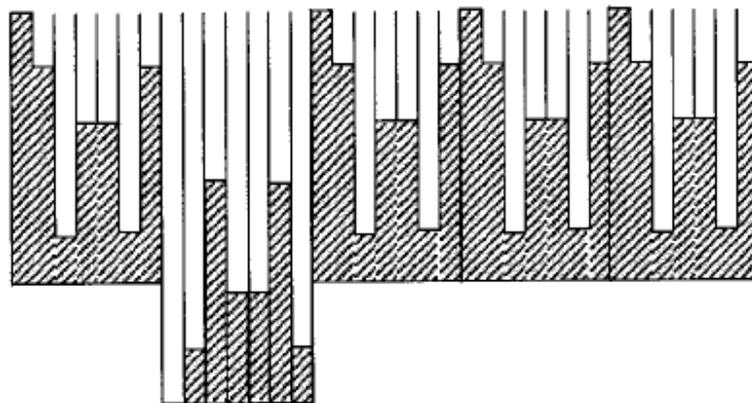


Figura 4.16 - Alinhamento modulado de $N=5$ períodos para a seqüência de Barker e QRD $N=7$. Fonte: Cox e D'Antonio (2003, p. 16, fig. 14)

A seguir, a *Figura 4.17* mostra o espalhamento de um *QRD* $N=7$ periódico, um arranjo a partir da seqüência de Barker e o mesmo *QRD* com um único período.

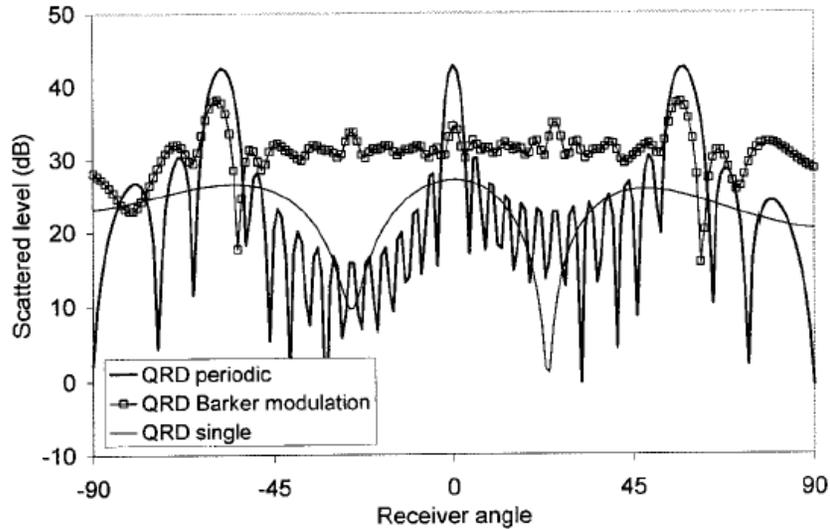


Figura 4.17 - Dispersão polar de um *QRD* com um único período, comparado a um arranjo periódico e uma modulação com seqüência de Barker combinando original e sua inversão.

Fonte: Cox e D'Antonio (2003, p. 17, fig. 15)

Apesar de essas técnicas atenuarem o efeito da periodicidade da seqüência de profundidades, os difusores continuam tendo um desempenho ruim nas freqüências críticas, como veremos logo mais. Isso ocorre num difusor periódico ou por inversão porque neles d_{max}/N é constante. Num difusor com modulação ortogonal, como na *Figura 4.12*, mesclando dois difusores com N distintos num mesmo arranjo, esse efeito é atenuado, pois temos profundidades diferentes e, por conseguinte, $d_{max}/N_1 \neq d_{max}/N_2$, o que eleva a freqüência crítica para:

$$f_c = \frac{N_1 N_2 c}{2d_{max}} \quad \text{Eq. 4-15}$$

apesar de que, isoladamente, nas respectivas freqüências críticas,

$$f_{1c} = \frac{N_1 c}{2d_{\max}} \quad \text{Eq. 4-16}$$

$$f_{2c} = \frac{N_2 c}{2d_{\max}}$$

cada um deles responderá como um segmento de superfície plana, enquanto o outro produz espalhamento.

4.6.1.3 Freqüências críticas nos difusores de Schroeder

Segundo Cox e D'Antonio (2003, p. 9), nos difusores *QR* as freqüências críticas são:

$$f_{c_k} = kNf_0 \mid k = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Eq. 4-17}$$

$$\lambda_{c_k} = \frac{\lambda_0}{kN} \mid k = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Eq. 4-18}$$

A re-irradiação em fase ocorre quando todas as profundidades de cavidades se tornam múltiplas inteiras ímpares de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda³⁴ da freqüência crítica (sendo esta a freqüência da onda incidente ou componente da onda incidente) que é o produto da freqüência operacional mais baixa do difusor (f_0) pelo número primo gerador da seqüência numérica (N), aquele que gerou todas as frações dos fatores multiplicativos que deram origem à série de profundidades. Assim, o produto $N \cdot f_0$ fecha esse 'ciclo numérico gerativo' em seu mínimo múltiplo comum.

Segundo Cox e D'Antonio (2003, p. 9), um meio para evitar a ação de freqüências críticas consiste em colocar a primeira freqüência crítica, a mais baixa delas, acima da freqüência máxima de *design* (f_{\max}), adotando N tal que:

³⁴ É o mesmo que dizer que os $\frac{1}{2}$ comprimentos de onda das freqüências críticas são frações inteiras de todas as profundidades das cavidades ($d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$).

$$N > \frac{c}{2Wf_0} = \frac{\lambda_0}{2W} \quad \text{Eq. 4-19}$$

Angus (2000, p. 143-165), sem nomeá-las assim, mostra efeitos das *freqüências críticas* ao comparar um difusor $N=5, f_0=500\text{Hz}$ com a irradiação de uma superfície plana.

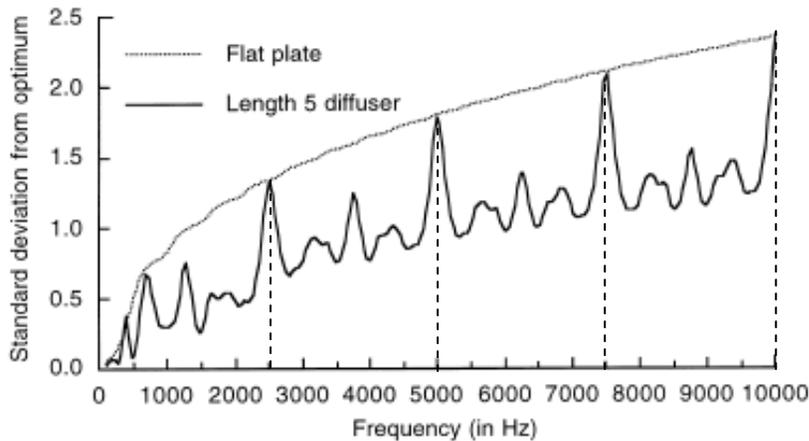


Figura 4.18 – Performance de difusão de um difusor por interferência de fase QR em função da freqüência em comparação com uma superfície plana. Fonte: Angus (op. cit., p. 147, fig. 2)

Vê-se na *Figura 4.18* como o desempenho do difusor QR com $f_0 = 500\text{Hz}$ nas freqüências críticas $f_c = kNf_0 = k2,5\text{KHz}$ (2,5K 5K 7,5K 10KHz) é idêntico ao de uma superfície plana. Observa-se ainda como o gráfico entre os picos caracteriza um padrão de repetição, conforme mostra a figura abaixo.

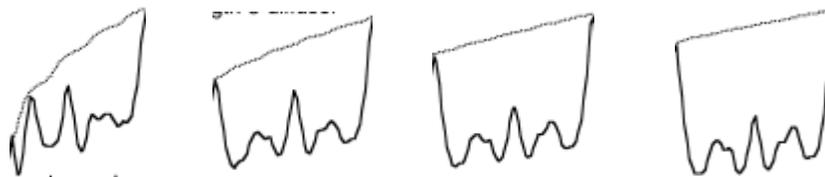


Figura 4.19 – Elementos do gráfico da *Figura 4.18* fragmentados para comparação, evidenciando assim a similaridade e o padrão de repetição.

De acordo com Angus (op. cit.), quando se altera a simetria da repetição das profundidades das cavidades, melhora-se a distribuição de energia do difusor. Constata-se também nos resultados obtidos pelo autor que, em decorrência dos procedimentos empregados, atenuam-se os efeitos das frequências críticas

5. REVISÃO DA LITERATURA III: SUBSÍDIOS EM ACÚSTICA PARA NOVAS IMPLEMENTAÇÕES

5.1 QUALIDADES EXIGIDAS DE UM DIFUSOR

Segundo Takahashi (1997, p. 184) um difusor acústico ideal deve ter as seguintes propriedades:

- Produzir através da reflexão o espalhamento da onda incidente com distribuição direcional de intensidade uniforme;
- A energia acústica incidente deve ser refletida sem nenhuma perda de energia.

Os difusores de Schroeder cumprem bem a primeira propriedade, porém, de acordo com o *item 4.6.1 (Problemas apresentados pelos difusores de Schroeder)*, absorvem energia:

- por causa do grande aumento de velocidade das partículas no interior e justo acima do difusor (*Figura 4.7, p. 163*)
- devido ao fluxo de partículas com velocidade incrementada entre uma cavidade e outra para igualar a pressão na entrada do difusor (*Figura 4.9, p. 165*)
- devido ao alto fluxo de energia na entrada das cavidades, entre aquelas que estão em ressonância e as que não estão em ressonância; e à absorção por ressonância de $\frac{1}{4}$ de onda, sobretudo se as cavidades são estreitas (*p. 164*);

Numa pequena sala, onde as reflexões ocorrem muito rapidamente devido às pequenas dimensões do local, uma absorção de 5dB (*Cf. Item 4.6.1.1, p. 164*) a 10 dB (*4.6.1.1, p. 165*) produz um caimento demasiadamente acentuado, interferindo, assim, num parâmetro

fundamental para a performance musical, o *preenchimento do som* (BERANEK, 1962; 1996; 2004) (MALAFAIA, 2000) (MANNIS, 2002).

As propostas apresentadas no *item 4.6 (Crítica aos difusores de Schroeder)* procuram certamente obter melhorias de performance. Porém, investiguemos outros tipos de difusores nos quais não ocorra absorção de energia e que possam produzir um espalhamento de energia satisfatório.

5.2 EXEMPLO DE DIFUSOR COM MELHOR DESEMPENHO QUE OS DE SCHROEDER

Comparando um difusor unidimensional *QRD*, $N=13$, $N.W=1\text{m}$, $d_{max}=30\text{cm}$ ³⁵, ou seja, $f_0 \sim 527\text{Hz}$ e $f_{max} \sim 2228\text{Hz}$, $W=7,7\text{cm}$ com um difusor composto por arcos cilíndricos com período de 1m e profundidade máxima de 20cm (*Figura 5.1*) Fujiwara (1995a, p. 212-213) obteve resultados indicando que o difusor com arcos cilíndricos distribui a energia de maneira mais uniforme que o *QRD* em todas as frequências e, particularmente em 1KHz e 4KHz, a distribuição do difusor com arcos é muito melhor que no *QRD*.

Masuda e Fujiwara (1995) comparando duas superfícies periódicas, ambas com período de 1m e altura máxima de 20cm, uma porém com perfil cilíndrico e outra triangular, obtém melhores resultados com o perfil cilíndrico do que com o triangular, considerando ambas tanto finitas quanto infinitas, notadamente nos lóbulos de difusão no mesmo quadrante da onda incidente, onde o difusor triangular apresenta atenuação na distribuição de energia.

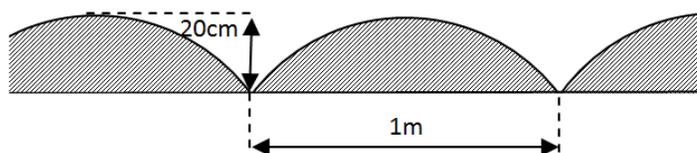


Figura 5.1 – Difusor de arcos cilíndricos. Fonte: Fujiwara (1995a, p. 212)

³⁵ Com esses dados, conforme D'Antonio e Konnert (1984a) e como visto no *item 4.1 (p.158)*, para obter um difusor com bom desempenho seria necessário $N=17$ ($N=2.m_{max}.f_{max}/f_0$, sendo $m_{max}=2$)

Conforme os resultados obtidos nos estudos acima, conclui-se que os difusores com perfil cilíndrico permitem de fato uma melhor qualidade de difusão.

5.3 DESENVOLVIMENTOS RECENTES E APLICAÇÕES ATUAIS DE DIFUSORES NO TRATAMENTO ACÚSTICO DE SALAS PARA MÚSICA

Esta seção é essencialmente baseada em Cox e D'Antonio (2004)³⁶, segundo os quais as aplicações tem se dado em controle de eco em auditórios, redução de coloração em pequenas salas, design de cabines de controle de gravação, controle de modos normais em câmaras de reverberação, melhoria da sensação de espacialidade (*spaciousness*) em auditórios, redução de efeitos das primeiras reflexões em grandes salas com teto proporcionalmente baixo, abrangência uniforme de rebatedores suspensos sobre o palco e a platéia, concepção de rebatedores traseiros e laterais para palco, redução de efeitos de focalização devido à superfícies côncavas, e mesmo em barreiras sonoras. As soluções propostas não são unânimes, mas algumas têm um consenso geral, como por exemplo, a utilização de difusores ao fundo das salas como o melhor meio para evitar o eco percebido à dianteira da platéia e no palco, ao invés de empregar material absorvente.

Para evitar eco em auditórios constata-se o emprego de difusores de resíduo quadrático (QRD), no caso da parede ao fundo do *Carnegie Hall*, e difusores curvos otimizados (OptiCurve™), nas paredes laterais do *Hummingbird Centre*, em Toronto, auditório com planta em forma de leque.

Os difusores OptiCurve™ baseados na otimização de superfícies pelo aplicativo CHAOS através do Shape Optimizer™ foram concebidos pela RPG®. Uma superfície é inicialmente proposta e realizada matematicamente. Em seguida são calculados resultados em pressão sonora espalhando sinal de várias fontes, num campo acústico constituído por malhas elementares compreendendo a localização de todos os ouvintes ao redor. O programa avalia centenas e milhares de superfícies variadas até obter o melhor resultado.

³⁶ Capítulo 2: *Applications and basic principles of diffusers*. p. 23-57.



Figura 5.2 – Difusores de Schroeder (QRD) na parede ao fundo do Carnegie hall.
Fonte: Cox e D'Antonio (2004, p. 24, fig. 2.1)

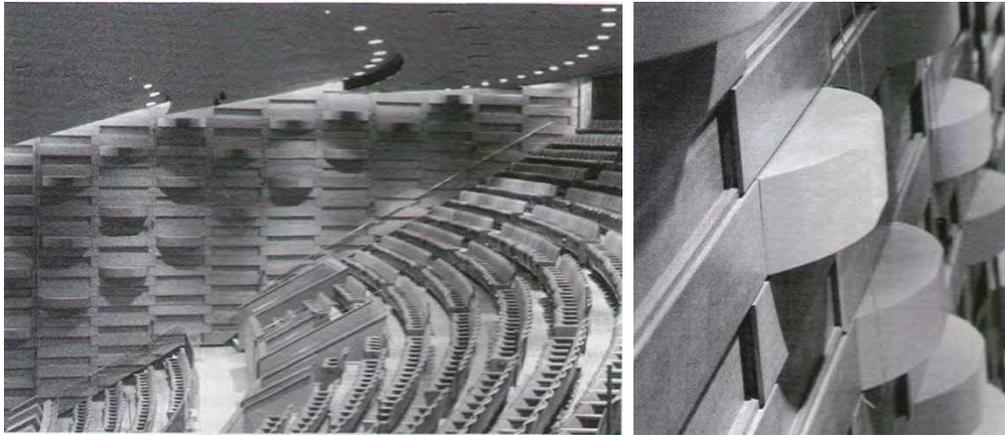


Figura 5.3 – Difusores curvos otimizados (OptiCurve™) no Hummingbird Centre, Toronto.
Fonte: Cox e D'Antonio (2004, p. 25, fig. 2.2)



Figura 5.4 – Exemplo de difusor OptiCurve™.
Fonte: RPG Diffusor Systems
<http://www.rpginc.com/products/opticurve/index.htm>

Para reduzir a coloração em pequenas salas, difusores de Schroeder têm sido empregados no interior de cabines de controle de gravação, portanto, salas de reprodução e escuta, incluindo designs LEDE®³⁷ e RFZ™³⁸, que prevêm, respectivamente, zonas absorvente, ao redor das fontes (*dead end*), e difusa, ao lado oposto (*live end*), e zona central livre de reflexões (*reflection free zone*). Os casos de cabines para escuta de dispositivos de reprodução multicanal³⁹, por exemplo, em padrão 5.1, a aplicação desses dois *designs* torna-se inviável pela distribuição de fontes sonoras ao redor do ouvinte, têm suscitado o emprego de *hybrid surfaces* (superfícies híbridas) parcialmente difusoras e parcialmente absorventes⁴⁰.

³⁷ *Live end dead end*. DAVID, D. AND DAVIS, C. The LEDE concept for the control of acoustic and psychoacoustic parameters in record control rooms, **J. Audio Eng. Soc.**, 28, p. 585-595 (1980).

³⁸ *Reflection free zone*. D'ANTONIO, P.; KONNERT, J. H. **The RFZ/RPG approach to control room monitoring**. Proc. Audio Eng. Soc., preprint 2157 (I-6) (October 1984)

³⁹ Surround Sound. http://www.dolby.com/assets/pdf/tech_library/4_Multichannel_Music_Mixing.pdf

⁴⁰ Binary amplitude diffisorber - BAD™ panel. (COX; D'ANTONIO, 2004, p.313-334)

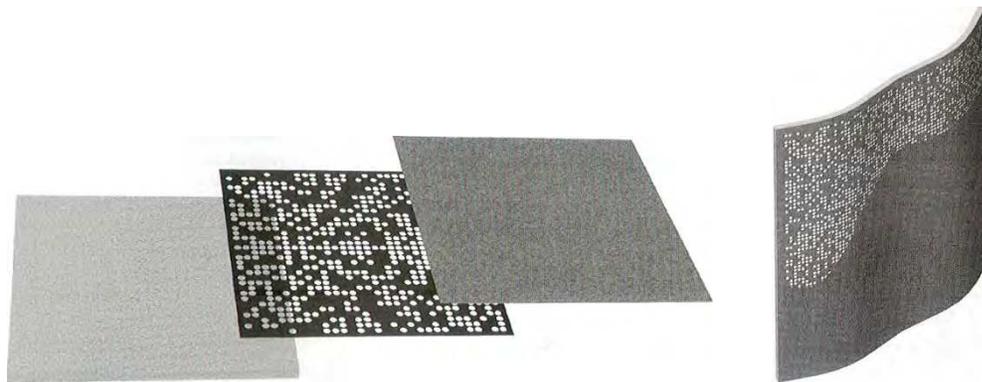
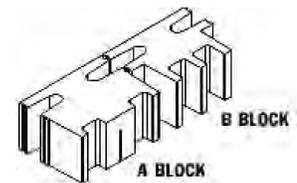
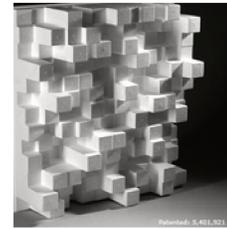


Figura 5.5 – Elementos de uma superfície híbrida fabric: material absorvente, máscara e tecido e uma superfície híbrida curva concluída DigiWave™. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 314-315, fig. 11.1 e 11.4)



Figura 5.6 – Superfície híbrida plana (BAD panel) em um home theater (painéis quadrados à esquerda dos ouvintes e à direita da ilustração).

Figura 5.7 – Sala de prática musical tratada com difusores de Schroeder bi-dimensionais (teto) e unidimensionais (parede ao fundo). Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 40, fig. 2.14) e site RPG Diffusor Systems <http://www.rpginc.com/>



No caso de salas de prática musical, sobretudo salas de estudo com dimensões reduzidas, a interferência dos modos normais pode ser audível. O emprego de difusores de Schroeder bi-dimensionais no teto (Skyline®), melhoram a sensação de espacialidade, enquanto que um outro difusor de Schroeder unidimensional (DiffusorBlox®) é instalado com blocos de concreto modulares em uma das paredes, atuando ao mesmo tempo como absorvedor de baixas frequências e difusor.

Em salas com pé direito baixo, as reflexões podem chegar do teto ao ouvinte próximas ao som direto o ocasionar a coloração de um *comb filter*. A instalação de difusores no teto pode minimizar esse efeito indesejado, como mostrado na *Figura 5.8*.



Figura 5.8 – *Cinerama Theatre, Seattle, WA*, com difusores OptiCurve™ no teto, minimizando colorações produzidas pelas primeiras reflexões. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p.46, fig. 2.21) Foto: University of Salford.

Para reforçar e misturar os sons produzidos pelos músicos tanto para se escutarem entre si quanto para uma projeção mais eficiente à platéia usa-se costumeiramente rebatedores de palco, também conhecidos por *acustical shell* (concha acústica), dispostos em torno da formação musical. Conforme Marshall *et al.* (1978, apud COX; D’ANTONIO, 2004, p. 49) o conforto dos intérpretes pode ser melhorado dando-lhes uma sensação de conjunto quando as primeiras reflexões:

- são curtas em relação ao som direto,
- a resposta em frequência abrange as bandas de 500 a 2KHz contendo transitórios dos sons e, portanto, elementos de articulação e expressividade,
- produzem uma mistura sonora homogênea contendo partes de todas as fontes em todas as posições de escuta

Esses fatores são atendidos ao acrescentar difusores como elementos desses rebatedores, como o VAMPS® da RPG® mostrado na *Figura 5.9*.



Figura 5.9 – Quarteto de cordas Cavani em execução diante de rebatedores VAMPS® no *Cleveland Institute of Music*.
Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 50, fig. 2.26)

Igualmente para formações orquestrais onde é importante que o *design* do palco contribua para obter um bom balanço do conjunto apesar dos diferentes instrumentos com potência sonora variável, difusores são instalados em torno da caixa cênica, como é o caso do Corning Glass Centre, em Nova Iorque, mostrado na *Figura 5.10*. De acordo com Cox e D’Antonio (2004, p. 52) essa realização deu-se como um experimento para produzir uma melhor mistura das cordas, situadas mais adiante do palco, com as madeiras, suavizar os metais, intensificar o preenchimento do som e o calor (*warmth*) das cordas e controlar as reflexões especulares, melhorando a sensação de conjunto e a performance rítmica dos músicos.



Figura 5.10 – Difusores no palco do *Corning Glass Centre*, em Nova Iorque. Acima de cada elemento, após os difusores, pode-se observar uma aba a 45°. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 52, fig. 2.28)
Foto © Paul Warchol Photography, www.warcholphotography.com

Difusores também são empregados para reduzir efeitos de focalização produzidos por superfícies côncavas, como no Edwina Palmer Hall, em Hitchin, Inglaterra, mostrado na *Figura 5.11*, onde sobre a parede curva foram instalados difusores de curvas otimizadas.



Figura 5.11 – Difusores de curvas otimizadas (OptiCurve™) no Edwina Palmer Hall. Fonte: Cox e D’Antonio (2004, p. 54, fig. 2.30) Foto: Arup Acoustics.

6. REVISÃO DA LITERATURA IV : TÉCNICA DE COMPOSIÇÃO SERIAL

6.1 ALGUNS ELEMENTOS DA COMPOSIÇÃO COM DOZE SONS⁴¹

Schoenberg (1950, Trad. Ital. 1960, p. 107-147) formulou seu pensamento sobre a composição com doze sons em 1950, muito depois de ter escrito diversas obras com esse método. Basicamente, consiste no uso constante e exclusivo de uma série de 12 notas diferentes, na qual nenhuma delas é repetida antes de completar o total cromático. Por questões óbvias essa série não deve ser redundante, nem banal, como por exemplo uma escala cromática na *Figura 6.1* (p. 187) na qual o intervalo entre as notas da série é constante e igual a 1 (um)⁴². Ao contrário, a série deve conter alturas que ao se sucederem formem entre si intervalos variados.

Comparando a série da *Figura 6.2*, com a escala cromática da *Figura 6.1* pode-se observar como a diversificação de intervalos enriquece a série e, conseqüentemente, seu potencial musical. Nesse exemplo observamos intervalos de 2^am (segunda menor), 2^a (segunda maior), 5^adim (quinta diminuída), e 6^a (sexta maior), ascendentes (↑) e descendentes (↓), que formam uma seqüência. Nessa seqüência, alguns termos aparecem tanto na forma ascendente quanto descendente (2^a↓ e 2^a↑; 5^adim↓ e 5^adim↑), e outros permanecem fixos (2^am↑ e 6^a↓).

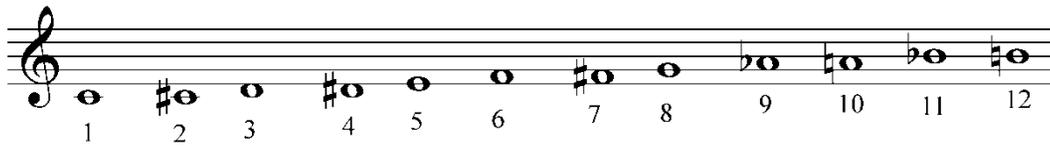
Para os próximos exemplos será considerada a seguinte relação entre notas musicais e números:

C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	Ab	A	Bb	B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	Ab	A	Bb	B	C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

Tabela 6-1 – Relação estabelecida entre notas musicais e números neste trabalho.

⁴¹ Schoenberg denominou esse método de composição como Composição com Doze Sons, Contudo, alertamos aqui que os doze sons se referem especificamente às doze alturas da escala cromática.

⁴² intervalo de segunda menor



alturas da série											
C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb	B
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑	2ªm↑
intervalos entre as notas da série											

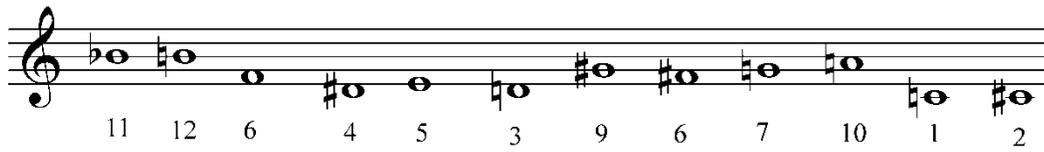
Figura 6.1 – 11 notas do total cromático (*do* a *si* = 1 a 12). Intervalos constantes e iguais a 1 semitom (segunda menor)

A *Figura 6.3* ilustra uma variação ainda mais acentuada dos intervalos em dois segmentos [3, -2, -5, -1, 7, 4] e [4, -9, 2, 5, 1, -7]. O intervalo de 3ªM (terça maior) [4] é comum a ambos. Os intervalos de 3ªm (terça menor) [3] e de 6ªM (sexta maior) [9] são equivalentes (inversão). Chamamos atenção para o fato particular de que o sentido ascendente-descendente dos intervalos se encontra também invertido de um segmento para outro.

Definiremos *inversão*, num grupo de números inteiros e seqüenciais de âmbito de 1 a $N-1$, ou seja, o conjunto de números definidos por $S_i = x \bmod N$ menos o elemento nulo, o zero (0), como sendo uma operação tal que, dado x , temos x_{inv} dado por:

$$x_{inv} = N - x$$

Por exemplo: dado o grupo de inteiros de 1 a 7 a seqüência (2, 5, 4) invertida seria (7-2, 7-5, 7-4) = (5, 2, 3).



alturas da série											
Bb	B	F	D#	E	D	G#	F#	G	A	C	C#
11	12	6	4	5	3	9	6	7	10	1	2
1	-6	-2	1	-2	6	-2	1	2	-9	1	
2ªm↑	5ªdim↓	2ªM↓	2ªm↑	2ªM↓	5ªdim↑	2ªM↓	2ªm↑	2ªM↑	6ªM↓	2ªm↑	
intervalos entre as notas da série											

Figura 6.2 – Série com vários intervalos.

Por *retrogradação* entende-se a repetição de uma seqüência na ordem contrária à qual foi exposta. Por exemplo: A retrogradação de (3, 5, 2, 11, 8) = (8, 11, 2, 5, 3)

O gráfico abaixo da *Figura 6.3* evidencia a característica de *simetria axial* própria à *inversão* das alturas da série musical.

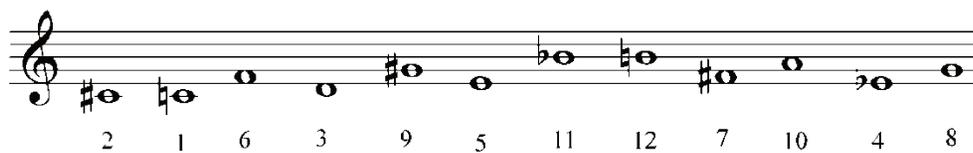
A seqüência do 1º ao 6º termos é repetida a partir do 7º até o 12º, porém invertida⁴³, ou seja:

$$\begin{aligned} \sigma_7 &= 13 - \sigma_1 \\ \sigma_8 &= 13 - \sigma_2 \\ &\dots \\ \sigma_{i+6} &= 13 - \sigma_i \end{aligned}$$

Por ser invertida, a segunda metade do segmento tem os intervalos em sentidos opostos:

Primeiro segmento	Segundo segmento
(-1, 5, -3, 6, -4, 6)	(1, -5, 3, -6, 4, 6)
(2ªm↓, 4ª↑, 3ªm↓, 4ªaum↑, 3ªM↓, 5ªdim↑)	(2ªm↑, 4ª↓, 3ªm↑, 5ªdim↓, 3ªM↑, 4ªaum↓)

⁴³ *Simetria axial* em relação à freqüência.



alturas da série											
C#	C	F	D	G#	E	Bb	B	F#	A	Eb	G
2	1	6	3	9	5	11	12	7	10	4	8
-1	5	-3	6	-4	6	1	-5	3	-6	4	
2ªm↓	4ª↑	3ªm↓	4ªaum↑	3ªM↓	5ªdim↑	2ªm↑	4ª↓	3ªm↑	5ªdim↓	3ªM↑	
intervalos entre as notas da série											

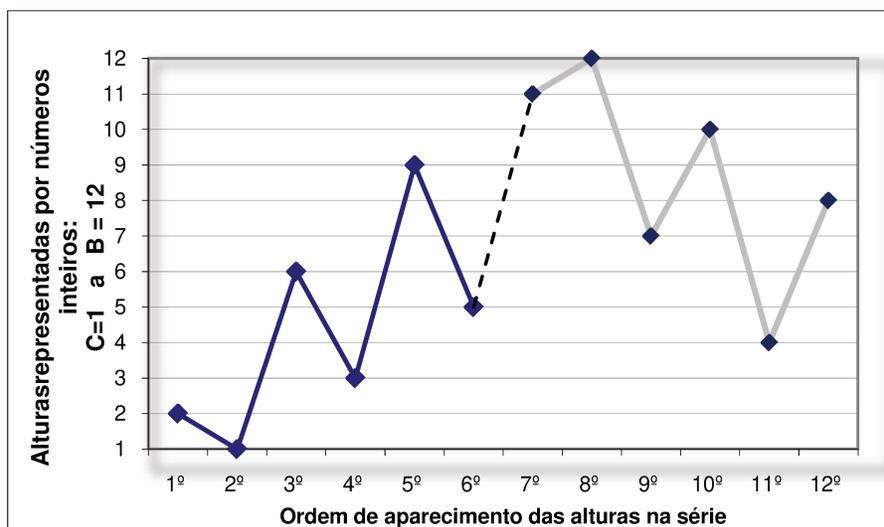
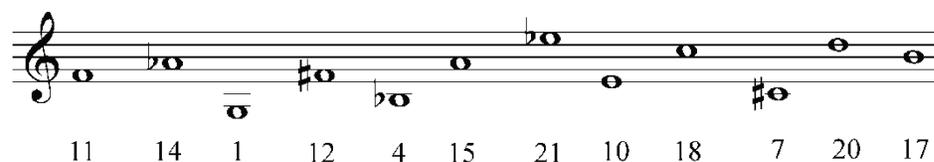


Figura 6.3 - Série com *simetria axial* no domínio das alturas musicais de tipo *inversão*. O eixo vertical, de 1 a 12, representa as notas musicais, indicadas no eixo das abscissas na ordem em que aparecem na série exposta na pauta musical acima desta ilustração: 1º (C#=2), 2º (C=1), 3º (F=6), 4º (D=3), 5º (G#=9), 6º (E=5), 7º (Bb=11), 8º (B=12), 9º (F#=7), 10º (A=10), 11º (Eb=4) e 12º (G=8).

Até este ponto, o âmbito de alturas da série esteve compreendido no interior de uma oitava [0 a 11]. Ampliando esse âmbito, temos, no exemplo a seguir, a série do segundo movimento da *Sinfonia, op.21* de Anton Webern. Observe como o segundo segmento é a

retrogradação⁴⁴ do primeiro, porém *transposta*⁴⁵ de sete semitons. Isso confere à série propriedades influentes na estruturação e na unidade da composição.



alturas da série											
F	Ab	G	F#	Bb	A	Eb	E	C	C#	D	B
11	14	1	12	4	15	21	10	18	7	20	17
3	-13	11	-8	11	6	-11	7	-11	13	-3	
3ªm↑	9ªm↓	7ªM↑	6ªM↓	7ªM↑	5ªdim↑	7ªM↓	6ªm↑	7ªM↓	9ªm↑	3ªm↓	
intervalos entre as notas da série											

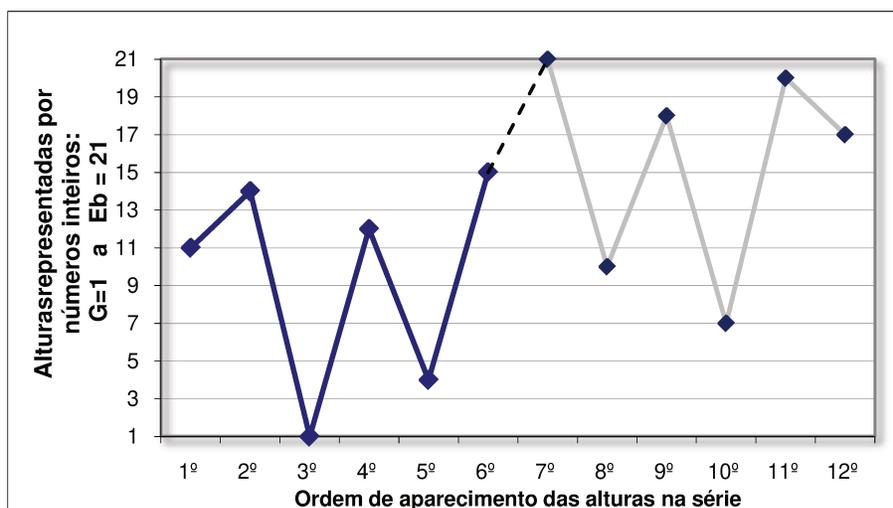


Figura 6.4 – Série da *Sinfonia op.21* de Webern: *simetrias* no domínio das alturas musicais: *axial* (retrogradação) e *translacional* (transposição) da retrogradação, 6 semitons acima, ou seja, de A (lá) para Eb (mi bemol). As alturas da série estão indicadas no eixo das abscissas na ordem em que aparecem na série exposta na pauta musical desta ilustração: 1º (F=11), 2º (Ab=14), 3º (G=1), 4º (F#=12), 5º (Bb=4), 6º (A=15), 7º (Eb=21), 8º (E=10), 9º (C=18), 10º (C#=7), 11º (D=20) e 12º (B=17). Observe que a nota mais grave G (Sol) leva, neste exemplo, o número 1 (um).

⁴⁴ *Simetria axial* em relação ao tempo

⁴⁵ *Simetria translacional* no domínio da frequência.

O pivô *A-Eb* articula dois segmentos de série simétricos em relação ao eixo da ordem dos termos, constituindo uma retrogradação (seqüência de termos 1 a 6 é idêntica à de termos 12 a 7, em sentido contrário) transposta de um trítono (4ª aumentada=6semitons), ou seja, os termos de 1 a 6 adicionados de uma constante $k=6$ semitons:

$$S_7 = S_6 + k$$

$$S_8 = S_5 + k$$

...

$$S_{12} = S_1 + k$$

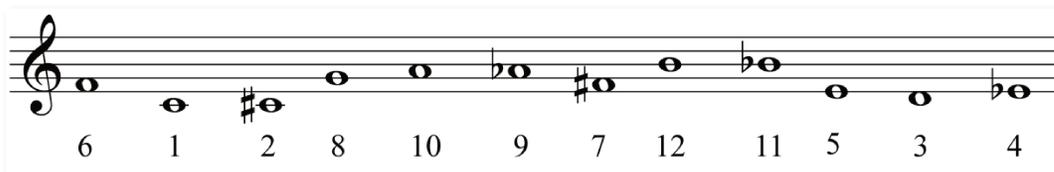
6.1.1 Séries derivadas da série original

Da série *original* [O] derivam-se automaticamente três outras séries: sua *inversão* [I], seu *retrógrado* [R] e o *retrógrado da inversão* [RI], todas compreendidas no quadro da *Figura 6.5*.

No quadro geral de séries, as linhas da esquerda para a direita contém todas as transposições da séries na forma *original* [O_i]; da direita para a esquerda os *retrógrados* [R_i]; as colunas de cima para baixo contém as *inversões* [I_i]; e de baixo para cima os *retrógrados das inversões* [RI_i].

As séries foram todas adequadas a um único âmbito: *C-B* [1 a 12].

C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb	B
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12



		ORIGINAL →												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
INVERSÃO ↓	1	6	1	2	8	10	9	7	12	11	5	3	4	
	2	11	6	7	1	3	2	12	5	4	10	8	9	
	3	10	5	6	12	2	1	11	4	3	9	7	8	
	4	4	11	12	6	8	7	5	10	9	3	1	2	
	5	2	9	10	4	6	5	3	8	7	1	11	12	
	6	3	10	11	5	7	6	4	9	8	2	12	1	
	7	5	12	1	7	9	8	6	11	10	4	2	3	
	8	12	7	8	2	4	3	1	6	5	11	9	10	
	9	1	8	9	3	5	4	2	7	6	12	10	11	
	10	7	2	3	9	11	10	8	1	12	6	4	5	
	11	9	4	5	11	1	12	10	3	2	8	6	7	
	12	8	3	4	10	12	11	9	2	1	7	5	6	
		← RETROGRADO												
														↑ RETROGRADO DA INVERSÃO

Figura 6.5 – Quadro com a série *original*, séries derivadas e todas as transposições.

A série *original* $[O_1]$ está na primeira linha: [6, 1, 2, 8, 10, 9, 7, 12, 11, 5, 3, 4]

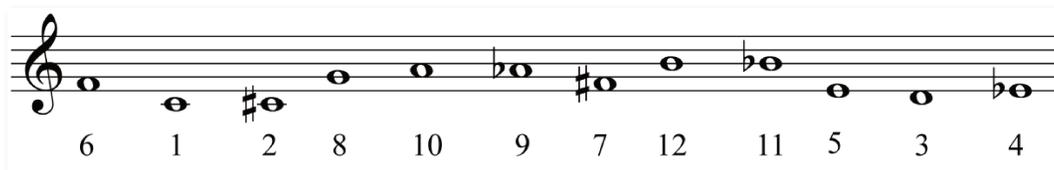


Figura 6.6 – Série *original* da Figura 6.5.

Seu *retrógrado* $[R_1]$ está na mesma linha, mas deve ser lido ao contrário (Figura 6.7):

[4, 3, 5, 11, 12, 7, 9, 10, 8, 2, 1, 6]

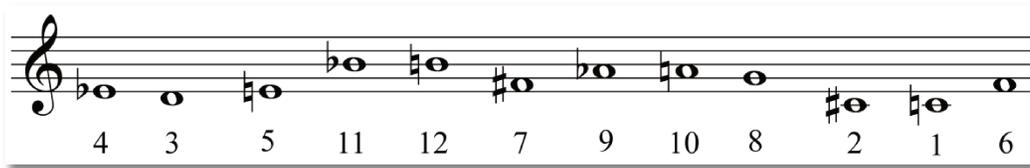


Figura 6.7 – Série retrógrada (*simetria axial* no domínio do tempo) à série original da Figura 6.5.

Sua inversão $[I_1]$, na primeira coluna, de cima para baixo:

[6, 11, 10, 4, 2, 3, 5, 12, 1, 7, 9, 8]

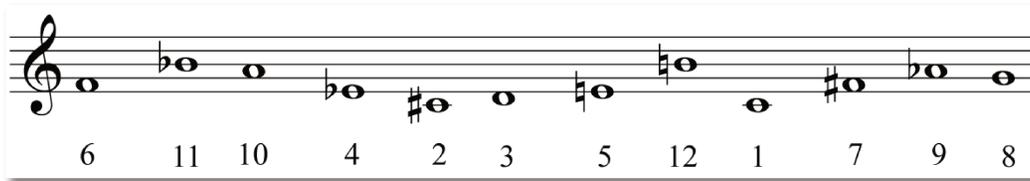


Figura 6.8 – Inversão (*simetria axial* no domínio da frequência) da série original da Figura 6.5.

O retrógrado da inversão $[RI_1]$, na primeira coluna, ao contrário:

[8, 9, 7, 1, 12, 5, 3, 2, 4, 10, 11, 6]

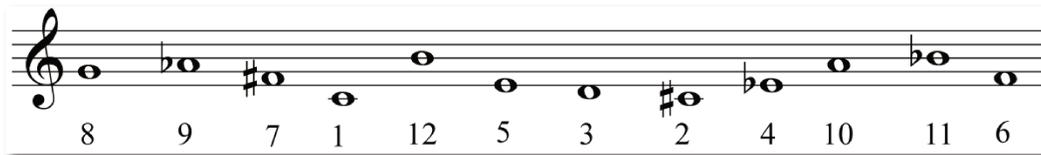


Figura 6.9 – Retrógrado da inversão (*simetria rotacional*) da série original da Figura 6.5.

A primeira transposição da série original $[O_2]$ está na segunda linha:

[11, 6, 7, 1, 3, 2, 12, 5, 4, 10, 8, 9]

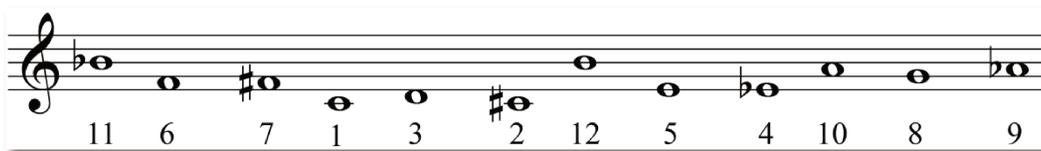


Figura 6.10 – Primeira transposição (*simetria translacional* no domínio da frequência) da série original da Figura 6.5.

Segundo Schoenberg, o emprego dessas formas espelhadas (no tempo ou no domínio da frequência) corresponde ao princípio da percepção absoluta e unitária do espaço musical. Para Webern (1980) elas proporcionam o maior número possível de relações para a série, conferindo-

lhe alto grau de coerência e inteligibilidade. Em outras palavras, fazer o máximo com o mínimo, chegando ao mesmo tempo ao maior grau de variação e de unidade.

S A T O R
A R E P O
T E N E T
O P E R A
R O T A S

Figura 6.11 – Ditado latino: “O semeador Arepo mantém a obra num movimento circular.”
(WEBERN, 1980, p. 145)

6.2 SERIALISMO INTEGRAL

Apesar de J. S. Bach ter concebido obras com a quase totalidade das alturas cromáticas e igualmente ter tratado células e motivos usando diversos tipos de simetrias encontradas nas obras seriais, o pensamento serial só foi captado, compreendido e formulado por Schoenberg no início do Séc.XX. A formalização de Schoenberg abraça vários séculos de tradição musical nos quais os compositores usavam intuitivamente ou informalmente procedimentos hoje associados à escrita serial. A *técnica de composição com 12 sons* de Schoenberg abrange exclusivamente as alturas, ou seja, as notas musicais. Apesar dele mesmo ter definido em seu tratado de harmonia a *Klangfarbenmelodie* (melodia de timbres) e de Anton Webern ter tratado os timbres de forma rigorosa e similar ao tratamento serial, por exemplo em sua orquestração da *Oferenda musical* de J. S. Bach, não ocorreu nenhuma formulação teórica ou uma sistemática composicional claramente assumida de tratamento serial fora do campo das alturas. De forma especulativa, Olivier Messiaen, cuja escrita se caracteriza, entre outros, pela construção de modos musicais e formulações rítmicas, tendo ainda a particularidade de uma percepção sinestésica de cores ao ouvir sons, elabora modos não somente de alturas, mas de intensidades e durações em sua obra *Modes de valeur et d'intensité*, de 1949. Ao conhecê-la, em 1951, durante os cursos de verão

de Darmstadt (Alemanha), Karlheinz Stockhausen e Pierre Boulez, compositores então fortemente influenciados pela escrita de Webern e desenvolvendo essa técnica denominada então de *serial*, encontram nela o caminho para a evolução e os desdobramentos de suas escritas, elaborando, então, *séries* aplicadas também a durações, intensidades e timbres, formulando o que acabou levando o nome de *serialismo integral*, inaugurado pelas obras *Kreuzspiel* (1951) para oboé, clarinete-baixo, piano e quatro percussionistas de Stockhausen e *Structures* (1952-3) para dois pianos de Boulez.

O que se destaca no *serialismo integral* de interesse para esta pesquisa é que, ampliando ainda mais a generalização, um seqüenciamento de termos, como os que dão origem aos difusores, pode igualmente ser atribuído a diversos parâmetros aplicando suas modulações, ricas em variação, a distintas dimensões e propriedades de um produto em elaboração.

7. CAMPO DE ESTUDO

7.1 PRINCIPAIS PROBLEMAS ACÚSTICOS EM PEQUENAS SALAS PARA PERFORMANCE MUSICAL

Uma sala para performance musical deve proporcionar a veiculação dos sons gerados pela execução musical prioritariamente aos demais sons que a ela não estejam vinculados, sobretudo os que estiverem interferindo ou alterando a percepção da informação principal, ou seja, o conteúdo musical.

Isso envolve o isolamento acústico da sala em relação ao meio externo (ruídos de rua ou de circulação nas dependências ao lado) quanto o tratamento acústico interno, com o devido cuidado para que internamente não sejam gerados ruídos (piso, paredes, objetos).

Como o escopo deste trabalho está no tratamento acústico de superfícies internas não nos aprofundaremos em questões referentes ao isolamento acústico (incidência de ruídos externos na sala e vazamento no meio externo dos sons produzidos na sala) ou ao funcionamento de equipamentos, manipulação de objetos ou deslocamento de pessoas.

Um dos problemas das salas de performance musical é seu nível de ruído de fundo, que, evidentemente, deve ser o menor possível.

Outro problema freqüente em pequenas salas é o de renovação de ar. Devido ao pequeno volume, as pequenas salas necessitam de boa ventilação. Com todas as paredes, portas e janelas isoladas é preciso assegurar uma renovação de ar suficiente às pessoas que ali estiverem, evitando contudo:

- ruídos de ventilação dentro da sala; que os dutos de ar conduzam ruídos do ambiente externo (ruídos de rua);
- ruídos produzidos pelo próprio equipamento de ventilação e ar condicionado,
- comunicação inconveniente, através de dutos comuns, entre salas que devam estar acusticamente isoladas (por exemplo, cabine de gravação e sala de performance).

Nas pequenas salas, devido a dimensões reduzidas, as regiões nas quais o som se comporta como onda e transitoriamente entre onda e raio, dominadas por *modos normais*, difusão e difração (EVEREST, 1988b, p.43) (Cf.3.2.12 *Quatro regiões*) situam-se em faixas de frequência mais elevadas que numa grande sala e podem adentrar a faixa audível do espectro (LONG, 2006, p.745).

Nas pequenas salas a trajetória média das ondas sonoras é mais curta que numa grande sala, e, conseqüentemente, o número de reflexões por segundo nas partições é mais elevado. Isso significa que a resposta de uma pequena sala é mais rápida e as ondas sonoras ‘sobrevivem’ a mais reflexões que numa grande sala, pois percorrem distâncias menores entre cada reflexão tendo, portanto, menos perdas, sobretudo a partir das frequências médio-agudas onde há absorção do ar.

Uma pequena sala teria, assim, uma “constante de tempo” menor que uma grande sala. As ondas estacionárias se estabelecem mais rapidamente e permanecem por mais tempo além de estarem na faixa audível do espectro. Essas condições são favoráveis a que qualquer problema relacionado a reflexões (reflexões indesejáveis, *eco*, *flutter echo*, *comb filters*) seja mais perceptível.

Por ter volume reduzido, uma pequena sala possui *tempo de reverberação* menor (Cf. 3.2.9 *Reverberação* p. 76). Conseqüentemente um dos parâmetros mais importantes para a execução musical o *preenchimento do som* (Cf. 3.3.1 *Preenchimento do som (Fullness of tone)* p. 108), diretamente relacionado ao *tempo de reverberação* é mais limitado.

Sendo as condições das pequenas salas favoráveis à ocorrência de problemas relacionados a reflexões, como visto acima, as implementações para potencializar a reverberação melhor podem facilmente causar distorções prejudicando o equilíbrio sonoro. A qualidade do som reverberante (Cf. 3.2.9.2 *Tempo de reverberação por bandas de frequência*, p. 82) é um ponto frágil nas pequenas salas.

7.2 PRINCIPAIS ELEMENTOS A SEREM CONSIDERADOS NUM PROJETO DE PEQUENAS SALAS PARA PERFORMANCE MUSICAL

Para uma performance musical adequada, o nível de ruído de fundo da sala deve ser o menor possível. Para tanto deve possuir um isolamento tal que o mais forte dos ruídos externos chegue com intensidade abaixo do nível de ruído de fundo adotado para o local.

Para uma performance musical adequada, o nível de ruído de fundo deve ser de, no máximo, 30 a 40dB(A) ou estar entre níveis de pressão sonora correspondentes às curvas 25 e 30NC de avaliação de ruído (ABNT, NBR 10153).

Como o âmbito da dinâmica musical, do *ppp* ao *fff*, é de aproximadamente 70dB, completando o âmbito audível desde o nível inicial dado pelo ruído de fundo até o limite da região confortável, pouco antes do limiar de dor (LEIPP, 1984), uma sala para performance musical deve admitir o mais forte dos ruídos externos (130 dB(A)) atenuado abaixo da faixa dinâmica tolerada, no caso da norma NBR 10152, de 40dB(A), ou seja, um isolamento com atenuação de pelo menos 70dB.

É necessário cuidado para que não haja produção de ruído no interior da sala (cadeiras rangendo, pisos que estalam ao andar, placas que vibram em algumas frequências). Nesse sentido, o dispositivo de ventilação e ar condicionado deve ser silencioso (isolamento de máquina; pressão e velocidade com dimensionamento adequado) e ter estrutura de dutos apropriada para que não haja vazamento entre locais que devam estar acusticamente isolados (ramais independentes; emprego de atenuadores).

Uma sala adequada à música soa de forma satisfatória à execução e à apreciação musical. A reverberação é um dos parâmetros essenciais à escuta e à performance musicais (Cf. *item 3.2.9, p. 76; item 3.3.1, p. 108*). Nesse sentido, ao procurar melhorar as condições ambientais para os músicos e para a audiência, assegurando uma mistura equilibrada e homogênea dos sons produzidos em diversos pontos e obtendo um melhor preenchimento do som, portanto, uma maior reverberação, no caso das pequenas salas, propícias à problemas relacionados a reflexões, é necessário cuidado, sobretudo com as superfícies das partições, tanto em seus materiais como em suas configurações geométricas, por qualquer detalhe poder se tornar facilmente audível (*flutter echo, comb filters*, focalizações, ondas estacionárias). A qualidade do som reverberante é importante numa pequena sala, mesmo que o *tempo de reverberação* seja pequeno (Cf. *3.2.9.2 Tempo de reverberação*

por bandas de frequência, p. 82). A reverberação é que proporciona o *preenchimento do som*, produzindo o amálgama sonoro necessário, a homogeneidade dos timbres, a fluidez da dinâmica.

Além da mistura de sons gerados em diferentes pontos, é igualmente importante que em todos os pontos da sala a mistura sonora seja harmoniosa e homogênea, permitindo um retorno acústico aos músicos tal que possam se ouvir, a si mesmos e entre si.

A *intimidade*, um dos principais parâmetros de avaliação acústica numa sala para música, dificilmente será um problema em salas com dimensões menores. Ao contrário, nos pequenos volumes a sensação de *espacialidade* precisa ser melhorada (Cf. item 3.3.7, p. 126; item 3.3.8, p. 128; item 5.3, 178). Nesse ponto os difusores contribuem significativamente para um melhor resultado.

Para os intérpretes em performance é importante a sensação de conjunto e, para isso:

- as primeiras reflexões devem estar próximas ao som direto (não mais que 35ms) proporcionando uma resposta acústica imediata, necessária para que os músicos sintam que o que estão fazendo é respondido pela sala;
- a resposta sonora em frequência não deve ter deficiências nas bandas de 500 a 2KHz onde, além dos transitórios dos sons, temos os elementos de articulação e expressividade.

Os resultados de *definição* e *clareza* igualmente devem ser adequados, conforme visto em 3.3.2 *Definição e clareza: inteligibilidade* (Cf. p. 110 et seq.)

Se o eco propriamente dito raramente ocorre em pequenas salas por conta das pequenas dimensões, os “pequenos ecos” não estão isentos de ocorrerem e não devem ser negligenciados. A ausência de *flutter eco* é fundamental para evitar distorções de coloração.

Nas pequenas salas a ação dos *modos normais* adentra facilmente a faixa audível (LONG, 2006, p.745), inclusive o limiar entre as regiões *X* e *A* (Cf. 3.2.12, p. 91). Isso traz complexidade ao *design* acústico. Controlar a aumento de um parâmetro como por exemplo, *calor* (*warmth*), ou *razão de baixos* (*bass ratio*), indicando a sensação de conforto do ouvinte ao sentir a resposta reforçada do *tempo de reverberação* nos graves (Cf. 3.3.5, p. 123), pode suscitar cuidados e atenção especiais .

7.3 COMO SURTIU ESTA PROPOSTA DE ESTUDO E PESQUISA SOBRE SEQÜÊNCIAS NUMÉRICAS A PARTIR DO DESIGN E DA CRÍTICA AOS DIFUSORES DE SCHROEDER

Ao saber que os difusores por *reflexão com interferência de fase* produzem absorção da onda incidente e, portanto, perda de energia, e que, o que se buscava para melhorar a resposta de uma pequena sala era, entre outros, manter a energia dos sons produzidos internamente para um melhor *preenchimento do som*, e que, dessa forma, os referidos difusores não atenderiam às necessidades da proposta, passei a observá-los de forma mais intuitiva, pensando no que eles devem fazer, como o fazem, deixando que os difusores surgissem em meu pensamento e pudesse trabalhar com eles a partir da operação direta com suas funções, independentemente de processos logicamente consistentes e métodos seguros e certificados.

Assim, abri o pensamento e lancei uma grande rede para pescar ai dentro.

O que são os difusores de Schroeder? São criações a partir de um colar de números que não se repetem.

Como são dispostas as contas desse colar? Em configurações simétricas.

Há uma influencia da simetria? Parece que quando a simetria é mais complexa, a difusão é melhor. Por exemplo, um difusor de Schroeder em esquema fractal é mais abrangente em âmbito de freqüência que um simples.

Então, essencialmente, esses difusores vem de uma série de números alinhada segundo esquemas simétricos complexos. Essa é a semente.

Se eu guardar essa semente e tentar plantá-la em outro terreno, com outro clima, enxertando com outras plantas, o que dará? Poderia criar um difusor híbrido ou transgênico livre de absorções? Talvez.

Então, vou sair por aí com essa semente.

Li muitas coisas, observei e contemplei figuras, fotos, lugares, ‘ouvia’ os locais com os olhos. Quanto a isso abro um pequeno parênteses: - Desde que comecei a trabalhar com performance eletroacústica, quando era estudante, antes de preparar um projeto de dispositivo para concerto, ficava sentado na sala olhando as paredes, teto, objetos, imaginando como aquilo soava. Nesse jogo, punha as caixas acústicas aqui e ali e testava mentalmente. Na maioria das vezes, o resultado que obtinha era bem próximo do que buscava. Mais ou menos como na artilharia: o primeiro tiro vai longe demais, o segundo, perto demais, o terceiro, no alvo. Nosso cérebro parece que sabe fazer contar sem números, por exemplo, quando olhamos a rua e sabemos se dá ou não para atravessar. É questão de desenvolver esses mecanismos. Fecho o parênteses. Da mesma maneira como simulava mentalmente a instalação antes de conceber um dispositivo, saí por aí com essas sementes nas mãos. Passeando, sem compromisso. Pondo uma num vaso aqui, outra num jardim ali. Voltava dias depois para ver se havia brotado ou não. Posso até ter deixado alguma semente em lugar e ter esquecido de voltar para ver...

Mas, pensando bem: espalhar os sons, com elementos dispostos em simetria e topologia complexa... isso está nos princípios e processos derivados da série de 12 sons Schoenberg! O esquema de simetria resultante de resíduos quadráticos e raiz primitiva, como empregados por Schroeder, é de fato o mesmo que se encontra em muitas séries musicais, sobretudo em Webern (*Figura 6.4, p. 190, simetrias axial e translacional combinadas – Cf. 3.1 Tipologia da simetria , p. 64*). Uma série encadeada a seu *retrógrado*, como, por exemplo, temos freqüentemente em obras de Webern, tem um esquema assim, muito semelhante à disposição dos números inteiros numa seqüência empregada no *design* de um difusor QRD (*Figura 7.14, p. 220*). Uma série combinada simultaneamente à sua *inversão*, tem o mesmo esquema que os resíduos de *raiz primitiva 2* gerando um difusor PR_2D (*Figura 7.15, p. 221*). E há inclusive séries musicais que possuem tais propriedades simétricas em si mesmas.

É interessante como nesse ponto os difusores se aproximam das séries e da mecânica de composição serial, buscando fazer o máximo com o mínimo, ou seja, economia dos meios.

Nesse ponto, a estética da música aproxima-se à da matemática. Uma demonstração elegante é aquela que justamente diz o máximo com o mínimo de elementos e operações, sem prejudicar a inteligibilidade e compreensibilidade do processo. É tão natural quanto a água é ágil para achar a saída de um labirinto em declive.

A história da música serial tomou um novo rumo com o surgimento do *serialismo integral*, no qual a série é aplicada em diversos parâmetros musicais e elementos de escrita. A série foi generalizada e empregada de maneiras variadas a andamentos, registros, valores rítmicos, articulações, intensidades, etc. Trata-se de um método e um recurso composicional, portanto, uma ferramenta conhecida e dominada operacionalmente.

As duas coisas se juntaram: *serialismo integral* também para paredes. A série pode ser aplicada a ângulos, a orientações, inclinações, larguras, espessuras, alturas, diâmetros, natureza de materiais, uma infinidade de coisas. A grande vantagem é que, por mais complexas que sejam as elaborações, o emprego coerente de uma série garante homogeneidade, equilíbrio, um máximo de variedade e uma forte unidade.

No fundo, se compararmos uma série de 12 notas representadas em números inteiros de 1 a 12 (*Figura 6.2, p. 188; Figura 6.3, p. 189; Figura 6.4, p. 190*) e uma seqüência de resíduos quadráticos (*Tabela 7-1, p. 215; Figura 7.14, p. 220; Figura 7.15, p. 221*) igualmente composta por números inteiros de 1 até um número primo, vemos imediatamente que ambas são muito semelhantes:

- a. todos os elementos do domínio se apresentam uns após os outros sem se repetirem até que o conjunto acabe:

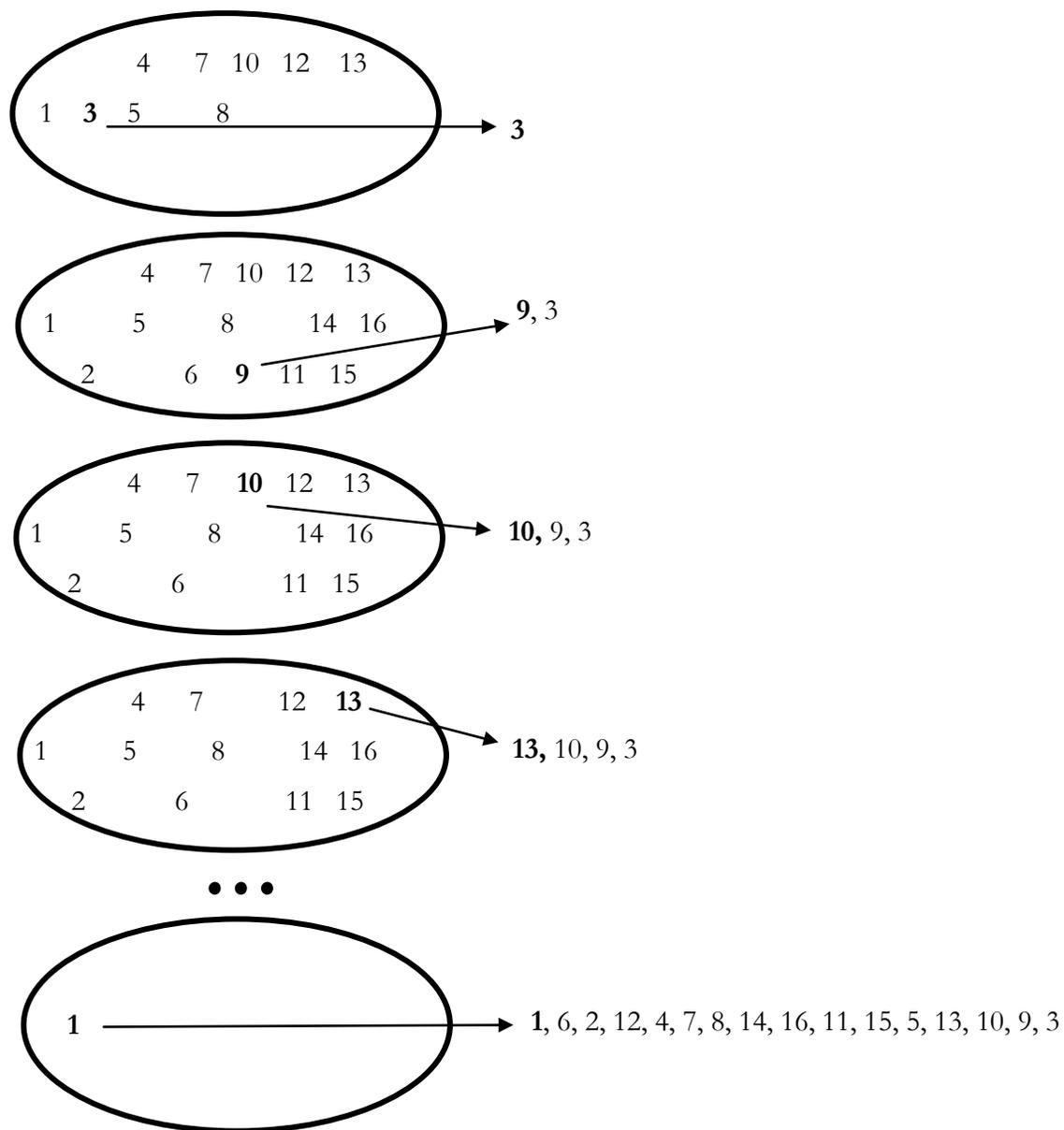


Figura 7.1 – Seqüência numérica gerada por raiz primitiva em base 3, módulo 17. (Cf. Figura 7.16, p. 222)

b. A seqüência de números possui simetria em sua estrutura interna.

A seqüência de números gerada na *Figura 7.1*:

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}	σ_{11}	σ_{12}	σ_{13}	σ_{14}	σ_{15}	σ_{16}
3	9	10	13	5	15	11	16	14	8	7	4	12	2	6	1

E tem a seguinte propriedade:

$$\sigma_i + \sigma_{i+7} = 17 \quad \text{Eq. 7-1}$$

Ou seja:

(σ_1) 3	+	(σ_9) 14	=	17
(σ_2) 9	+	(σ_{10}) 8	=	17
(σ_3) 10	+	(σ_{11}) 7	=	17
(σ_4) 13	+	(σ_{12}) 4	=	17
(σ_5) 5	+	(σ_{13}) 12	=	17
(σ_6) 15	+	(σ_{14}) 2	=	17
(σ_7) 11	+	(σ_{15}) 6	=	17
(σ_8) 16	+	(σ_{16}) 1	=	17

Dessa forma a segunda metade da seqüência é exatamente a primeira metade invertida.

Algo semelhante ocorre com a série mostrada na *Figura 6.3* (p. 189):



σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}	σ_{11}	σ_{12}
2	1	6	3	9	5	11	12	7	10	4	8

Tendo a seguinte propriedade:

$$\sigma_i + \sigma_{i+5} = 13 \quad \text{Eq. 7-2}$$

Ou seja:

(σ_1)		(σ_7)		
2	+	11	=	13
(σ_2)		(σ_8)		
1	+	12	=	13
(σ_3)		(σ_9)		
6	+	7	=	13
(σ_4)		(σ_{10})		
3	+	10	=	13
(σ_5)		(σ_{11})		
9	+	4	=	13
(σ_6)		(σ_{12})		
5	+	8	=	13

Observando *Eq. 7-1* e *Eq. 7-2* vê-se que são duas coisas muito próximas, porém uma delas resultando num difusor PR_3D com Módulo 17 e a outra numa série de 12 notas, relacionada a uma estrutura musical.

Isso nos leva a considerar que os dados básicos de uma série, reduzida a essa mesma condição, podem dar origem a um difusor. E, vice-versa, os dados básicos de um difusor, podem resultar numa série.

Os métodos e mecanismos de manipulação de uma série são habituais na concepção musical. Portanto, algo que, no caso de um músico como eu, se domina e se faz com facilidade.

Surgiu então a idéia de operar com o processo serial, estendido ao serialismo integral, e tentar obter um difusor cuja solução não implicasse em perda de energia da onda incidente.

Assim surgiu a série mostrada na *Figura 7.32 (p. 246)*, da 2ª proposta de solução, bem como os procedimentos para uma concepção assistida por computador, na 1ª proposta, através da planilha de cálculo mostrada em *7.6.2.1 Algoritmo (Série submetida a relação cruzada) (p. 240)*.

Esses algoritmos não foram concebidos com raciocínio somente matemático, mas jogando com a planilha de cálculo, manipulando os elementos como se manipula um *patch* em improvisação musical: observando como reage, alterando, implementando novas coisas, buscando outras, ou seja, de uma certa forma, num processo intuitivo.

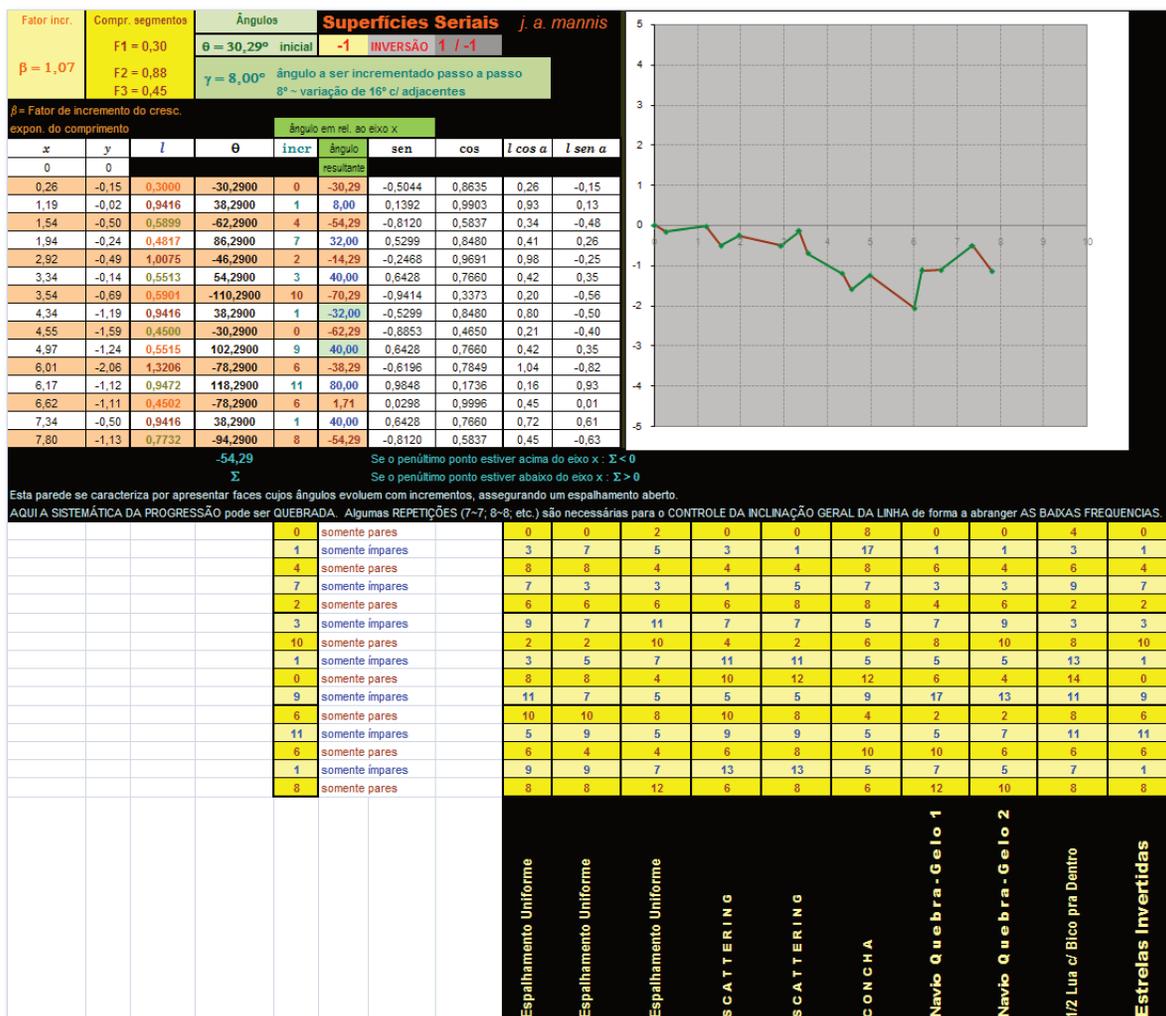


Figura 7.2 – Vista geral da planilha de cálculo gerada para a concepção de superfícies assistida por computador.

Pode-se observar na Figura 7.2, ilustrando a referida planilha, à esquerda, duas colunas x e y contendo as coordenadas dos segmentos de cada elemento da superfície (em vista superior, como se olhássemos um biombo aberto), a coluna l com o comprimento variável dos elementos (largura de cada elemento da superfície), a coluna θ com os ângulos de inclinação de cada segmento, a coluna “incr” contendo o código de embrião de cada superfície (uma série de números que caracteriza o *shape* a ser gerado, pois indica a cada passo (para cada segmento) quantas unidades de incremento (fator multiplicativo do comprimento de cada segmento e quantos σ serão aplicados à inclinação) serão usadas nos cálculos), um fator de incremento (β) atuando no crescimento do comprimento dos elementos, o ângulo θ inicial (útil para orientar a

rotação), um ângulo de incremento passo a passo (γ), proporcionando uma variação angular progressiva e alternada (frente-trás) para cada segmento, e um controle de inversão (-1 / +1) que aplica rotação ao gráfico em relação ao eixo das abscissas. Três comprimentos básicos de segmento são definidos em $F1$, $F2$ e $F3$ (acima à esquerda) que durante o processamento serão proporcionalmente variados. A designação F tem por objetivo lembrar que há sempre uma relação direta entre as dimensões e o comprimento de onda.

Abaixo da *Figura 7.2*, em amarelo, um banco de códigos de embrião obtidos em experimentos. Para atuarem eles devem ser copiados na coluna “**incr**”.

Neste aplicativo o princípio serial é sustentado pelos três comprimentos básicos, o controle de modulação a partir dessa proporção e pelo seqüenciamento do código de embrião. Os ângulos de inclinação evoluem numa progressão linear, sendo alternados, ora para cima, ora para baixo e do ponto de vista musical seria uma série muito redundante e pouco interessante, como uma escala cromática, por isso deve ser considerado como um dispositivo de desdobramento evolutivo. Os demais parâmetros, são comandos para adequar, acomodar, controlar a forma final da superfície gerada. A seguir algumas manipulações para exemplificar a ação dos parâmetros.



Figura 7.3 – A partir da situação da *Figura 7.2*: Inversão (de -1 para +1) (o gráfico passou para o lado positivo do eixo das ordenadas) e alteração do ângulo de incremento γ de 8° para 6° (em cima à esquerda), prolongando e abrindo o todo.

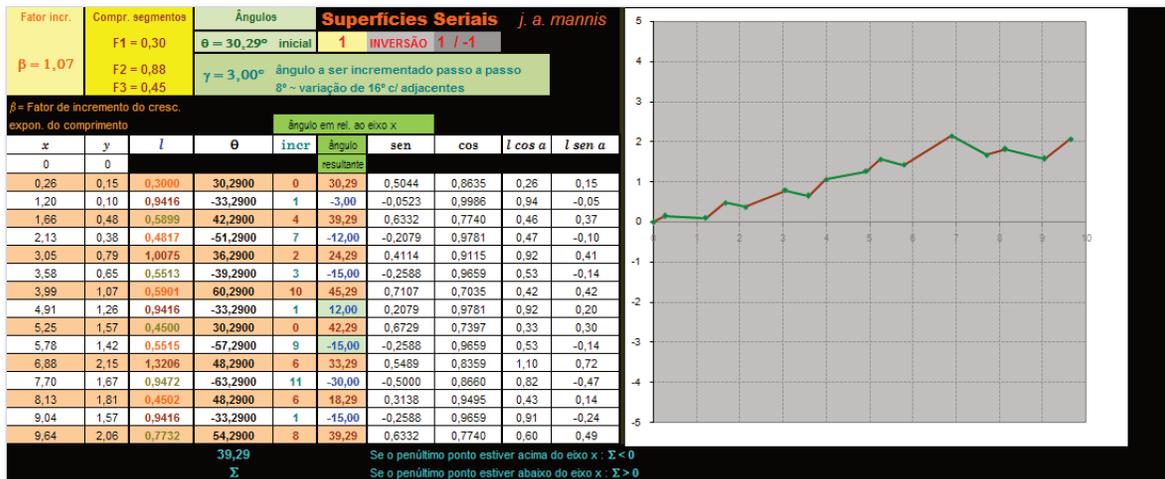


Figura 7.4 - Alteração do ângulo de incremento γ de 6° para 3° (em cima à esquerda), prolongamento do comprimento geral, abertura e atenuação dos ângulos. Tendo três inclinações idênticas de -15° este resultado não é muito interessante.



Figura 7.5 – Mudança ângulo θ inicial de $30,29^\circ$ para $60,29^\circ$, causando leve rotação no sentido anti-horário em relação à origem; alteração do código de embrião da superfície de (0,1,4,7,2,3,10,1,0,9,6,11,6,1,12) para (0,1,4,5,8,7,2,11,12,5,8,9,8,13,8) (segunda coluna à esquerda “incr”).

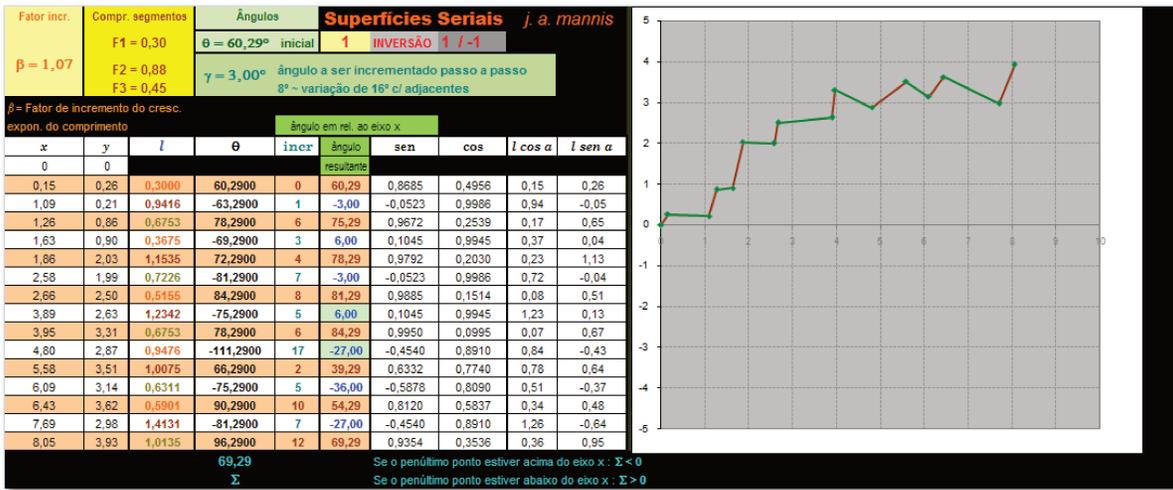


Figura 7.6 – Mudança do código de embrião da superfície de (0,1,4,5,8,7,2,11,12,5,8,9,8,13,8) para (0,1,6,3,4,7,8,5,6,17,2,5,10,7,12) (segunda coluna à esquerda “incr”).

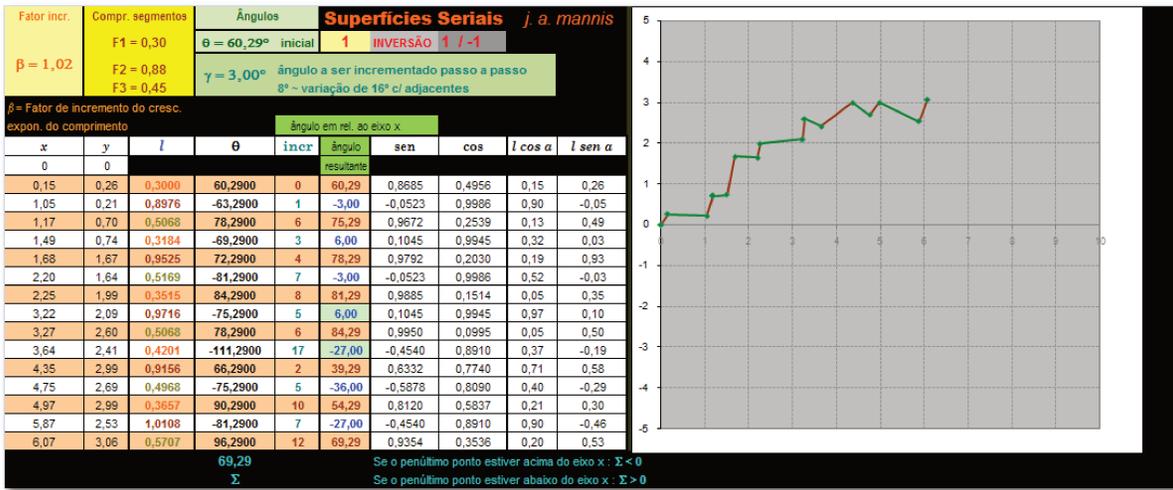


Figura 7.7 – Alteração do fator de incremento de crescimento da superfície da figura anterior β de 1,07 para 1,02 (em cima à esquerda), gerando encolhimento.



Figura 7.8 - Alteração do fator de incremento de crescimento da superfície da figura anterior β de 1,02 para 1,10 (acima à esquerda).



Figura 7.9 – O contraste entre o comprimento dos segmentos (que representam largura dos painéis formadores da superf) pode ser aumentado modificando os valores F1 - F2 - F3 de 0,30 - 0,88 - 0,45 para 0,25 - 1,40 - 0,50. Compensando o aumento de comprimento do conjunto, o fator de incremento β é diminuído para 1,05. Observa-se que a angulação dos segmentos é a mesma que na Figura 7.8, porém os elementos estão mais contrastados entre si.

Contudo esse procedimento requer atenção, pois os resultados podem ser adequados para uma situação e não para outras. Mas é ágil e permite modificações rápidas, fornecendo imediatamente as coordenadas (x,y) facilmente transportáveis para aplicativos de desenho arquitetural, por exemplo, AUTOCAD.

No caso da *cabine de controle de gravação* da Sala Villa-Lobos, na Uni-Rio, com muito pouca profundidade, tornou-se inviável trabalhar tanto com a série generalizada LNSS2 quanto com a concepção assistida LNSS, pois em ambas a profundidade não é tão facilmente controlada com precisão. Para economizar o maior espaço possível e, ao mesmo tempo, obter uma boa difusão ao fundo da cabine, foi necessário pensar novamente em outras formas de produzir difusão aplicando os princípios seriais.

A solução começou a surgir quando viajava de Campinas a São Paulo, num dia em que me deparei com um caminhão levando um carregamento de tubos hidráulicos em PVC. Eram de muitos diâmetros e estavam todos deitados. Já de longe apresentava uma textura visual rica e interessante. Ao me aproximar, percebi o que era e logo mergulhei na ordenação em que estavam dispostos. Isso acabou suscitando um princípio serial de organização. Dispor tubos verticalmente serializando o ritmo de sucessão dos diâmetros. A *Figura 7.10* apresenta uma imagem buscada na *internet* pela palavra “tubos”, integrando justamente um projeto de fotografias matemáticas, que pode dar uma idéia da imagem percebida por trás do caminhão.



Figura 7.10 – Imagem ilustrando a visão da textura de tubos. Fonte: http://centros5.pntic.mec.es/ies.carpe.diem/foto_comenius/2004-05/el%20cielo%20por%20tubos%20de%20acero.jpg acessada em 10/01/2008 18:25

Porém surgiu o problema da fixação: os maiores ficariam muito mais à frente que os menores. A solução de cortar os tubos ao meio resolvia ambos os problemas: a fixação poderia ser com parafusos longos e buchas, sendo o interior posteriormente preenchido com algum material, evitando vibrações e representando um obstáculo eficiente diante de ondas com frequências mais baixas. Os pontos centrais dos semicírculos foram todos alinhados, seguindo uma angulação para minimizar os efeitos dos modos normais (DE MARCO, 1982, p. 111).

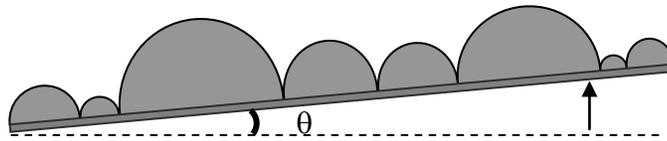


Figura 7.11 – Elementos semicilíndricos dispostos com organização serial dos diâmetros e centros alinhados em eixo inclinado.

Ao serializar os diâmetros, criamos variações no tamanho de cada elemento, bem como no ângulo de reflexão apresentado pela superfície à onda incidente.

7.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFUSORES DE SCHROEDER E A ORGANIZAÇÃO SERIAL NA TÉCNICA DE COMPOSIÇÃO COM DOZE SONS DE SCHOENBERG

As seqüências de profundidades d_n dos difusores de Schroeder QRD , PR_2D e PR_3D possuem estruturas com simetrias semelhantes às da organização serial, onde da série *original* [O] são derivadas suas *inversão* [I], *retrógrado* [R] e *retrógrado da inversão* [RI].

Em ambos os casos, os elementos que constituem as seqüências, quando empregados na organização estrutural, não se repetem antes de concluir um período.

7.4.1 Semelhança entre as séries de 12 notas musicais e as seqüências de resíduos quadráticos e raízes primitivas (QRD, PR_2D e PR_3D)

Partindo da *Tipologia da simetria* (item 3.1), das *Simetrias observadas nos seqüenciamentos* σ_n obtidos através de *resíduos quadráticos e raízes primitivas* (item 4.3) e do estudo da série musical e suas simetrias inerentes visto em *Alguns elementos da Composição com doze sons* (item 6.1) é possível aproximar as seqüências de elementos da série musical e da seqüência numérica geratriz de um difusor e reconhecer a semelhança estrutural que possuem.

Tomando o parâmetro de *design* $N=17$ e gerando as seqüências σ_n para difusores QR , PR_2 e PR_3 , obtemos:

	QRD	PR ₂ D	PR ₃ D
n	σ_n	σ_n	σ_n
0	0	-	-
1	1	2	3
2	4	4	9
3	9	8	10
4	16	16	13
5	8	15	5
6	2	13	15
7	15	9	11
8	13	1	16
9	13	2	14
10	15	4	8
11	2	8	7
12	8	16	4
13	16	15	12
14	9	13	2
15	4	9	6
16	1	1	1
17	0	2	3
18	1	4	9
...

Tabela 7-1 – Seqüências σ_n com $N=17$ para Difusores QR , PR_2 e PR_3 .

Rememorando as simetrias constatadas nas séries de 12 notas, exemplificadas na *Figura 6.3*, aqui denominada *série 1*, e na *Figura 6.4* (esta sendo a série do segundo movimento da *Sinfonia op.21* de Anton Webern) como *série 2*, destacando os gráficos representativos encontrados ao final de cada uma das ilustrações, primeiramente chamaria a atenção para a comparação entre as seqüências aplicadas nos difusores e na modelagem serial (Cf. *Tabela 7-2*). Ambas são compostas por elementos representados por números inteiros e são cíclicas, uma com 16 termos e outra com 12 termos, se repetindo uma vez completado um período (de 16 ou de 12 passos). Em QRD e PR_2D há um sub-período de 8 termos, sistematicamente encadeado a uma *simetria axial* (QRD) ou *translacional* (PR_2D). Em cada uma das 5 seqüências, uma vez que entraram na seqüência os termos que compõem o (menor) período não se repetem até que o total do conjunto de elementos tenha se esgotado. Essas observações foram colocadas no *item 7.3* (p. 200) mas estão aqui sendo expostas de forma mais analítica.

É interessante notar que no processo de modelagem serial há um recurso se assemelhando bastante à simetria dos sub-períodos que acabamos de observar em QRD e PR_2D

consistindo em encadear uma série a uma configuração simétrica, ou seja, uma das quatro expostas no quadro da *Figura 6.5*, a saber: *transposição* na forma original (*simetria translacional*), *inversão* (*simetria axial*), *retrógrado da inversão* (*dupla simetria axial*: no tempo e no âmbito do parâmetro operado : frequência, profundidade). Esse encadeamento natural nas seqüências de resíduo quadrático (*QRD*) e de raízes primitivas 2 (*PR₂D*), portanto um desdobramento produzido pelo próprio processo gerador da seqüência, pode igualmente ser empregado quando houver necessidade de ampliação dos termos de uma série. Na música esse encadeamento aplicado no processo composicional funciona muito bem e proporciona perfeito equilíbrio entre unidade e variedade na construção musical.

	QRD	PR₂D	PR₃D	Série 1	Série 2
n	σ_n	σ_n	σ_n	σ_n	σ_n
0	0	-	-	-	-
1	1	2	3	2	11
2	4	4	9	1	14
3	9	8	10	6	1
4	16	16	13	3	12
5	8	15	5	9	4
6	2	13	15	5	15
7	15	9	11	11	21
8	13	1	16	12	10
9	13	2	14	7	18
10	15	4	8	10	7
11	2	8	7	4	20
12	8	16	4	8	17
13	16	15	12	2	11
14	9	13	2	1	14
15	4	9	6	6	1
16	1	1	1	3	12
17	0	2	3	...	...
18	1	4	9		
19	4	8	10		
...		

Tabela 7-2 - Seqüências σ_n empregadas no *design* de difusores (*QRD*, *PR₂D*, *PR₃D*) e na modelagem de música serial (*série 1*, *série 2*), comparativamente.

Destacaria agora na *Figura 6.3* e na *Figura 6.4* um detalhe presente na tabela central, onde, na parte inferior, há uma representação numérica dos intervalos entre os elementos da série, ou seja, a diferença entre um termo e seu subsequente⁴⁶ na linha acima, esta representando as alturas da série:

(*Figura 6.3*) Seqüência de intervalos: $\sigma_{n+1} - \sigma_n$ **{-1, 5, -3, 6, -4, 6, 1, -5, 3, -6, 4}**
 Respectivamente {2ª menor descendente, 4ª justa ascendente, 3ª menor descendente, 4ª aumentada ascendente, 3ª maior descendente, 5ª diminuída ascendente, 2ª menor ascendente, 4ª justa descendente, 3ª menor ascendente, 5ª diminuída descendente e 3ª maior ascendente}

(*Figura 6.4*) Seqüência de intervalos: $\sigma_{n+1} - \sigma_n$ **{3, -13, 11, -8, 11, 6, -11, 7, -10, 13, -3}**
 Respectivamente {3ª menor ascendente, 9ª menor descendente, 7ª maior ascendente, 6ª maior descendente, 7ª maior ascendente, 5ª diminuída ascendente, 7ª maior descendente, 6ª maior ascendente, 7ª maior descendente, 9ª menor ascendente, 3ª menor descendente)}

Na primeira seqüência, além da *simetria axial (inversão)* entre os elementos (ou seja entre as alturas), ilustrada na *Figura 6.3*, temos a mesma simetria nos intervalos⁴⁷ entre os elementos:

⁴⁶ Os intervalos estão representados logaritmicamente pelo número de semitons que possuem. Dessa forma é possível representar um intervalo pela diferença entre os logaritmos. Quando tratamos as alturas pelas suas freqüências (Hz) estamos num domínio linear e não mais logarítmico, portanto um intervalo é dado pela razão entre duas freqüências.

⁴⁷ Entre 12 elementos temos 11 intervalos.

Intervalos entre as alturas na ordem em que aparecem na série										
1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
-1	5	-3	6	-4	6	1	-5	3	-6	4

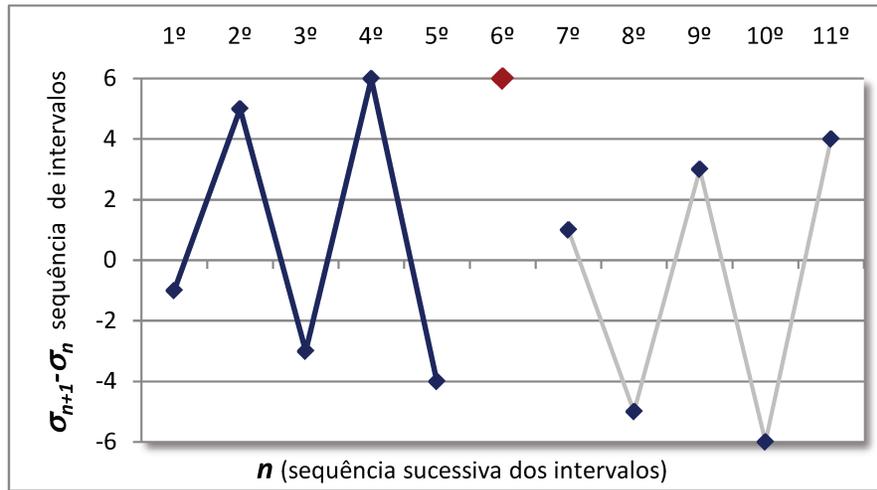


Figura 7.12 – Ilustração da evolução dos intervalos entre os elementos (alturas) da série de 12 notas mostrada na Figura 6.3. Nota-se uma *simetria rotacional* com *pivot* (ponto quadrado ao centro) no intervalo de trítono (4ª aumentada ou 5ª diminuída).

O 7º intervalo (1 = 2ª menor ascendente) é a inversão do 1º intervalo (-1 = 2ª menor descendente); da mesma forma o 8º intervalo (-5) é a inversão do 2º intervalo (5), e assim por diante até chegarmos ao *pivot*, o 6º intervalo. Assim como os elementos da série não se repetem até serem todos expostos, os intervalos entre os elementos apresentam essa mesma característica. A seqüência de intervalos desta série se caracteriza por uma *simetria rotacional* com *pivot* no trítono (intervalo simétrico na oitava: 6+6=12). A *simetria rotacional* na modelagem serial em música está presente como o *retrógrado da inversão* o que equivale a duas *simetrias axiais* aplicadas sucessivamente: uma *inversão* (*simetria axial* no domínio da freqüência) e uma *retrogradação* (*simetria axial* no tempo).

Na segunda seqüência acima apresentada, referente à na série ilustrada na Figura 6.4, além da *simetria axial* no domínio do tempo (*retrogradação*) e da *translacional* (*transposição*), constatamos igualmente simetria nos intervalos entre os elementos:

Intervalos entre as alturas na ordem em que aparecem na série										
1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
3	-13	11	-8	11	6	-11	7	-11	13	-3

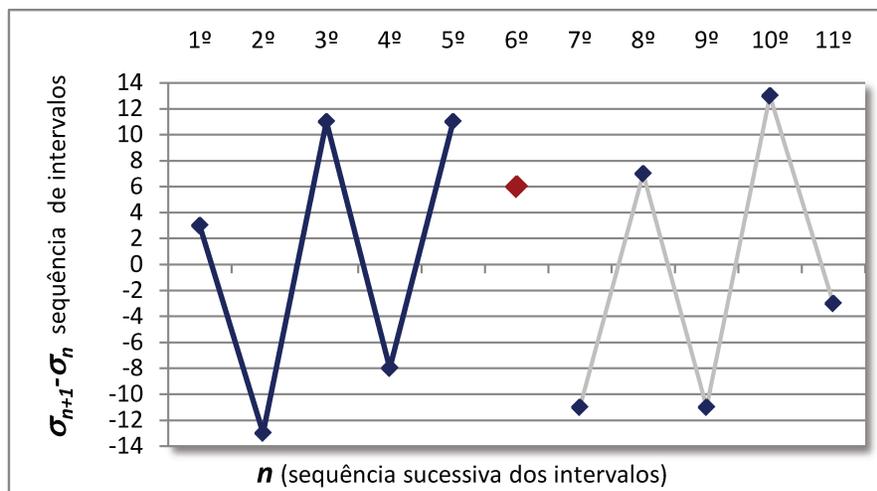


Figura 7.13 - Ilustração da evolução dos intervalos entre os elementos (alturas) da série de 12 notas mostrada na Figura 6.4. Nota-se igualmente à figura anterior uma *simetria rotacional* com *pivot* (ponto quadrado ao centro) no intervalo de trítone (4ª aumentada ou 5ª diminuída).

O *pivot*, o 6º intervalo (trítone) é a inversão dele mesmo ($6+6=12$). Do centro para as bordas: o 7º intervalo ($-11 = 7^a$ maior descendente) é a inversão do 5º intervalo ($11 = 7^a$ maior ascendente); o 8º intervalo ($7 = 6^a$ menor ascendente) é quase a inversão do 4º intervalo ($-8 = 6^a$ maior descendente), e assim por diante.

Isso caracteriza uma *simetria rotacional* sendo musicalmente um *retrógrado da inversão*, observada do centro aos extremos com uma pequena licença para a 6ª menor e a 6ª maior.

Examinadas essas propriedades das séries musicais, passemos às seqüências geratrizes dos difusores de Schroeder, com atenção especial à relação entre seus elementos, mais precisamente, à diferença entre uma cavidade e outra. No *QRD* (Figura 7.14) há um eixo de *simetria axial* entre σ_9 e σ_{10} , sendo o segmento de σ_{10} a σ_{17} o *retrógrado* de σ_1 a σ_9 o que faz dessa seqüência uma série de nove elementos $\{0,1,4,9,16,8,2,15,13\}$. A seqüência de diferenças entre as profundidades das cavidades $\sigma_{n+1} - \sigma_n$, podendo ser vista como uma seqüência dos *contrastos entre as cavidades*, revela a diversidade de situações criadas entre alvéolos vizinhos no difusor. Neste aqui, a seqüência de intervalos (ou seja, a diferenças entre as cavidades) $[\sigma_{n+1} - \sigma_n]$ entre σ_{10} e σ_{17} é *retrógrada e invertida* em relação a σ_1 a σ_9 , com *pivot* [0] em σ_9 , sendo, portanto, de *simetria rotacional*.

QRD

n	σ_n	$\sigma_{n+1} - \sigma_n$
0	0	1
1	1	3
2	4	5
3	9	7
4	16	-8
5	8	-6
6	2	13
7	15	-2
8	13	0
9	13	2
10	15	-13
11	2	6
12	8	8
13	16	-7
14	9	-5
15	4	-3
16	1	-1
17	0	1
18	1	3
19	4	5
..

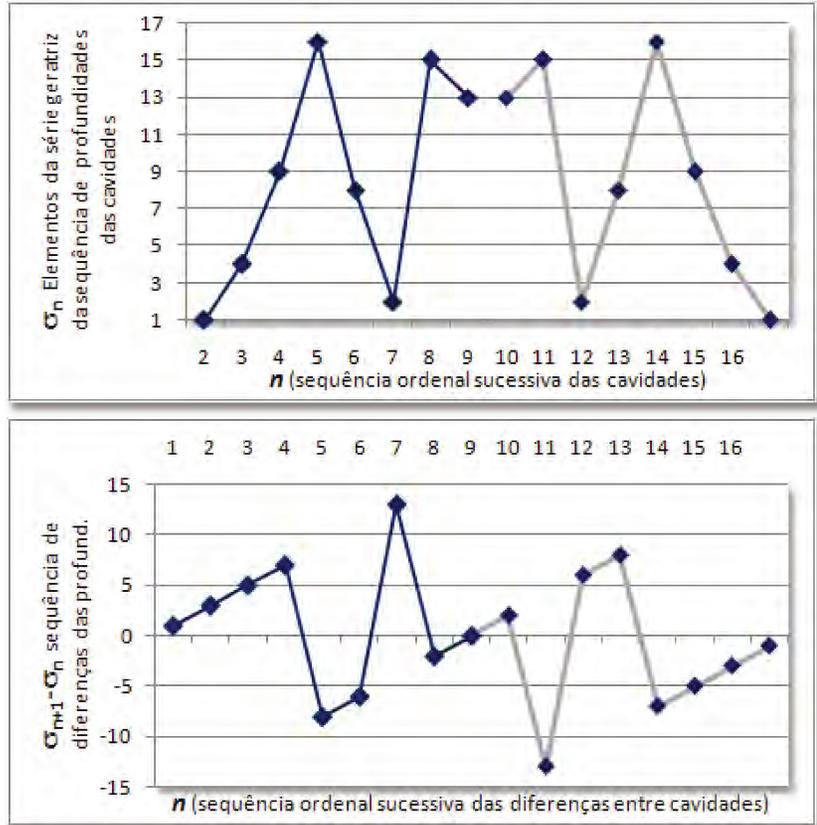


Figura 7.14 - QRD $N=17$: seqüência σ_n : simetria axial no tempo (retrogradação). Na seqüência das diferenças entre as profundidades ($\sigma_{n+1} - \sigma_n$) uma simetria rotacional.

No PR_2D a seqüência σ_1 a σ_8 se repete literalmente (simetria translacional no tempo) a partir de σ_9 , o que faz dela uma série de apenas oito elementos $\{2,4,8,16,15,13,9,1\}$. Além disso, a seqüência σ_1 a σ_8 tem um eixo de simetria axial no domínio da freqüência entre σ_4 e σ_5 sendo os termos σ_5 a σ_8 a exata inversão do segmento de σ_1 a σ_4 , ou seja, $\sigma_5 = N - \sigma_1 = 17 - \sigma_1$; $\sigma_6 = 17 - \sigma_2$; etc. A seqüência $\sigma_{n+1} - \sigma_n$ das diferenças de profundidades forma uma série de quatro elementos - σ_1 a σ_4 (2,4,8,-1) - seguidos de uma inversão - (-2,-4,-8,1) de σ_5 a σ_8 - possuindo, assim, simetria axial. A primeira metade (σ_1 a σ_8) e a segunda metade (σ_9 a σ_{16}) da série de intervalos são idênticas, caracterizando, no todo, simetria translacional.

PR_2D

n	σ_n	$\sigma_{n+1} - \sigma_n$
1	2	2
2	4	4
3	8	8
4	16	-1
5	15	-2
6	13	-4
7	9	-8
8	1	1
9	2	2
10	4	4
11	8	8
12	16	-1
13	15	-2
14	13	-4
15	9	-8
16	1	1
17	2	2
...

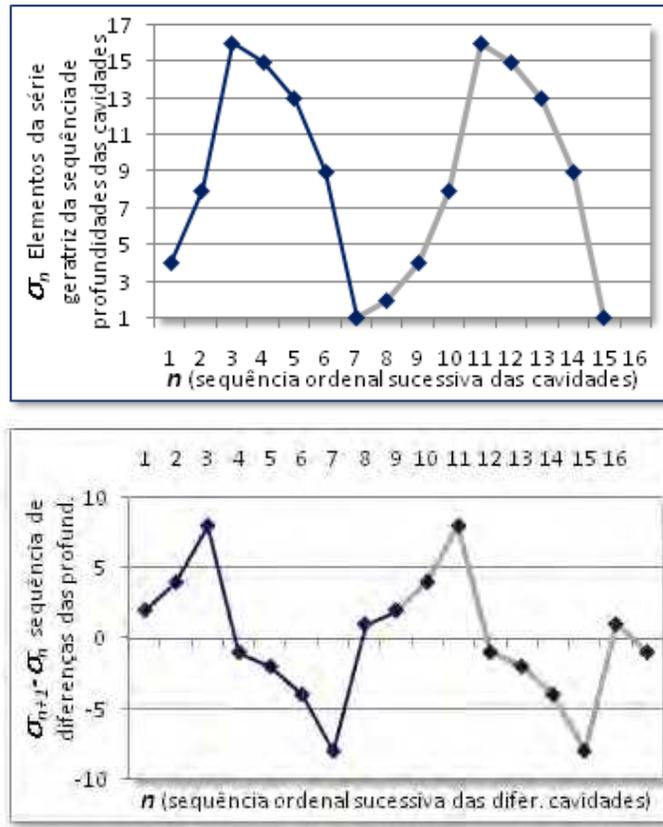


Figura 7.15 – PR_2D $N=17$: a seqüência σ_n é literalmente repetida (*simetria translacional* no tempo) a partir da metade (9ª profundidade). Porém, na seqüência das diferenças entre as profundidades ($\sigma_{n+1} - \sigma_n$): mesma simetria – *translacional*.

No PR_3D a seqüência de 16 elementos (σ_1 a σ_{16}) {3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1} tem no segmento de σ_9 a σ_{16} a exata *inversão* de σ_1 e σ_8 .

A distribuição das profundidades no PR_3D com $N=17$ possui uma complexidade maior que em QRD e PR_2D com mesmo N , estas resultando em séries mais redundantes. No PR_3D ($N=17$) temos 16 termos, compreendendo 8 originais e 8 invertidos (*Figura 7.16 (B)*), contra 9 no QRD ($N=17$) e 8 no PR_2D ($N=17$). Num PR_3D a seqüência das diferenças de profundidades possui boa variedade de articulações, o que em música corresponderia a uma série rica em intervalos variados.

PR_3D

n	σ_n	$\sigma_{n+1} - \sigma_n$
1	3	6
2	9	1
3	10	3
4	13	-8
5	5	10
6	15	-4
7	11	5
8	16	-2
9	14	-6
10	8	-1
11	7	-3
12	4	8
13	12	-10
14	2	4
15	6	-5
16	1	2
17	3	6
...

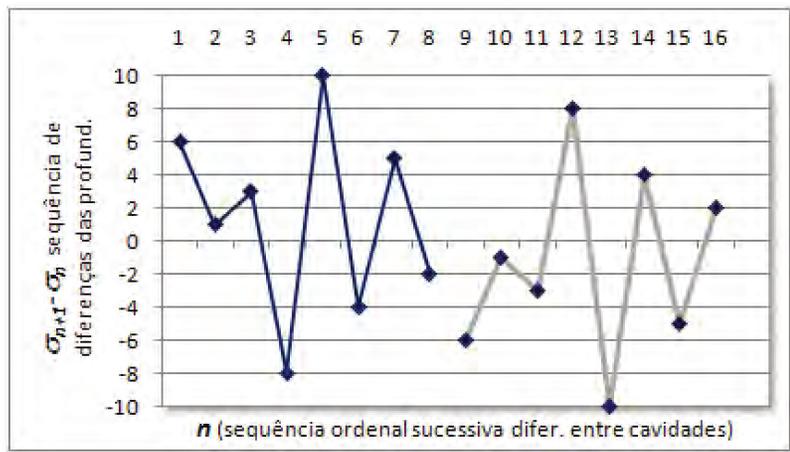
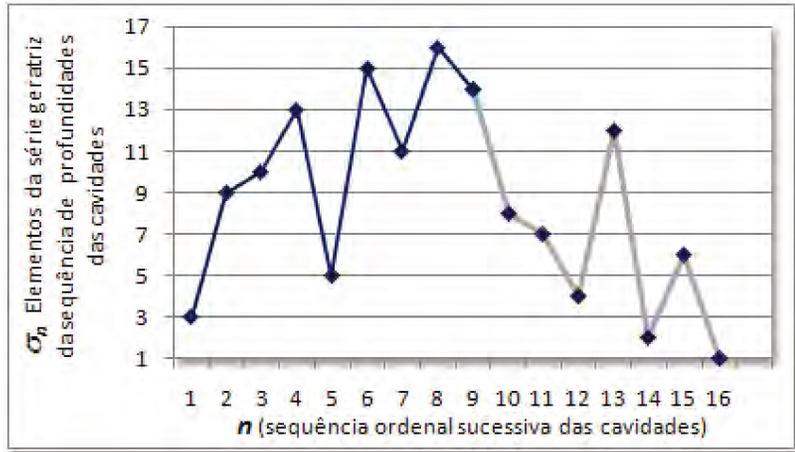


Figura 7.16 – PR_3D $N=17$: Seqüência σ_n : a partir da metade (9ª profundidade) a seqüência inicial (da 1ª à 8ª profundidade) se repete *invertida*, portanto, com *simetria axial*. Seqüência das diferenças entre as profundidades ($\sigma_{n+1} - \sigma_n$) : mesma simetria – *inversão*.

No PR_3D e no QRD com $N=17$ a seqüência das diferenças entre as profundidades das cavidades forma uma série de oito elementos, sendo no PR_2D de quatro elementos. No PR_3D e no QRD as cavidades se articulam de oito maneiras diferentes (duas séries de 8 elementos), e no PR_2D de apenas quatro (duas vezes duas séries de 4 elementos).

Comparando as simetrias presentes nas seqüências de intervalos $\sigma_{n+1} - \sigma_n$ ilustradas na *Figura 7.16*, *Figura 7.15* e *Figura 7.14*, referentes aos difusores QRD , PR_2D , PR_3D , com as mesmas na *Figura 7.12* e na *Figura 7.13* constata-se que ambas possuem estrutura simétrica.

Dessa forma, temos três evidências de semelhança entre as séries de seqüências das profundidades das cavidades e as séries de 12 notas: a não repetição antes do fechamento do

ciclo, simetria na disposição dos elementos na seqüência, simetria na relação entre os elementos sucessivos (diferenças entre profundidades – intervalo entre as alturas da série).

Considerando essas relações entre as seqüências de profundidades e a direta implicação na produção de diferenças de fase na entrada de cavidades vizinhas, a riqueza de relações internas das seqüências acompanha um desempenho melhor do difusor, bem como a elegância e equilíbrio de uma série de 12 notas potencializada em unidade e variedade.

7.5 AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

Esta pesquisa envolveu essencialmente dois estudos de caso: a adequação da *sala de captação de som* do Estúdio do Laboratório de Acústica Musical e Informática (LAMI) do Departamento de Música da ECA/USP (SP), para performances musicais, bem como do *auditório* e da *cabine de controle de gravação* da Sala Villa-Lobos da UNI-RIO (RJ).

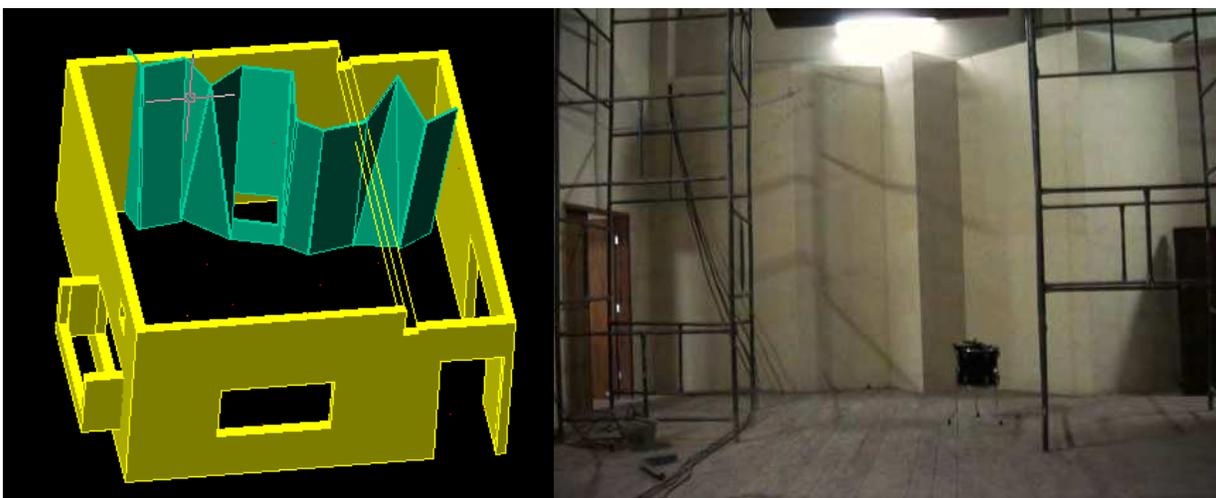


Figura 7.17 – (esq.) Sala de captação de som do estúdio do LAMI (USP) com uma das superfícies difusoras ao fundo; (dir.) Palco da Sala Villa-Lobos (UNIRIO) em reforma executando o projeto elaborado.

7.5.1 Estúdio do Laboratório de Acústica Musical e Informática – LAMI/ ECA/USP

A criação e instalação do Estúdio do Laboratório de Acústica Musical e Informática (LAMI) Depto. de Música da ECA/USP, em 1996, foi idealizada e coordenada por Marcos Branda Lacerda, tendo a cooperação da FAU/USP através de Ualfrido Del Carlo, autor do projeto arquitetônico.

Tendo o acabamento acústico do espaço de gravação ficado em aberto, foi proposta, então, avaliação e estudo de soluções para a conclusão do projeto. Esperava-se que o estúdio pudesse se adequar às atividades musicais do Departamento de Música da ECA/USP, sendo, necessário, portanto, especial atenção ao conforto acústico do intérprete.

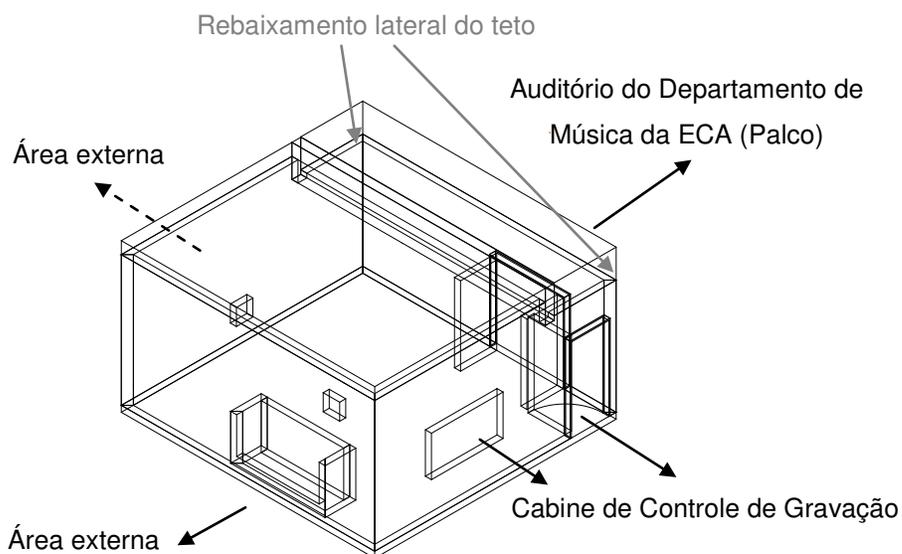


Figura 7.18 – Vista em perspectiva da sala de captação de som do Estúdio do LAMI/ECA/USP.

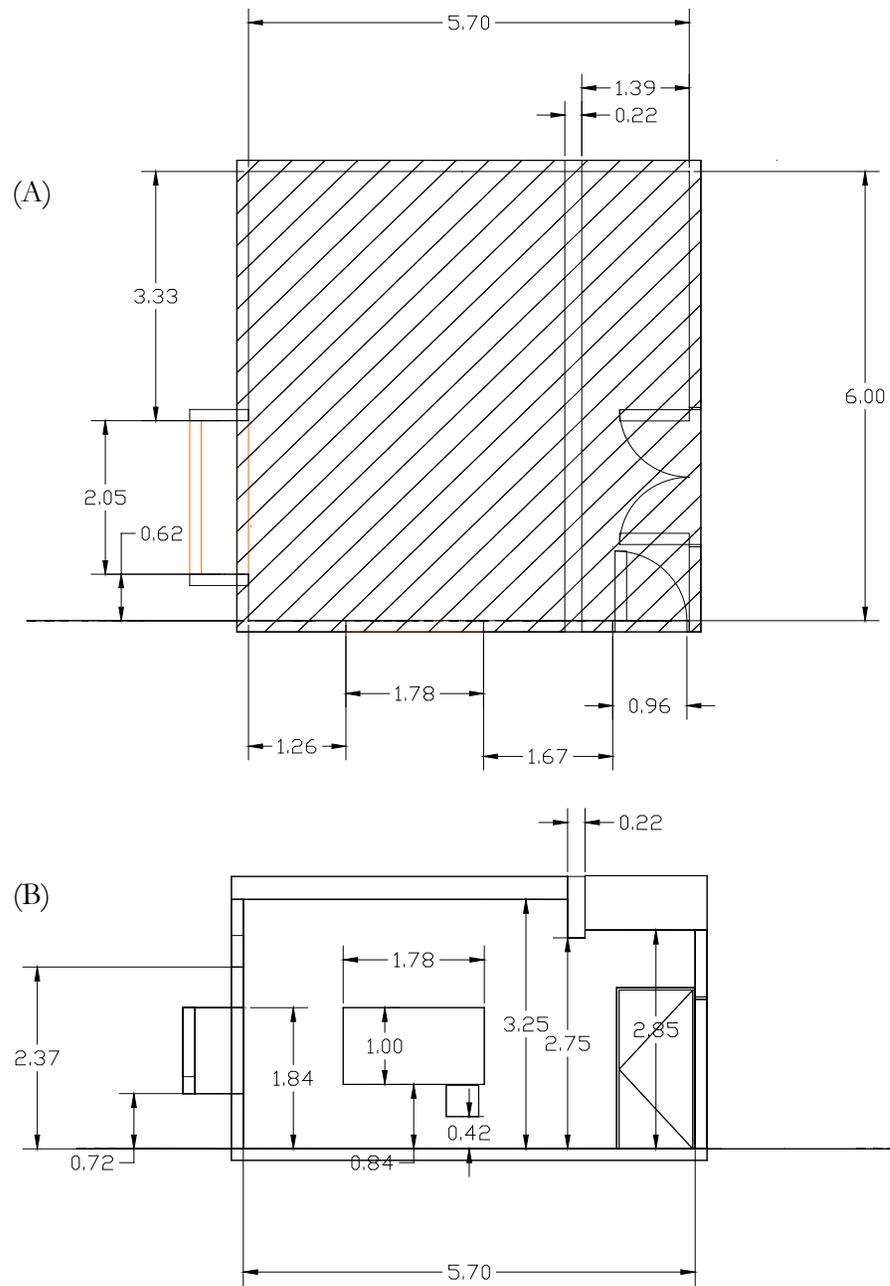


Figura 7.19 – Espaço de captação de som do Estúdio do LAMI/ECA/USP: (A) Planta (Vista Superior) (B) Vista Lateral.

Antes de iniciar os trabalhos, renomados especialistas em acústica no Brasil foram consultados: Stelamaris Rolla Bertoli (FEC/Unicamp), Conrado Silva (EM/UnB), Renato Cipriano (WSDG-Brasil) e Moyses Zindeluk (COPPE/UFRJ). As sugestões apresentadas foram muito importantes e constituíram o ponto de partida para a elaboração da pesquisa, bem como da solução proposta.

Um encaminhamento inicial, inclusive sugerido por Ualfrido Del Carlo, foi construir elementos modulares para adequar o local a diferentes situações acústicas.

Os elementos básicos inicialmente concebidos foram módulos móveis consistindo em trapézios irregulares pendurados no teto, painéis rebatidos nas paredes, painéis sobre suportes no solo distribuídos na sala, todos eles totalmente absorventes numa face e com uma membrana na outra.

Após medições acústicas do local e análise dos dados, verificou-se que para uma correta adequação acústica era necessário considerar a possibilidade de soluções complementares.

7.5.1.1 Problemas constatados

- Nível sonoro:
 - perdas significativas abaixo de 250Hz.
 - proeminência na banda de 2KHz em comparação às vizinhas.
- Tempo de reverberação:
 - deficiência entre 50 e 315Hz.
 - desequilíbrio entre graves (deficientes) e médios e agudos (400 a 4 KHz)
 - Em 2KHz constata-se o mesmo pico que encontrado na medição do nível sonoro.
- Influência negativa dos *modos normais* da sala.
- Absorção nas bandas de baixas frequências por membranas constituídas de placas de madeirite pouco espessas revestindo a totalidade do espaço interno.

7.5.1.2 Soluções

Melhoras significativas ocorrerão na sala quando forem minimizados os efeitos dos *modos normais* e da *absorção* por membranas nas paredes e teto, numa primeira etapa. Em seguida, uma nova seção de medições traria dados para análise averiguando-se as necessidades precisas para acabamento final. Para tanto, espaços e superfícies precisariam ser deixados ou em aberto ou com possibilidade de adequação ulterior permitindo a segunda etapa do trabalho.

Seguindo as orientações de Beranek (1962, p. 436-438; 1996, p. 432-435; 2004, p.502-503), para minimizar os efeitos de *Absorção* devida a sistemas de membranas, há duas possibilidades de adequação:

- alterar a espessura das placas de madeira de revestimento.
- alterar o material de revestimento interno de madeira para um outro que tenha alta densidade.

Para melhorar a ação dos *modos normais*, temos duas alternativas:

- Otimizar as proporções ($L \times W \times H$) de forma a proporcionarem *modos normais* com acumulação uniformemente progressiva e homogênea pelas bandas de frequência crescentes, conforme:
 - *item 3.2.13.1 Critério de Bonello (p. 97)*, Everest (1988, p. 56-57) e Bonello (1979a, 1979b, 1981) e
 - *item 3.2.13.2 Diagrama de Bolt, Beranek e (p. 100)*, Bolt, Beranek e Newman (s.d. *apud* Davis, 1987, p. 218)
- Modificar a geometria das partições internas dando-lhes formas irregulares, com base em Nieuwland e Weber (1979)⁴⁸.

⁴⁸ Uma sala não retangular produz uma distribuição das frequências modais de forma mais regular do que uma sala retangular com proporções otimizadas.

Porém, como diminuir a largura para 4,9m não melhoraria as respostas em 30 e 60Hz no *critério de Bonello*, a solução mais indicada seria modificar a geometria das partições.

A sala poderia possuir elementos difusores em largo âmbito de alturas proporcionando campo difuso, o que seria favorável à execução e audição musical, proporcionando melhores resultados aos seguintes parâmetros *vivacidade* (RT_{60} e *EDT*), *preenchimento do som*, *espacialidade*, *fração de energia lateral* (*LF*), *center time* (*CT*), *difusão*, *balanço*, *mistura*, *conjunto*, *ausência de eco* e *uniformidade*. Se os difusores puderem agir em frequências graves, poderão contribuir para diminuir os efeitos dos *modos normais*.

O emprego de materiais prioritariamente reflexivos assegura melhores resultados aos parâmetros *vivacidade* (RT_{60} e *EDT*), *preenchimento do som*, *Brilho*. Contudo é necessário cuidado para não prejudicar o *balanço tonal* (*TB*), caso haja desequilíbrio nas absorções por banda de frequência.

7.5.2 Sala Villa-Lobos – Universidade do Rio de Janeiro – UNIRIO

Em 2006, por solicitação da Uni-Rio, foi elaborado projeto de adequação acústica para a reforma da Sala Villa-Lobos, no Rio de Janeiro.

7.5.2.1 Necessidades da demanda

- Acústica adequada às práticas musicais na Uni-Rio: música popular e erudita;
- Condições adequadas a uma boa escuta, estética e técnica, com precisão, em todos os assentos;
- Não diminuir a platéia já limitada a 110 assentos;
- Melhorar o isolamento acústico entre a sala e o ambiente externo;
- Projetar uma Cabine de Controle de Gravação, Mixagem e Produção de Áudio (mezanino anterior), devendo, apesar das restrições de espaço, oferecer condições acústicas adequadas à monitoração de gravações, edições, mixagens, diversos processamentos de áudio e masterizações.
- Estabelecer um projeto viável compatível com valor limitado ao orçamento disponível;
- A reforma estava em andamento. O local o local havia se transformado num canteiro de obras e as condições em que se encontrava não permitiam a realização de medições acústicas.

7.5.2.2 Avaliação das necessidades

A partir das dimensões da sala foram verificadas e adequadas as proporções da sala, conforme o *critério de Bonello e diagrama de Bolt, Beranek e Newman*.

Largura: 10,10m; Comprimento total: 19,10m; Comprimento a partir do mezanino: 15,75m ; Altura até o forro: 7,30m

Considerando esses dados:

a maior dimensão (o comprimento) estaria entre 15,75 e 19,10m
a menor dimensão (o pé direito), entre 5,00 e 7,30m.

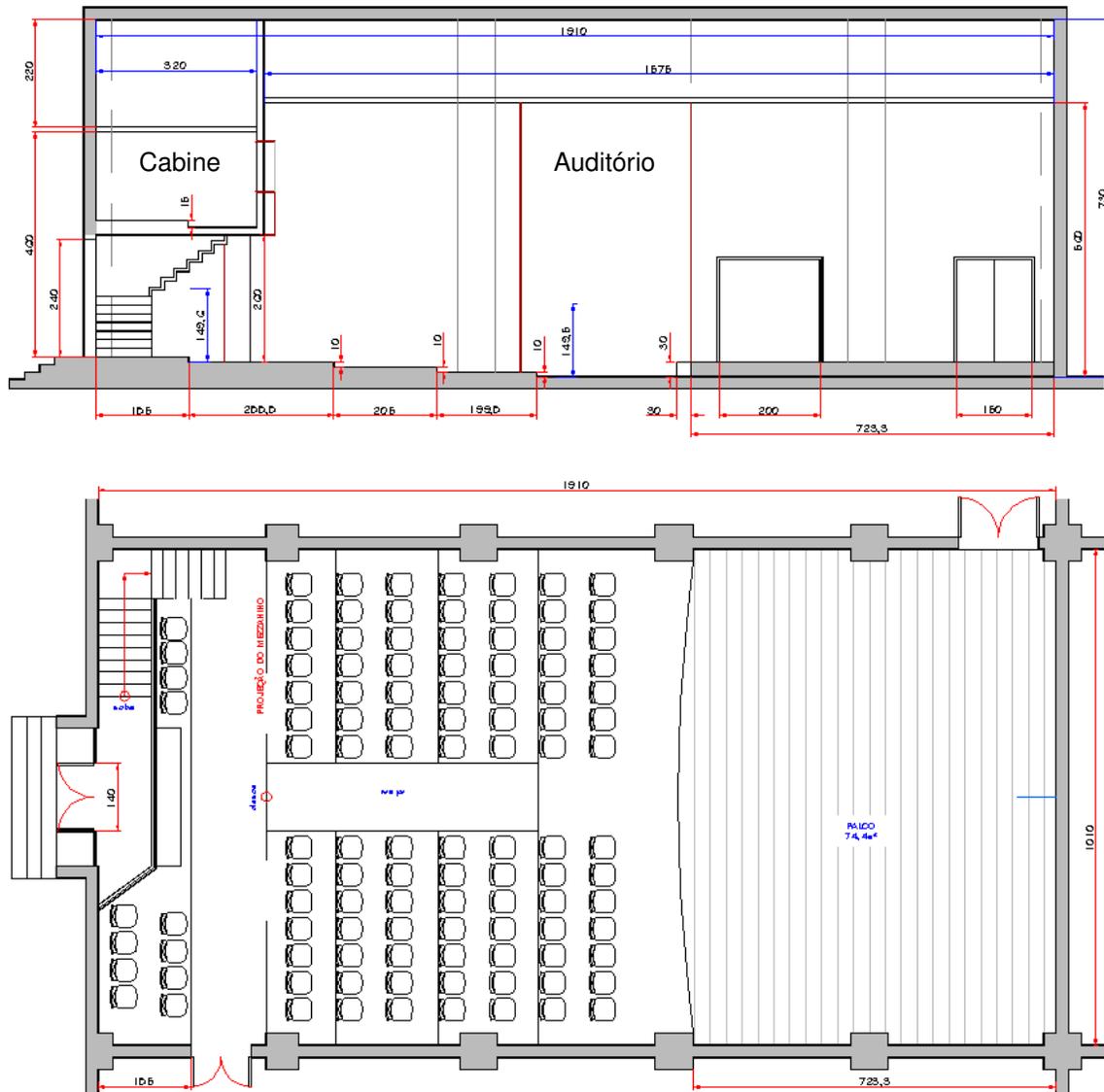


Figura 7.20 – Elevação e planta da Sala Villa-Lobos da Uni-Rio ao ser visitada antes da elaboração do projeto.

A análise das proporções segundo Bolt, Beranek e Newman, indicou, conforme *Figura 7.21 (A)* e *Figura 7.23 (A)*, que:

- as dimensões originais do *auditório* não eram adequadas;
- o local previsto para a *cabine de controle de gravação* tampouco apresentava condições adequadas.

A análise pelo *critério de Bonello* indicou, conforme *Figura 7.22 (A)* e *Figura 7.24 (A)*, que:

- as dimensões originais do *auditório* implicam em perda em 40Hz e reforço em 50 e 80Hz;
- as dimensões do local previsto para a *cabine de controle de gravação*, se conservadas tal qual, ocasionariam perdas em 202Hz;

Verificou-se, portanto, a necessidade de adequação das dimensões do *auditório* e da *cabine de controle de gravação*. Mesmo com possibilidades restritas de modificação do espaço, chegou-se a um compromisso satisfatório entre as restrições próprias ao projeto e os recursos disponíveis.

As dimensões passaram, assim, de:

- $L \times W \times H = 10,10 \times 19,10 \times 7,30m$ (*auditório*)
- $L \times W \times H = 10,10 \times 3,20 \times 4,20m$ (*cabine*)

para

- $L \times W \times H = 10,10 \times 17,00 \times 7,30m$ (*auditório*)
- $L \times W \times H = 6,90 \times 3,00 \times 4,00m$ (*cabine*)

Uma comparação entre os resultados das análises das dimensões iniciais e as dimensões finais pode ser observada nas *Figura 7.21 e Figura 7.22* para o *auditório* e *Figura 7.23 e Figura 7.24* para a *Cabine*.

7.5.2.2.1 *Auditório: Bolt, Beranek e Newman*

$$L \times W \times H = 10,10 \times 19,10 \times 7,30m$$

$$z/z_c : x/z_c : y/z_c$$

$$(1 : 1,38 : 2,62)$$

$$L \times W \times H = 10,10 \times 17,00 \times 7,30m$$

$$z/z_c : x/z_c : y/z_c$$

$$(1 : 1,38 : 2,33)$$

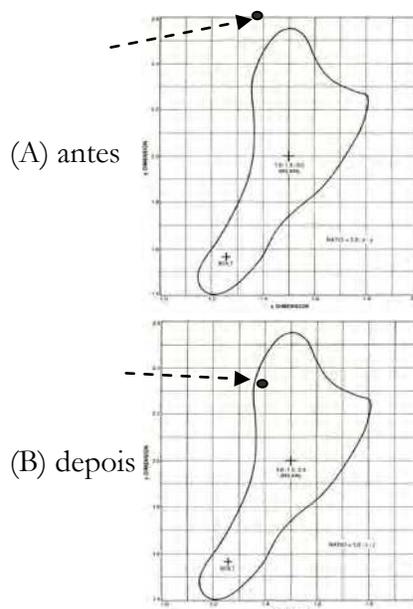
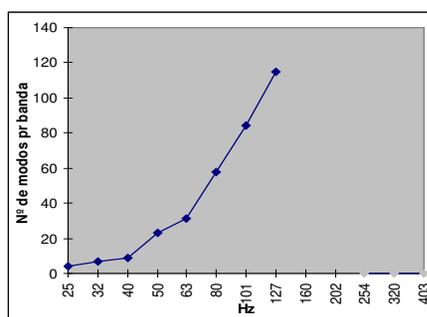


Figura 7.21 – *Auditório*, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Resultado com proporções de Bolt, Beranek e Newman: (A) não adequadas; (B) adequadas.

7.5.2.2.2 *Auditório: critério de Bonello*

$$L \times W \times H = 10,10 \times 19,15 \times 7,30m$$

(A) antes



$$L \times W \times H = 10,10 \times 17,00 \times 7,30m$$

(B) depois

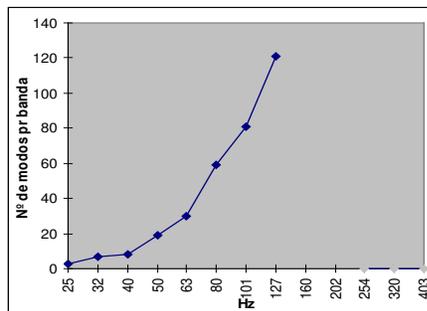


Figura 7.22 – *Auditório*, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Diagrama do *critério de Bonello*: (A) Ligeira perda em 40Hz e reforço m 50 e ligeiro em 80Hz; (B) Ligeiro reforço em 32Hz, reforço em 80Hz e ligeira perda em 40Hz.

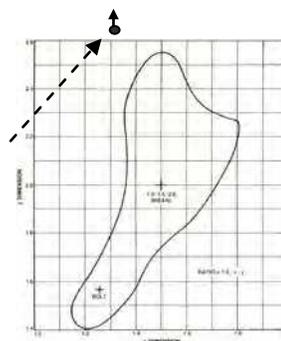
7.5.2.2.3 Cabine: Bolt, Beranek e Newman

$$L \times W \times H = 10,1 \times 3,2 \times 4,2 \text{ m}$$

$$z/z_c : x/z_c : y/z_c$$

$$(1,00 : 1,31 : 3,16)$$

(A) antes



$$L \times W \times H = 6,9 \times 3,0 \times 4,0 \text{ m}$$

$$z/z_c : x/z_c : y/z_c$$

$$(1,00 : 1,33 : 2,30)$$

(B) depois

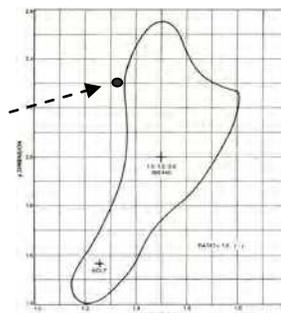
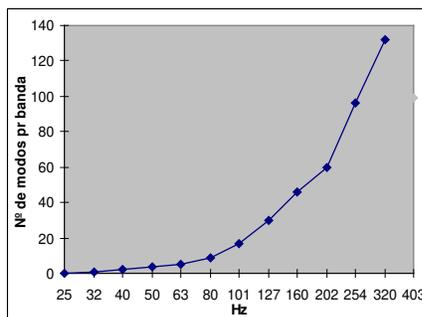


Figura 7.23 – Cabine, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Resultado com proporções de Bolt, Beranek e Newman: (A) fora da área e mesmo fora do quadro – não adequada; (B) próxima ao limite.

7.5.2.2.4 Cabine: critério de Bonello

$$L \times W \times H = 10,1 \times 3,3 \times 4,2 \text{ m}$$

(A) antes



$$L \times W \times H = 6,9 \times 3,0 \times 4,0 \text{ m}$$

(B) depois

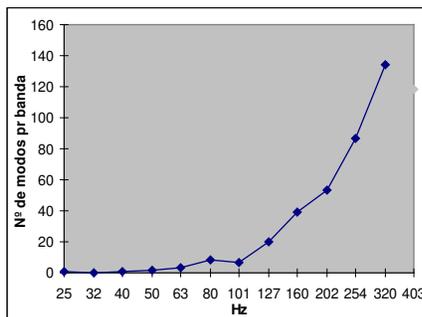


Figura 7.24 – Cabine, Sala Villa-Lobos, Uni-Rio. Diagrama do critério de Bonello: (A) Perda em 202Hz; (B) Perda em 101Hz e ligeira em 202Hz.

7.5.2.3 Análises

As dimensões (A), tanto ao *auditório* quanto à *cabine*, não são viáveis. Os resultados das dimensões (B), embora em posição limite, são bem mais adequados.

7.5.2.3.1 *Cabine de controle de gravação*

A partir da década de 1980 cabines de controle dos estúdios foram concebidas com princípios conhecidos por *LEDE* (*live end dead end*) e *RFZ* (*reflection free zone*) (DAVIS, 1987, p. 219-234). Nos estúdios a cabine de controle é onde se encontram *engenheiro de som*, *produtor*, *tonmeister* e deve ser um local com acústica limpa e neutra, permitindo monitorar, sem qualquer interferência, o material sonoro produzido, o ambiente e a sensação espacial do local da gravação ou o espaço sintético criado em pós-produção. Na concepção *LEDE* a projeção sonora a partir dos monitores em direção a um ponto central da sala ocorre de tal forma que nesse ponto cheguem ao ouvinte o som direto gravado e como *primeiras reflexões* somente as naturais do espaço acústico em controle (o local onde a gravação está sendo ou foi realizada, o ambiente sintético criado em pós-produção). Não há, portanto, interferência nociva das reflexões nas partições da cabine de controle, pois estas chegam aos ouvidos da equipe de produção posteriormente, sem que isso distorça a percepção acústica do local em controle. Uma das maneiras de chegar a esse resultado é fazer com que toda parte dianteira da cabine, bem como as laterais, sejam secas, absorvendo qualquer onda emanando dos monitores de controle. Isso significa *dead end*, ou seja, todo som incidindo na parte dianteira e lateral da cabine é absorvido. A parte traseira pode ser revestida com materiais reflexivos, *live end*, proporcionando, pelo efeito Haas, reflexões mascaradas após o som direto recebido dos monitores. Geralmente nesta parte da cabine são instalados difusores proporcionando uma espacialidade mais agradável numa pequena sala de monitoração.

Ainda é possível criar na região central de controle uma *zona livre de reflexões* (RFZ), orientando as superfícies de modo que não haja reflexão especular inicial atingindo a posição de escuta.

A principal dificuldade com relação à *cabine de controle de gravação* na Sala Villa-Lobos foi conceber um espaço de monitoramento adequado tendo como imposição a limitação de espaço no sentido da profundidade (3,00 a 3,20m).

7.5.2.3.2 *Auditório*

Após a adequação das dimensões do *auditório* foi preciso assegurar bons resultados aos parâmetros exigidos a uma sala de concerto, tanto no tratamento interno quanto no isolamento com o meio externo. Adotar as dimensões (B) para o *auditório* significou eliminar 12 assentos da platéia sob o mezanino.

7.5.2.4 Soluções

Assim como no estudo de caso anterior, implementaram-se neste projeto elementos difusores visando minimizar os efeitos dos *modos normais axiais*, proporcionando ao mesmo tempo melhorias nos seguintes parâmetros: *vivacidade* (RT_{60} e EDT), *preenchimento do som*, *espacialidade*, *fração de energia lateral* (LF), *center time* (CT), *difusão*, *balanço*, *mistura*, *conjunto*, *ausência de eco* e *uniformidade*.

O emprego de materiais prioritariamente reflexivos assegura melhores resultados aos parâmetros *vivacidade* (RT_{60} e EDT), *preenchimento do som*, *brilho*. É preciso contudo cuidado para não prejudicar o *tonal balance* (TB) com reflexões, ondas estacionárias e *comb filters*.

A autorização para eliminar 12 assentos da Sala Villa-Lobos foi obtida, porém nenhuma poltrona a mais poderia ser eliminada, fazendo com que a angulação entre as paredes laterais paralelas fosse mais limitada do que se esperava, suscitando uma concepção alternativa.

Quanto ao contorno geral interno e a orientação das partições da *cabine de controle de gravação* buscou-se, além de proporcionar uma RFZ na região central, revestir a parte dianteira com material absorvente (*dead end*), tendo por trás uma superfície difusora (*live end*) devendo ocupar um espaço mínimo de instalação. Buscou-se combinar dos dois princípios de *design* de cabines de controle de gravação RFZ e LEDE com o objetivo de minimizar interferências negativas decorrentes das pequenas dimensões do local.

7.6 PROPOSTAS DE DESIGN DE DIFUSORES ATENDENDO ÀS NECESSIDADES DOS ESTUDOS DE CASO

Dada a complexidade de realização dos difusores baseados em *reflexão com interferência de fase*, além de suas características de absorção e frequências críticas, nesta pesquisa foram

buscadas soluções compreendendo praticidade de montagem, performance efetiva de difusão sem perda de energia e em largo âmbito de frequência.

Considerando:

- as qualidades exigidas de um difusor, conforme visto no *item 5.1*,
- a melhor performance de difusores com perfis contínuos arredondados, conforme exposto no *item 5.2*,
- as propriedades estruturais positivas das seqüências de números inteiros associadas à organização serial e aos diferentes tipos de simetria;

foram imaginadas superfícies irregulares com contornos contínuos lineares e arredondados, concebidas por procedimentos empregando modelagem musical serial.

Para isso foi generalizada a aplicação da organização serial para modular parâmetros de propriedades dos elementos bem como parâmetros relacionais entre elementos.

7.6.1 Design a partir da organização serial e de superfícies contínuas e arredondadas

Considerando as qualidades exigidas de um difusor, a melhor performance de difusores com perfis contínuos e arredondados e as propriedades estruturais positivas das seqüências de números inteiros juntamente à organização serial foram concebidas superfícies difusoras irregulares, lineares e arredondada, de forma a produzir difusão num largo âmbito de frequências, inclusive atuando sobre os *modos normais* de uma pequena sala.

À luz do *serialismo integral* (Cf. *item 6.2*, p. 194) a aplicação da organização serial foi generalizada, estendendo-se, além das profundidades de cavidades, o que se verifica nos difusores por interferência de fase, agora a diversos parâmetros como: dimensões de elementos, rotação horizontal (rotação sobre o eixo vertical; esquerdo-direita), rotação vertical (rotação sobre o eixo horizontal; para cima-para baixo).

As soluções aqui propostas buscam minimizar:

- 1) atenuação da onda refletida espalhada;
- 2) respostas ineficientes nas frequências críticas, propondo ao mesmo tempo;
- 3) complexidade de fatura.

Diminuir a atenuação da onda refletida espalhada significa potencializar o *tempo de reverberação* do local, o que tem impacto direto sobre um dos principais parâmetros de qualidade para salas de concerto, *fullness of tone* (*preenchimento do som*). Por sua vez, o *tempo de reverberação* depende diretamente do *volume*, portando, das medidas do local. As propostas aqui apresentadas podem contribuir para potencializar o *tempo de reverberação* em *pequenas salas*, uma vez que estas possuem pequeno *volume*.

Sabendo que a razão da perda de energia ocorre em difusores por reflexão com interferência de fase é causada pelo seqüenciamento abruptamente articulado entre cavidades ou saliências impondo à onda refletida diferenças de fase, portanto, interferências (*Cf. 4.6.1, p. 162 et seq.*), nesta pesquisa os difusores realizados foram concebidos trocando as articulações francas entre os elementos por superfícies contínuas, evitando deste modo turbulências e ressonâncias (*Cf. p. 165*), que são a causa tanto da absorção de energia quanto da defecção de espalhamento da onda incidente.

As superfícies propostas têm orientação estrutural definida, com o objetivo de minimizar ondas estacionárias ocasionando *modos axiais* que, pela simetria do contorno, tem seus máximos e mínimos de pressão concentrados em determinadas localidades. Portanto, além do espalhamento sonoro, os difusores propiciam uma participação mais harmoniosa e sinérgica dos *modos normais*, tornando a resposta em frequência uniforme e regular dos tempos de reverberação um objetivo possível e viável em projetos acústicos.

7.6.2 Proposta 1 : Superfícies seriais difusoras lineares – LNSS

São superfícies compostas de painéis de larguras variáveis, articulados por eixos, paralelos e perpendiculares ao sentido do alinhamento dos painéis. Consideremos inicialmente dois parâmetros aplicados a um conjunto de painéis dispostos lado a lado: 1º parâmetro: largura dos painéis; 2º parâmetro: rotação entre os planos das superfícies dos painéis.

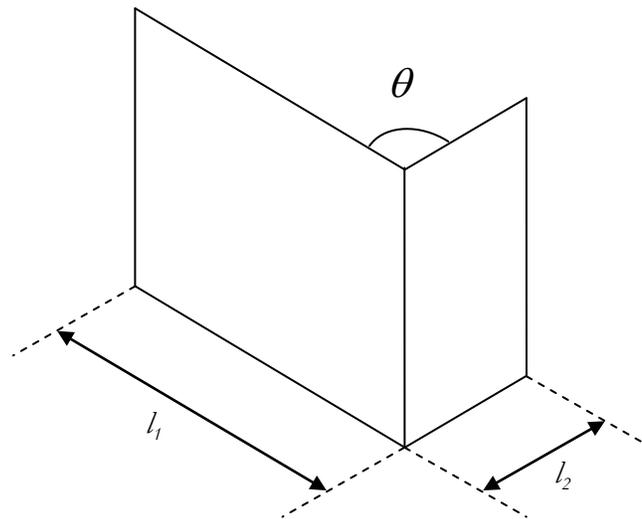


Figura 7.25 – Painéis justapostos.

Além de uma *solução linear* onde os painéis são placas retangulares, há uma *solução arredondada* onde as placas planas podem ser substituídas por elementos arqueados com profundidade de aproximadamente $b = 0,2.l$, sendo $l(L)$ o comprimento de cada painel.

Através de um *algoritmo* descrito adiante, alimentado por uma *série de números inteiros* – no exemplo da *Figura 7.26*, $\sigma_{g_{15}} A$, com 15 números inteiros entre 0 e 11, sendo os termos pares (σ_{2k}) associados a inteiros pares (0, 2, 4...) e os termos ímpares (σ_{2k-1}) associados a inteiros ímpares (1, 3, 5...) – obtém-se uma seqüência de painéis articulados, criando algo semelhante a um biombo onde cada aba variasse de tamanho (Cf. *Figura 7.27 (A)*). Observe na *Figura 7.26* a variação do comprimento dos segmentos, a angulação da articulação, e como os segmentos têm suas perpendiculares voltadas a direções diferentes. Se considerarmos que estamos adicionando uma nova superfície a uma partição inicial original, a inclinação geral do eixo da nova parede em relação a outras partições paralelas à superfície inicial deveria ter uma inclinação de pelo menos 5°

(cinco graus) (DE MARCO, 1982, p. 111) (EVEREST e SHEA, 1988a, p. 183-184), inibindo assim a formação de *modos normais axiais*. A seqüência de segmentos assim gerada pode ser ‘levantada’ em painéis como uma parede difusora (*Figura 7.27 (A)*). Para aumentar a eficiência do espalhamento, cada placa plana pode ser substituída por um elemento arqueado (*Figura 7.27 (B)*).

	σg	x	y	l	θ ângulo adicionado	ângulo resultante
d ₀	0	0,25	-0,17	0,3	-34,7 °	-34,7 °
d ₁	1	1,21	-0,05	0,968	42,1 °	7,4 °
d ₂	4	1,57	-0,60	0,659	-64,3 °	-56,9 °
d ₃	7	2,07	-0,31	0,585	86,5 °	29,6 °
d ₄	2	3,08	-0,67	1,065	-49,5 °	-19,9 °
d ₅	3	3,55	-0,31	0,599	56,9 °	37 °
d ₆	10	3,80	-1,05	0,778	-108,7 °	-71,7 °
d ₇	1	4,64	-1,53	0,968	42,1 °	-29,6 °
d ₈	0	4,84	-1,93	0,45	-34,7 °	-64,3 °
d ₉	9	5,40	-1,51	0,707	101,3 °	37 °
d ₁₀	6	6,56	-2,55	1,559	-79,1 °	-42,1 °
d ₁₁	11	6,91	-1,32	1,284	116,1 °	74 °
d ₁₂	6	7,44	-1,37	0,531	-79,1 °	-5,1 °
d ₁₃	1	8,21	-0,78	0,968	42,1 °	37 °
d ₁₄	8	8,74	-1,59	0,965	-93,9 °	-56,9 °

Tabela 7-3 – Resultados obtidos na planilha de cálculo para a *superfície $\sigma_{g_{15}} A$* .

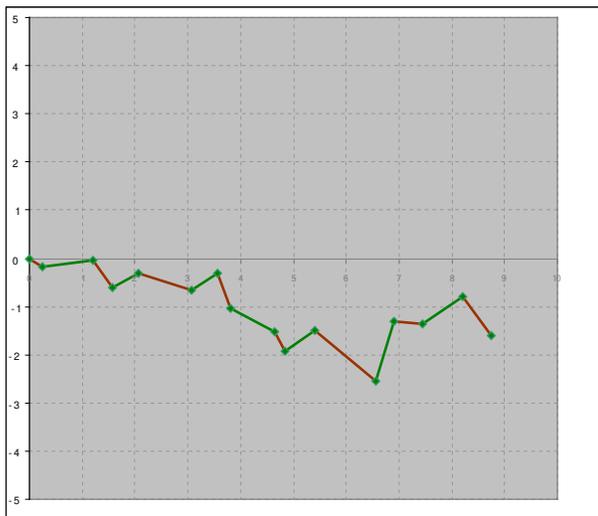


Figura 7.26 - *Superfície $\sigma_{g_{15}} A$* – vista superior de uma superfície LNSS e na tabela acima detalhamento das coordenadas e ângulos da mesma. A superfície LNSS pode ser comparada a um biombo com abas de diferentes tamanhos. Vista de cima seu aspecto é de segmentos que se articulam por um eixo de rotação.

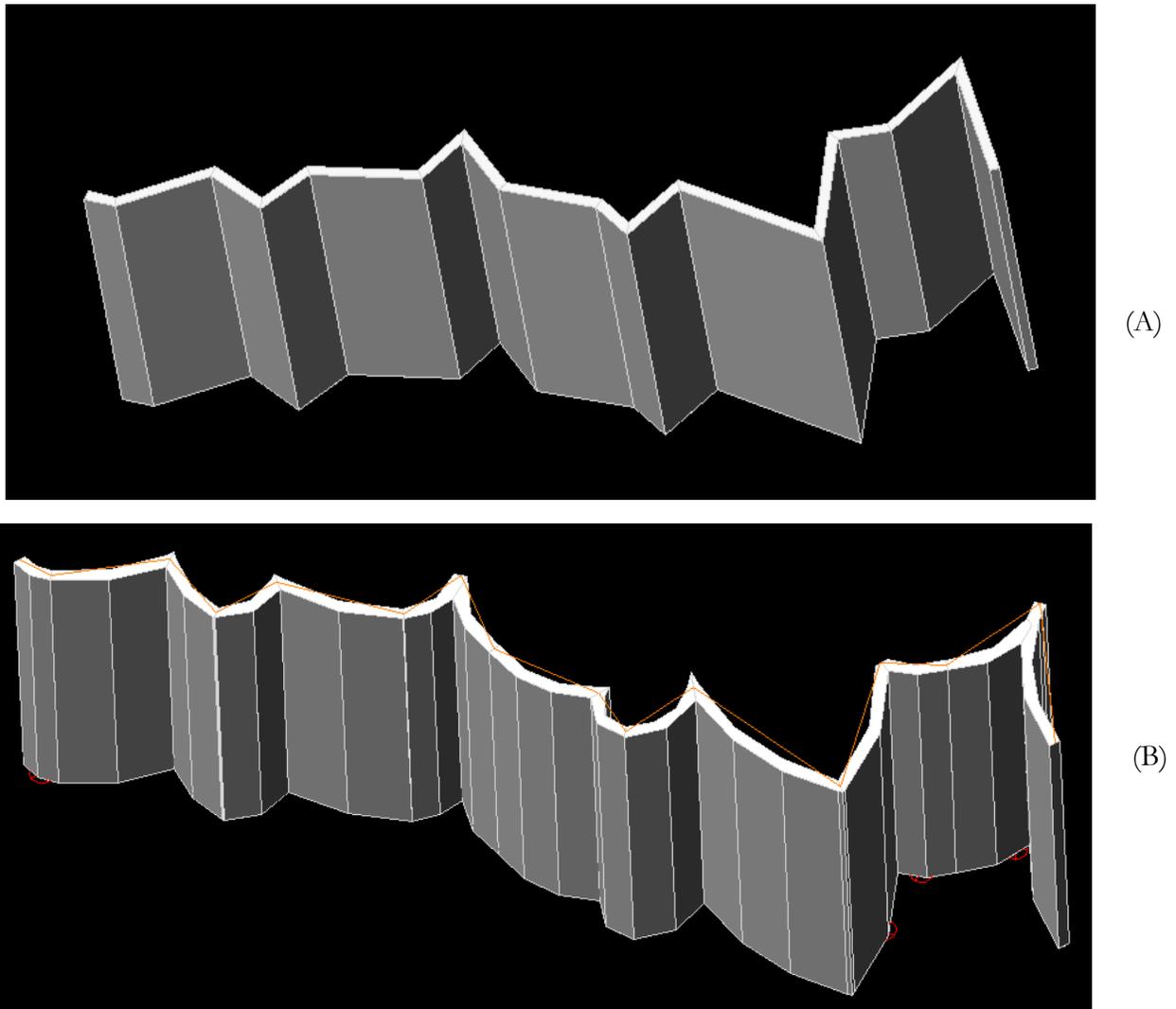


Figura 7.27 - Superfície $\sigma_{g,15} A$ – aspecto concluído da superfície gerada: (A) solução linear e (B) solução arredondada.

7.6.2.1 Algoritmo (*Série submetida a relação cruzada*)

Uma seqüência de M números inteiros variando de 0 a $N-1$ (Cf. Eq. 7-3) controla unidades de incremento dos valores básicos de parâmetros: 1) fator de incremento do crescimento exponencial do comprimento (β); e 2) ângulo básico inicial de inclinação entre os segmentos (entre os painéis) (θ_{base}) gerando, dessa forma, uma superfície.

Cada seqüência de números inteiros dará origem a uma estrutura básica de superfície específica, gerando por cruzamento potencialmente tantas superfícies quanto forem as combinações dos parâmetros β e θ_{base} . Como esse cruzamento permite resultados com aspectos variados porém relacionados a uma mesma origem, foi considerada como *série submetida a relação cruzada*.

$$\sigma g_M = (\sigma_0, \sigma_1 \dots \sigma_{M-1}) \mid 0 \leq \sigma_i \leq (N-1) \quad \text{Eq. 7-3}$$

Para $M=15$ e $N=12$, $\sigma g_{15} = (\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7, \sigma_8, \sigma_9, \sigma_{10}, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14})$ sendo $0 \leq \sigma_i \leq 11$. Temos assim na *Figura 7.26* a seqüência: $\sigma g_{15} \mathcal{A} = (0, 1, 4, 7, 2, 3, 10, 1, 0, 9, 6, 11, 6, 1, 8)$ onde a cada termo ímpar está associado um inteiro ímpar e a cada termo par, um inteiro par.

7.6.2.2 Comprimento de cada segmento (l)

Pelo menos três fatores de proporção de largura devem ser definidos entre 0 e 1⁴⁹, de acordo com seu respectivo e proporcional tamanho (*pequeno, médio e grande*) sendo a quantidade e a ordem estabelecida no *design*. No caso, adotaremos três, sendo estes na ordem *pequeno, grande e médio*. Assim, grupos de três segmentos se alternarão, gerando painéis possuindo superfícies de comprimentos distintos:

$$F_j \begin{matrix} 3 \\ \Rightarrow \\ 1 \end{matrix} \Rightarrow F_1(\textit{pequeno}); F_2(\textit{grande}); F_3(\textit{médio}) \mid 0 < F_j < 1 \quad \text{Eq. 7-4}$$

7.6.2.3 Fator de incremento do crescimento exponencial do comprimento β

Cada segmento terá um comprimento l_i definido em função do *fator de incremento do crescimento exponencial do comprimento*, a base de potência β , determinada no *design* da superfície, sendo esta elevada a cada um dos termos da *série submetida a relação cruzada* σ_i :

⁴⁹ Como uma relação de porcentagem proporcional entre os três comprimentos (p.ex.: 30%, 68% e 93%)

$$l_i = F_j \cdot \beta^{\sigma_i} \mid \beta > 1 \quad \text{Eq. 7-5}$$

Evidentemente quanto maior β , mais os painéis crescem progressivamente e, por consequência, maiores as dimensões finais da superfície obtida.

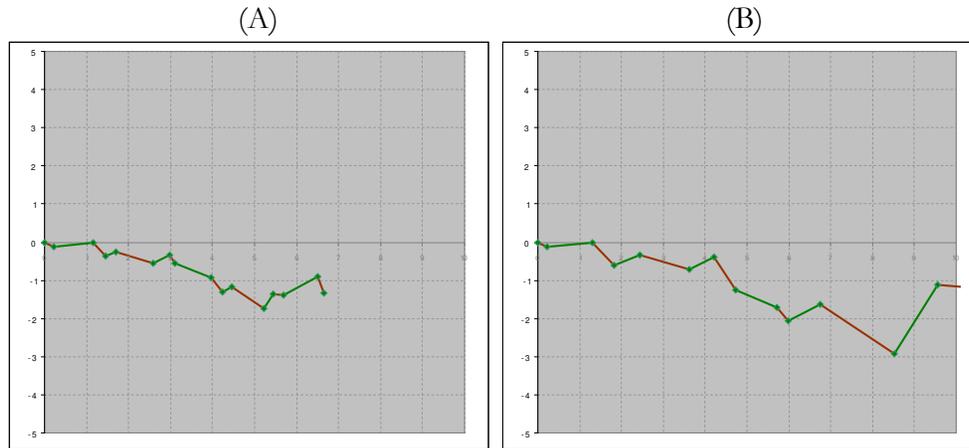


Figura 7.28 – (A) $\beta = 1,0$; (B) $\beta = 1,15$.

7.6.2.4 Inclinação de cada segmento (θ)

O ângulo θ de inclinação entre segmentos (entre painéis) é definido a partir de um ângulo básico inicial θ_{base} mais um valor γ correspondente a quantos graus terá cada *step* (incremento) de variação angular.

$$\theta_i = (\theta_{base} + \sigma_i \gamma) \phi \mid \phi = (-1^{a_i}) \quad \text{Eq. 7-6}$$

Sendo a_i termos da *série submetida a relação cruzada* vista acima e ϕ fator de inversão (permitindo obter a *simetria axial* (inversão em espelho) de toda a superfície) sendo 1 para resultado *original* e -1 para *invertido* (Figura 7.29); e o *step* angular γ um valor geralmente recomendado ao redor de 20% de θ_{base} , sendo que quanto maior for γ , mais acidentada será a superfície e, inversamente, quanto menor, mais suave (Figura 7.30). As potências de -1 nos permite alternar os ângulos, ora para cima, ora para baixo, ou seja, em ziguezague, conforme os números pares e ímpares se seguem. Isso significa o mesmo que uma série alternada de dois termos: $a b a b a \dots$ ou então $+ - + - + \dots$

As seqüências de segmentos assim geradas evitarão qualquer efeito de periodicidade, tendo coesão e unidade e, ao mesmo tempo, irregularidade constante, propriedades como as das simetrias mais complexas.

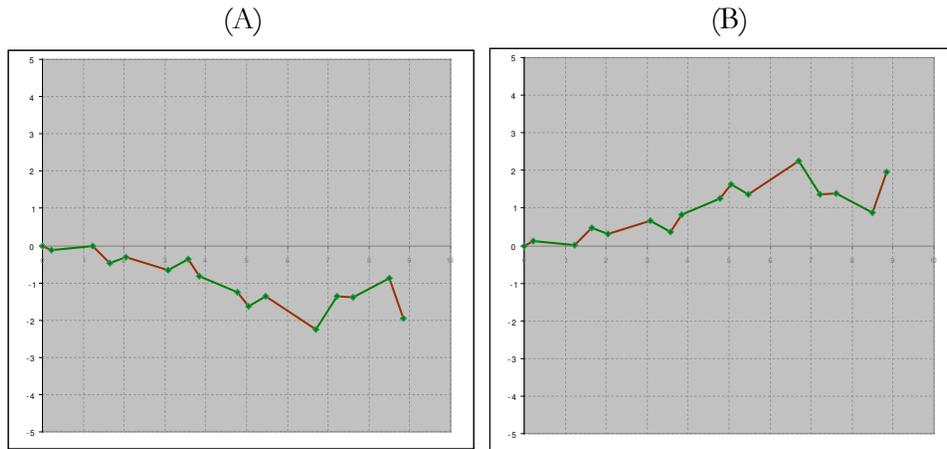


Figura 7.29 – (A) $\phi = -1$ e (B) $\phi = 1$

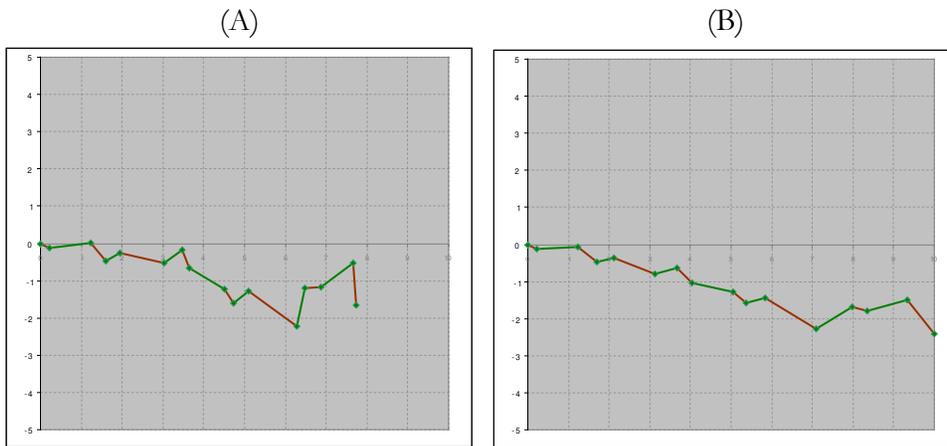


Figura 7.30 – (A) $\gamma = 90^\circ$ e (B) $\gamma = 5^\circ$.

As coordenadas dos pontos num plano cartesiano a ser considerado em escala, ou seja, num plano onde o comprimento total da superfície poderá ser definido através de sua multiplicação por um fator de ampliação ou de redução, são dadas por suas respectivas abscissas e ordenadas:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + l_i \cos \theta_i \mid x_0 = 0 \wedge 1 \leq i \leq N \\ y_i &= y_{i-1} + l_i \text{sen} \theta_i \mid y_0 = 0 \wedge 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad \text{Eq. 7-7}$$

$$x_i = x_{i-1} + l_i \cos \theta_i \mid x_0 = 0 \wedge 1 \leq i \leq N$$

$$y_i = y_{i-1} + l_i \sin \theta_i \mid y_0 = y_{\max} \wedge 1 \leq i \leq N$$

Finalmente, para ampliar o desempenho, cada elemento (painel) poderia ser abaulado (Figura 7.27 (B); Figura 7.31 (B)) com saliência $b = kl$, sendo $0 < k < 1$ e l_i o comprimento de cada placa.

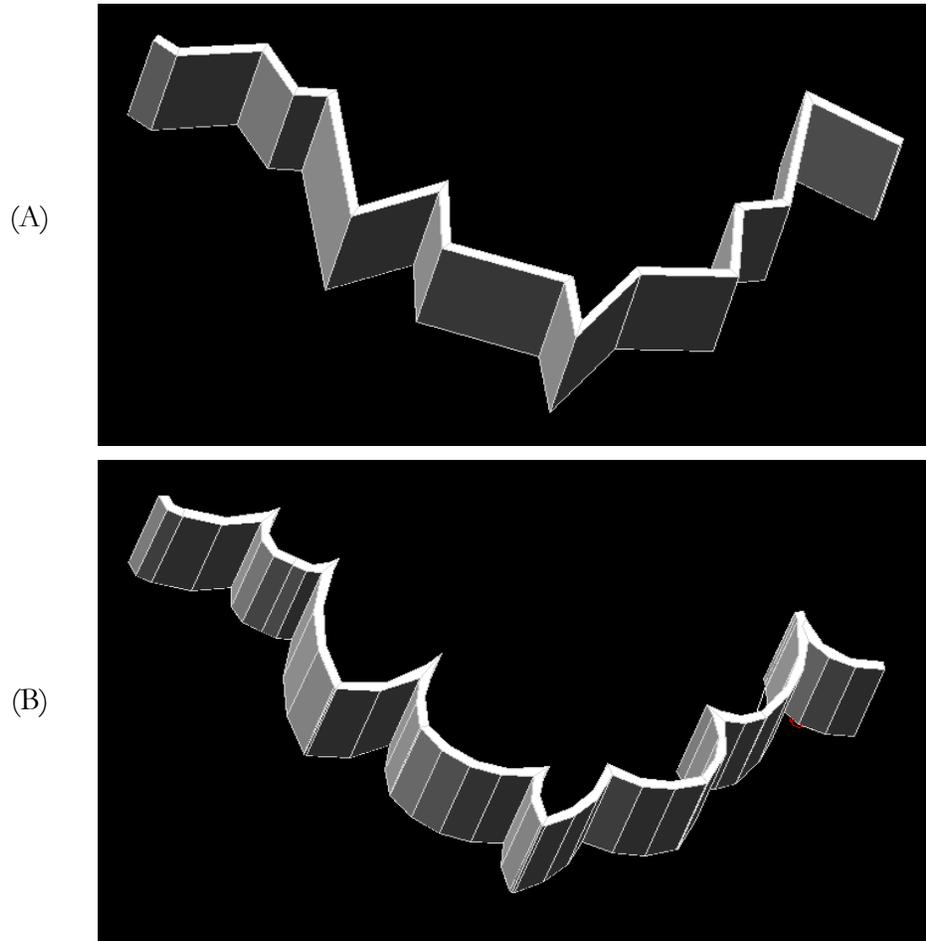


Figura 7.31 - Superfície $\sigma_{g,15} B$ – superfície gerada com outra seqüência, agora com 15 termos e $N=14$:
 (0,1,4,3,6,9,10,5,4,13,2,7,6,5,10) – (A) solução linear; (B) solução arredondada

7.6.3 Proposta 2 : Superfície serial difusora linear articulada em dois eixos ortogonais – LNSS2

Veamos agora uma proposta de superfície como a anterior, porém onde cada elemento poderá ser inclinado para frente e para trás, ou seja, com dois eixos de rotação, tendo para isso três parâmetros:

- **Rotação horizontal**

e = painel virado para a ESQUERDA

d = painel virado para a DIREITA

Série: $\{e, d\}$

Seqüência: $\{e, d, e, d, e, d, e, d, \dots\}$

- **Rotação vertical**

F = painel inclinado para FRENTE

T = painel inclinado para TRÁS

Série: $\{F, T\}$

Seqüência: $\{F, F, T, F, T, T, F, T, F, T, F, F, T, F, T, T, T, F, T, F, F, T, F, T, F, T, F, T, F, T, F, T, F, F, \dots\}$

- **Largura dos painéis**

G = painel GRANDE G_1 (83 cm) G_2 (71 cm)

M = painel MÉDIO M_1 (61 cm) M_2 (51 cm)

P = painel PEQUENO P_1 (43 cm) P_2 (37 cm)

Série: $\{G, M, P\}$

Seqüência: $\{G, M, P, G, G, G, M, P, P, M, G, P, M, M, P, G, G, G, M, P, M, P, P, M, G, G, P, M, G, G, M, \dots\}$

Série: $\{2, 1\}$

Seqüência: $\{2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, \dots\}$

Série composta: $\{G_2, M_1, P_1, G_1, M_2, P_2\}$

Seqüência composta: $\{G_2, M_1, P_1, G_2, G_1, M_2, P_2, P_2, M_2, G_1, P_1, \dots\}$

Reunindo todas as seqüências teremos a série geral composta:

$$\begin{array}{cccccccccccccccc}
 F_e^{G_2} & F_d^{M_1} & T_e^{P_1} & F_d^{G_2} & T_e^{G_1} & T_d^{G_1} & F_e^{M_2} & T_d^{P_2} & F_e^{P_2} & T_d^{M_2} & F_e^{G_1} & F_d^{P_1} & T_e^{M_2} & F_d^{M_1} \\
 T_e^{P_1} & T_d^{G_2} & T_e^{G_1} & F_d^{G_1} & T_e^{M_1} & F_d^{P_2} & F_e^{M_2} & T_d^{P_1} & F_e^{P_2} & T_d^{M_1} & F_e^{G_2} & T_d^{G_2} & T_e^{P_1} & F_d^{M_2} \\
 T_e^{G_1} & F_d^{G_2} & F_e^{M_1} & & & & & & & & & & & &
 \end{array}$$

Figura 7.32 – LNSS2: série geral composta.

Foram empregadas seqüências irregulares sobrepostas proliferando de forma variada as células iniciais evitando, assim, o efeito de periodicidade.

Diversos tipos de Seqüências aplicadas à área de telecomunicações poderiam ser usadas, notadamente seqüências de poucos elementos com boa correlação aperiódica como: Barker, Legendre, Rudin-Saphiro, *M-sequences*, Golay e Chu (FAN e DARNELL, 1996). Porém, esse aspecto requer um estudo mais aprofundado podendo ser realizado ulteriormente como desdobramento deste trabalho.

7.6.3.1 Implementação da série geral composta e adequações

Na *Figura 7.33*, vista superior da série de inclinações de placas.

- Na primeira seqüência, acima, a série simples, com inclinações laterais de 10°;
- Na segunda seqüência a série simples acima com inclinações laterais de 20°;
- Na última seqüência, abaixo, foram inclinados blocos inteiros de placas (estas já inclinadas previamente de 20°), um em relação a outro, para obter efeito de difusão para comprimentos de onda maiores, que poderiam ignorar pequenas irregularidades;

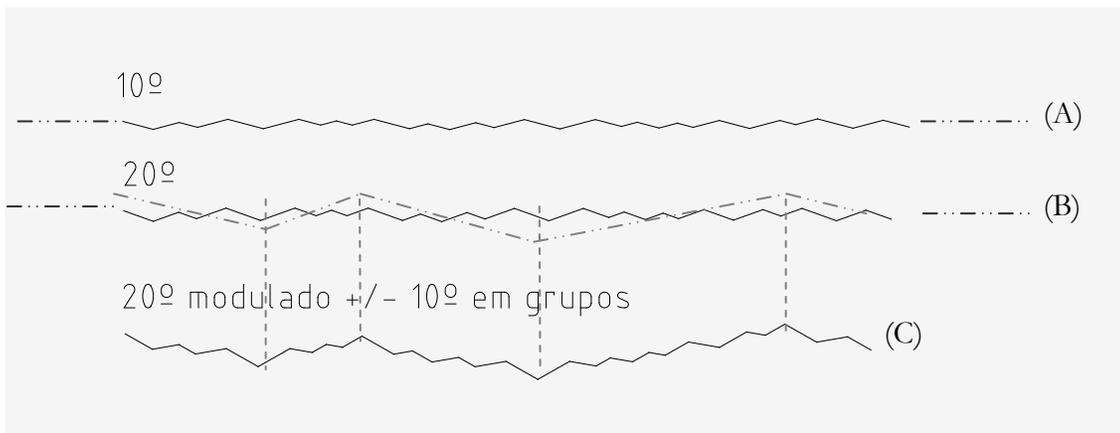


Figura 7.33 – Vista superior do estudo das inclinações esquerdo-direita das placas da superfície. (A) primeira fileira – inclinações de 10°; (B) segunda fileira – inclinações de 20°; (C) terceira fileira – o eixo da fileira com inclinação de 20°, foi modulado mais uma vez, dando inclinações a blocos inteiros de elementos solidários.

Essas inclinações em blocos de elementos agrupados (grupos de placas solidárias) têm por objetivo tornar a superfície efetiva para atuação em baixas frequências.

7.6.3.2 Inclinações frente-trás

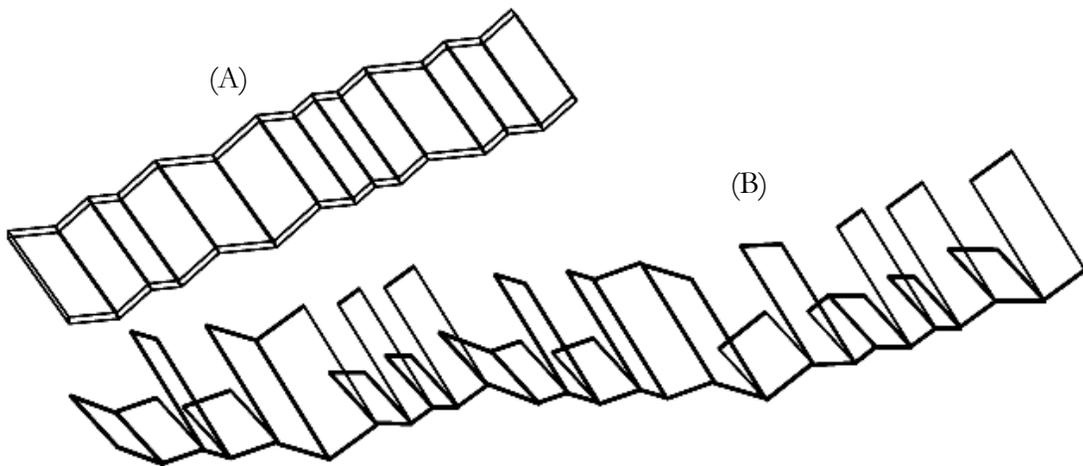


Figura 7.34 – (A) superfície de placas com inclinação lateral: elevação da superfície após procedimento mostrado na *Figura 7.33*; (B) as mesmas placas, porém acrescentando inclinação frente-trás.

Ao produzir a inclinação frente-trás, abre-se um vão triangular entre as placas sucessivas afastadas entre si. Como se trata de uma superfície de difusão, qualquer vão deixaria vaziar a onda incidente, o que pode equivaler a uma absorção. Portanto esse vão deve ser devidamente fechado com placas triangulares tendo o vértice mais agudo apontado para baixo (Figura 7.35).

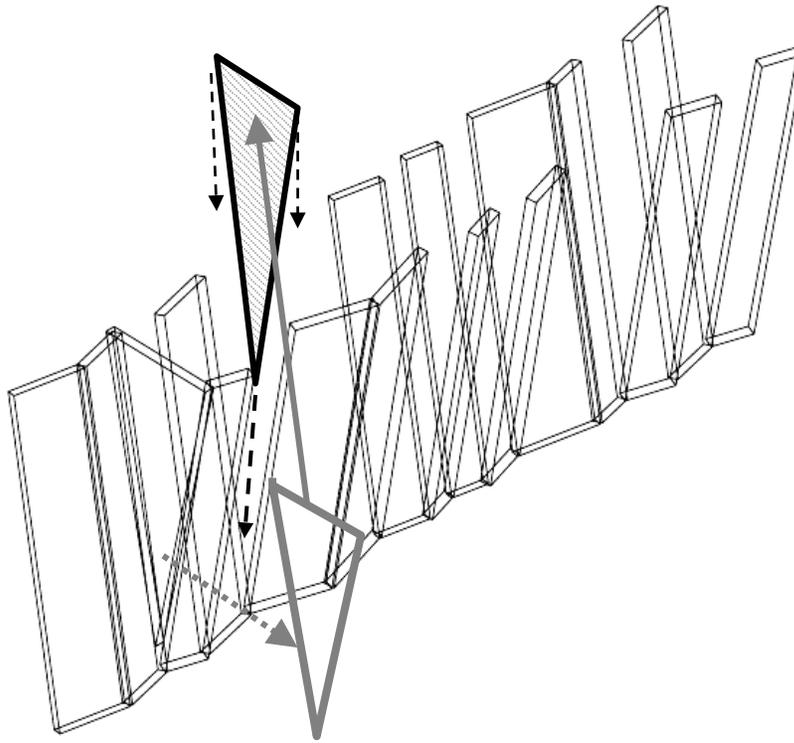


Figura 7.35 – Exemplo de placa triangular para fechamento dos vãos.

Sabendo que placas que coincidirem face a face em planos paralelos podem favorecer o aparecimento de pequenas ondas estacionárias (Figura 7.36) é necessário evitá-las.

Freqüências das estacionárias a serem evitadas:

$$f_1 = \frac{c}{2l} \quad f_2 = 2 \frac{c}{2l} \quad \dots \quad f_n = n \frac{c}{2l}$$

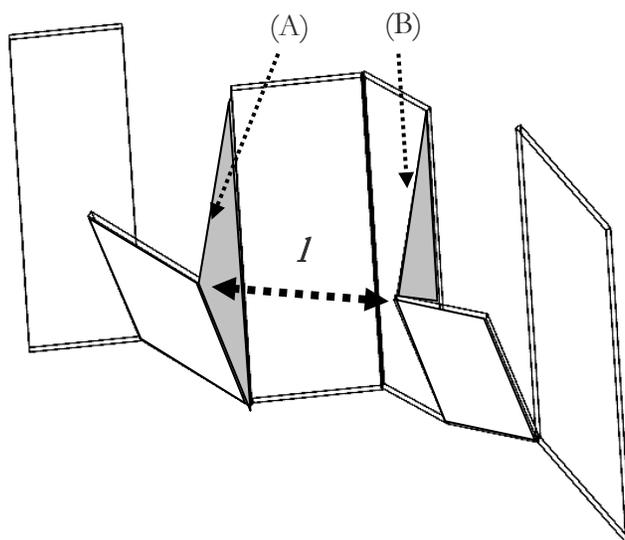


Figura 7.36 - Placas de fechamento (A) e (B) separadas por uma distância l coincidindo na orientação formam superfícies paralelas podendo favorecer o aparecimento de ondas estacionárias.

7.6.3.3 Procedimento para evitar paralelismo entre placas triangulares fechando vãos paralelos produzidos por inclinações frente-trás das placas principais

Ao invés da placa retangular PLR e as respectivas placas de fechamento dos vãos FV_e e FV_d (esquerdo e direito), colocam-se três placas triangulares PLT_1 , PLT_2 e PLT_3 eliminando o paralelismo entre FV_e e FV_d sem quebrar a continuidade da alternância de inclinações (*Figura 7.37*).

Na *Figura 7.38* observam-se três locais onde a seqüência de placas foi alterada evitando paralelismos e a *Figura 7.39* mostra um exemplo de superfície concluída.

Finalmente, para ampliar o desempenho, cada placa poderia ser abaulada com saliência $b = kl_p$, sendo $0 < k < 1$ e l_i a largura da placa, conforme o procedimento final em *LNSS*.

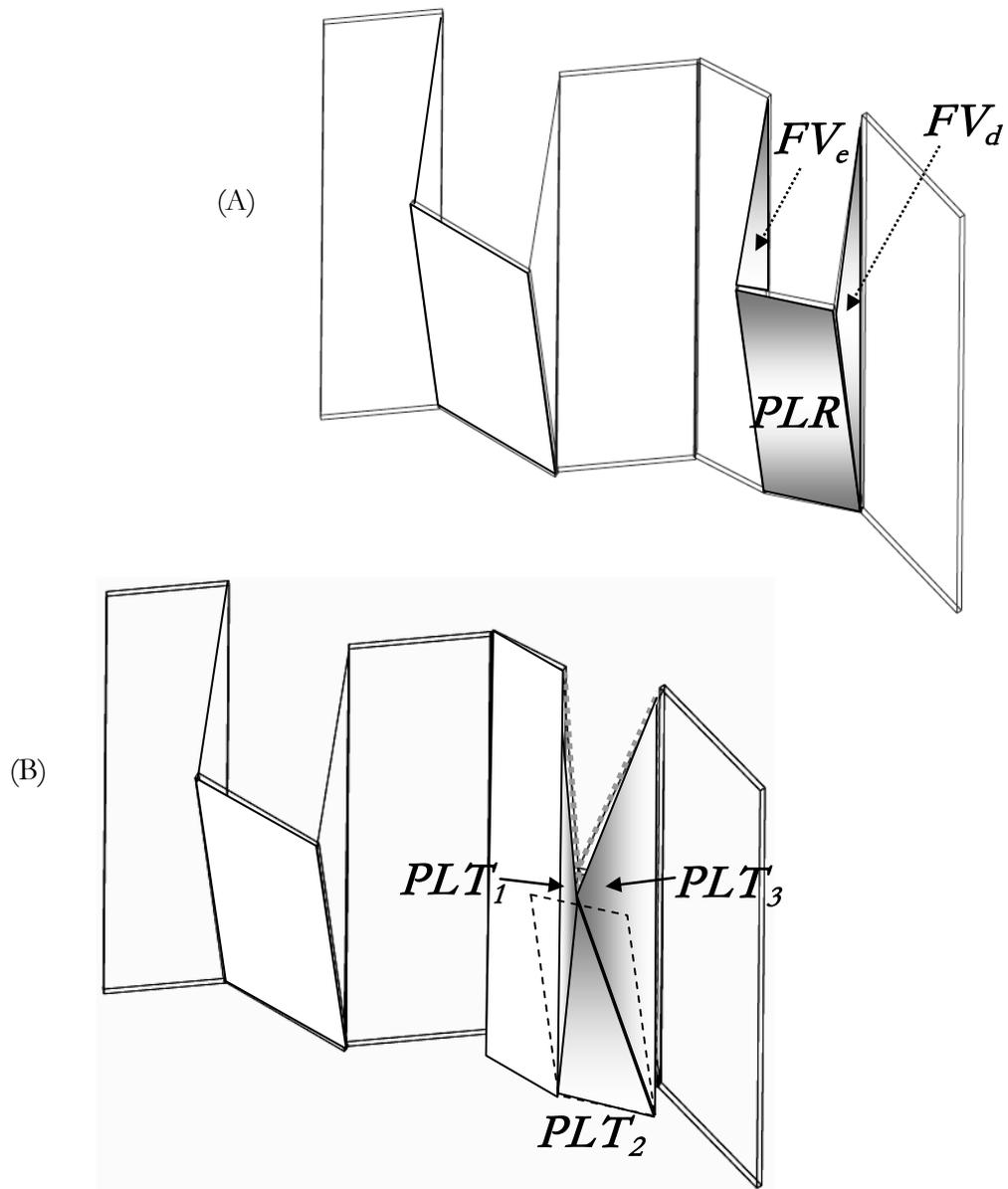


Figura 7.37 – Conjunto de três placas triangulares (PLT_1 , PLT_2 e PLT_3) em (B) substituindo em (A) a placa retangular PLR e suas duas placas laterais de fechamento (FV_e e FV_d).

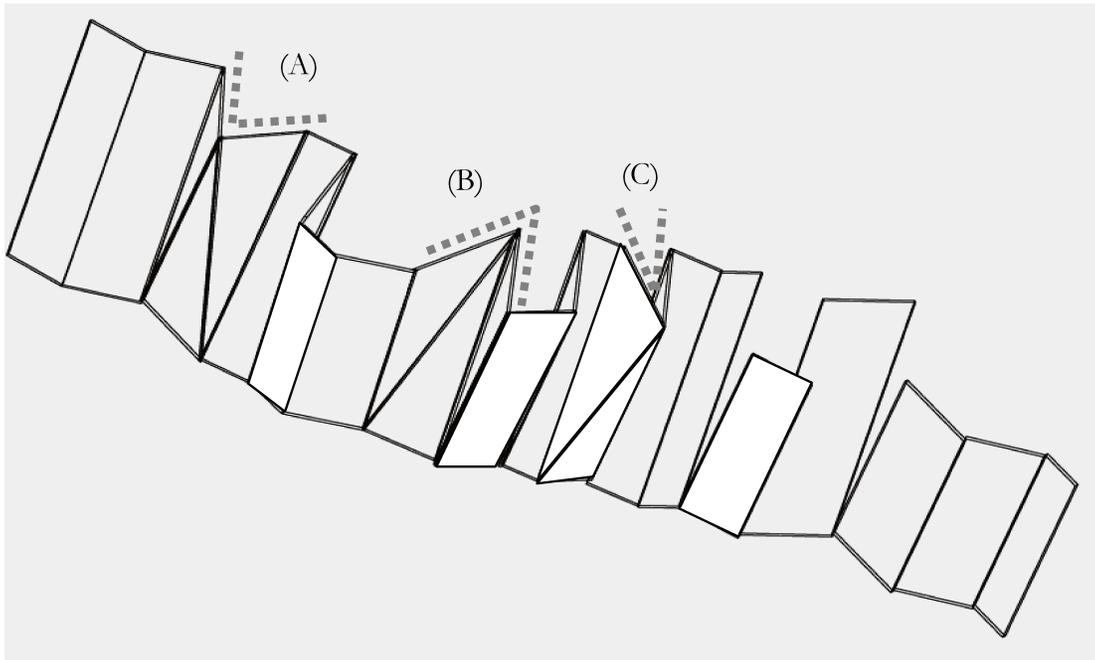


Figura 7.38 - Exemplo de uma superfície serial LNSS2 com duas rotações. Em (A), (B) e (C) elementos com espaços já preenchidos por placas triangulares. À direita ainda permanecem vãos produzidos pela inclinação frente-trás.

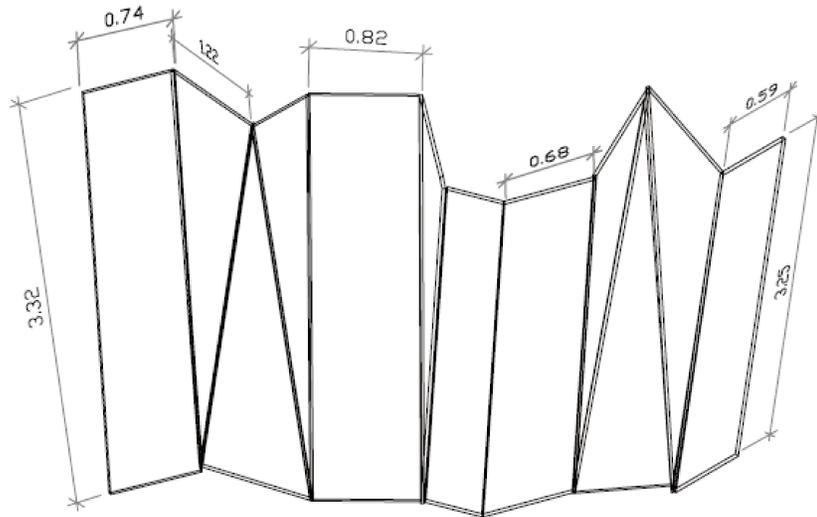


Figura 7.39 – LNSS2 com algumas medidas (m).

7.6.4 Proposta 3 : Superfície serial difusora com elementos cilíndricos ou semicilíndricos – SCSS

Esta proposta consiste no alinhamento de uma série de tubos em meia cana fixados contra uma superfície plana, sendo esta inclinada de pelo menos 7° (sete graus) em relação à uma outra eventual superfície paralela no mesmo local. Caso a inclinação deva ser subdividida, por exemplo, em duas inclinações, o ângulo de desvio deve ser maior que 5°, cada segmento tendo pelo menos comprimento $l = 2\lambda_0 = 2c/f_0$, sendo c a velocidade de propagação do som no ar e f_0 a frequência mais baixa para a qual se esteja evitando modos normais (ondas estacionárias) no local.

Operacionalmente, a maneira mais fácil e econômica de cortar os tubos é pela metade (meia cana), tendo cada elemento profundidade:

$$h_i = \frac{\sigma_i}{2}$$

Mas outras relações podem existir:

$$h_i = k \frac{\sigma_i}{2} \mid 0 < k \leq 1 \quad \text{Eq. 7-8}$$

atentando para o fato de que um k demasiadamente pequeno, tende a produzir menos espalhamento da onda, além da fatura da superfície se tornar bem mais trabalhosa.

Como exemplo: Tendo nove diferentes diâmetros de tubos trabalharemos com Módulo 9, distribuindo seqüencialmente os diâmetros em ordem crescente pelos termos na mesma ordem: 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400 e 500mm (*Tabela 7-4*).

MODULO 9	
0	50 mm
1	75 mm
2	100 mm
3	150 mm
4	200 mm
5	250 mm
6	300 mm
7	400 mm
8	500 mm

Tabela 7-4 – Distribuição dos diâmetros dos tubos em meia cana associados a termos de uma série de números inteiros, no caso de 1 a 9. Evidentemente trata-se somente de uma tabela de associação, sendo a série empregada estabelecida logo a seguir.

Definindo uma série em Módulo 9, conforme a *Eq. 3-2 (p. 69)*, obtemos uma série com *simetria interna axial (inversão)*:

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8
3	1	7	5	6	8	2	4

Tabela 7-5 – Seqüência de oito termos com *simetria axial de Valor Inverso a um Módulo*.

Aplicando a seqüência aos termos ordenados da *Tabela 7-4* resulta:

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8
3	1	7	5	6	8	2	4
150 mm	75 mm	400 mm	250 mm	300 mm	500 mm	100 mm	200 mm

A partir da *Eq. 3-2 (p. 69)* ampliaremos esta seqüência modulando-a por ela mesma da seguinte forma:

$$\sigma_{ji} = \left(\sum_{j=0}^N \sigma_j + \sum_{i=1}^N \sigma_i \right) \bmod N \mid \sigma_0 = 0 \quad \text{Eq. 7-9}$$

Temos assim a seqüência de tubos em meia cana = {150, 75, 400, 250, 300, 500, 100, 200, 300, 200, 75, 500, 50, 100, 250, 400, 200, 100, 500, 300, 400, 50, 150, 250, 75, 500, 250, 150, 200, 300, 50, 100, 500, 300, 150, 75, 100, 200, 400, 50, 50, 400, 20, 100, 150, 250, 500, 75, 100, 50, 300, 200, 250, 400, 75, 150, 250, 150, 50, 400, 500, 75, 200, 300, 400, 250, 100, 50, 75, 150, 300, 500} (mm)

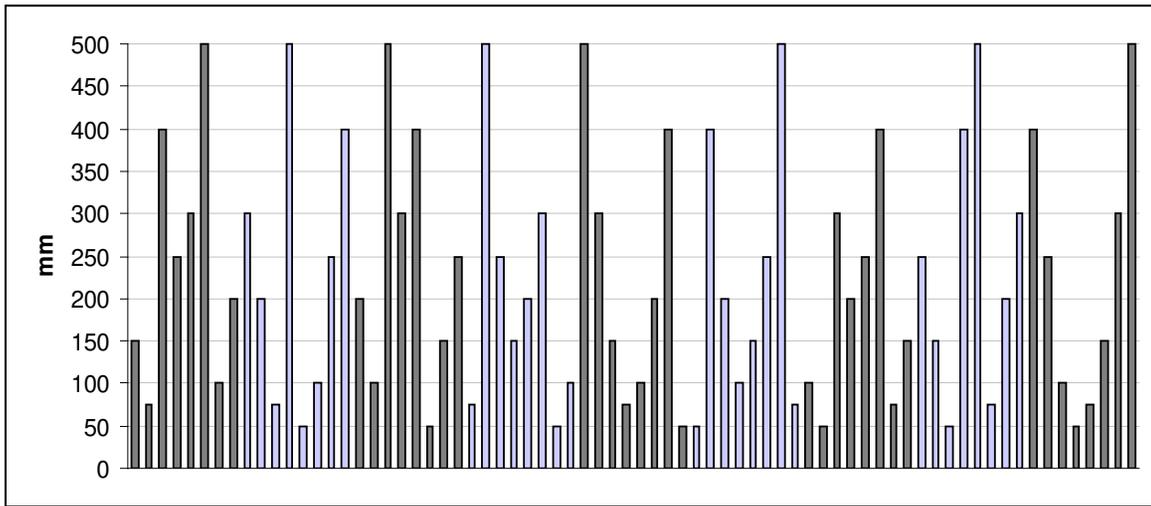


Figura 7.40 – *SCSS*: visualização da variação entre os diâmetros dos tubos correspondendo aos elementos semicilíndricos dispostos lado a lado.

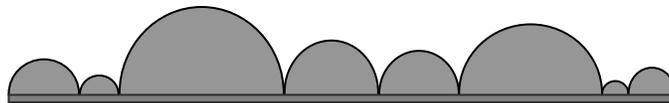


Figura 7.41 – Segmento inicial do seqüenciamento elementos semicilíndricos da Figura 7.40.

7.7 SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE SUPERFÍCIES DIFUSORAS POR ANÁLISE MODAL EM APLICATIVO DE ELEMENTOS FINITOS

Através do aplicativo de *design* e análise ANSYS, permitindo predição de comportamento de sistemas mecânicos, do Laboratório de Mecânica Computacional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, foi efetuada simulação para observar os modos atuando em uma sala quadrangular de referência (QUAD)⁵⁰, sem tratamento, comparativamente a duas soluções modificadas com base na *Proposta 1* (LNSS)⁵¹ e na *Proposta 3* (SCSS)⁵² desta pesquisa, onde somente uma das paredes recebeu tratamento para proporcionar difusão.



Figura 7.42 – Análise modal: sala de referência com estrutura de malhas.

⁵⁰ Quadrilátero

⁵¹ Superfície serial linear

⁵² Superfície serial semicilíndrica

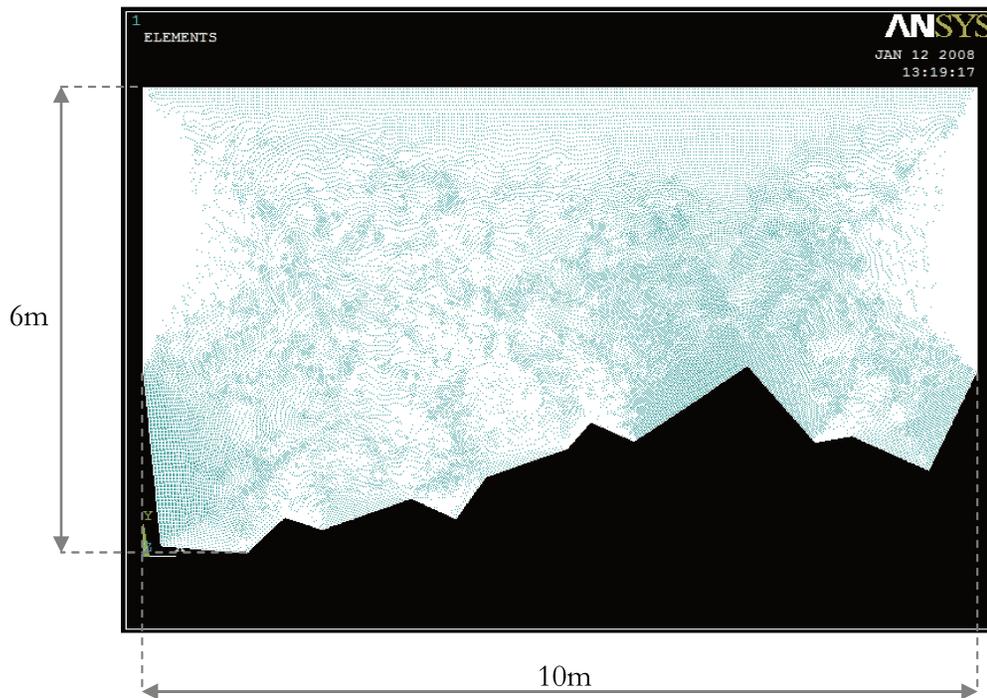


Figura 7.43 – Análise modal: sala com uma superfície modificada – *superfície serial linear* (LNSS).

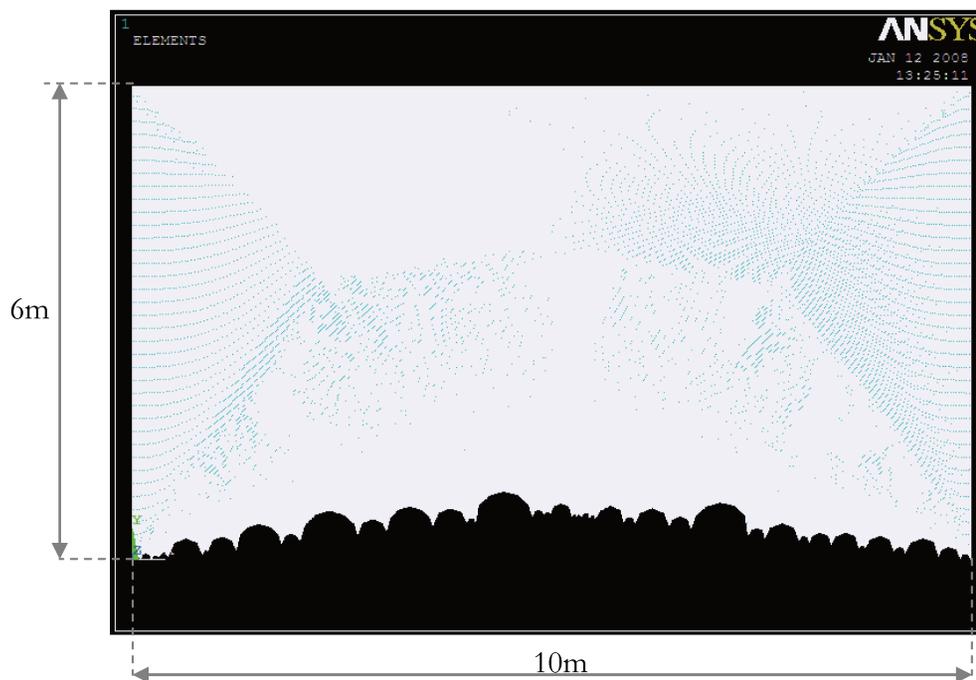


Figura 7.44 – Análise modal: sala de referência tendo uma superfície modificada com *superfície serial com elementos semicilíndricos* (SCSS).

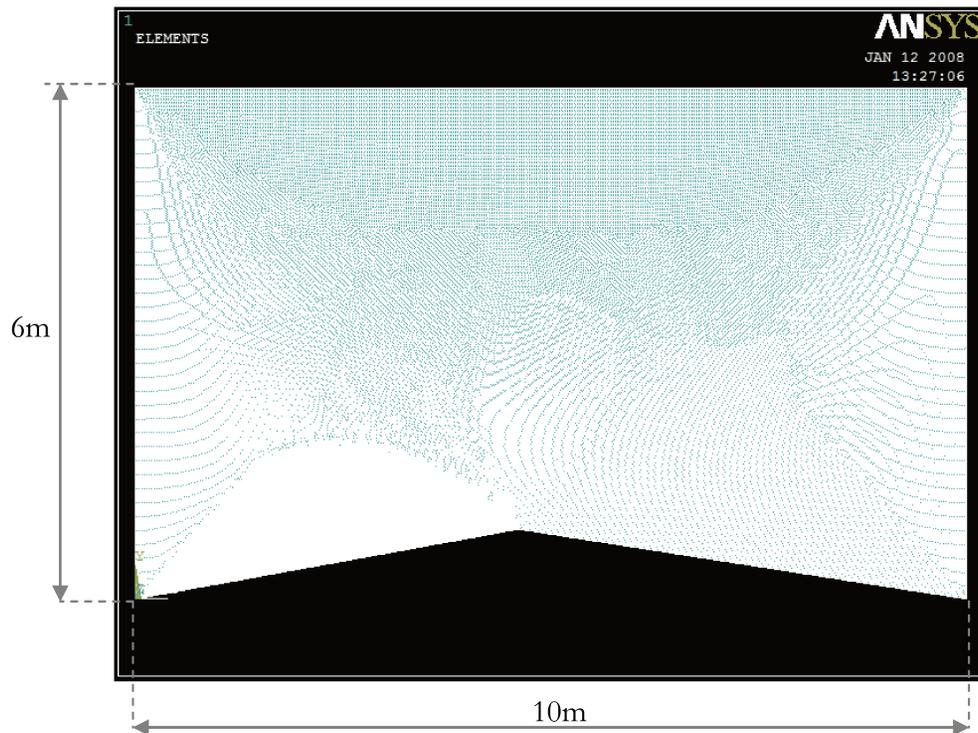


Figura 7.45 – Análise modal: sala modificada com SCSS reduzida a modelo linear, contendo somente com os eixos unindo os centros dos círculos que seccionam os cilindros (RLN SCSS).

Com relação à solução da *Proposta 3 (SCSS)*, para avaliar a partir de que frequência estaria efetivamente atuando o tratamento serial, foi ainda efetuada análise modal de uma sala (*Cf. Figura 7.45*) contendo, ao invés da superfície de elementos semicilíndricos, somente uma parede com as inclinações dos eixos das circunferências que seccionam os cilindros (RLN SCSS)⁵³.

Dessa forma pode-se saber o que é devido à inclinação das superfícies e o que é devido à seqüência serial de diâmetros dos elementos. As simulações foram efetuadas em duas dimensões, a partir da vista superior (planta) da sala de referência e das soluções desenvolvidas.

⁵³ *Redução linear de superfície serial semicilíndrica*

Apesar da simulação bidimensional, as dimensões da *sala de referência* foram determinadas de acordo com o *critério de Bonello*⁵⁴ (Cf. 3.2.13.1, p. 97) e o Diagrama de Bolt, Beranek e Newman (Cf. 3.2.13.2, p. 100), a saber, $L \times P \times H = 10 \times 6 \times 4\text{m}$.

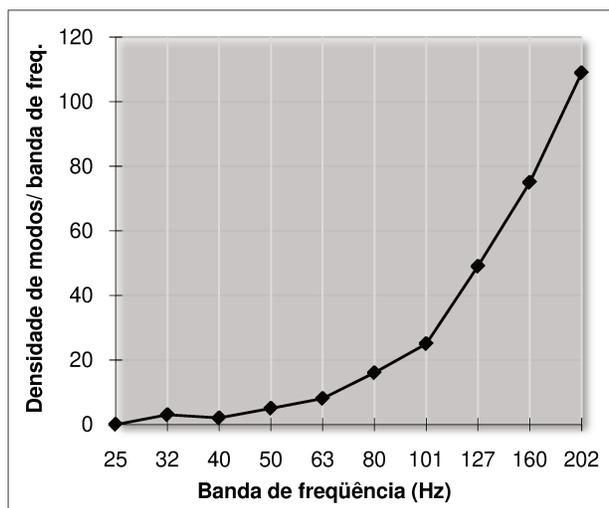


Figura 7.46 – Avaliação: análise segundo o *critério de Bonello* da *sala de referência*.

De acordo com o exposto em 3.2.12 *Quatro regiões características do comportamento do som em uma sala fechada* (p. 91 et seq.) até 28Hz (Região X) temos uma zona onde o comportamento do som não é muito conhecido; a banda entre 28 e 150Hz (Região A) é dominada pelos *modos normais*, caracterizada por um comportamento do som como onda; de 150 a 599Hz (Região B) dominam a difração e a difusão, onde o som se comporta de forma transitória entre onda e raio; e acima de 599Hz temos propagação por trajetórias com reflexões especulares, com comportamento do som como raio.

⁵⁴ Para os cálculos necessários à análise pelo *critério de Bonello* foi considerada a temperatura de 15,06°C e a conseqüente velocidade de propagação do som de 340,00m/s

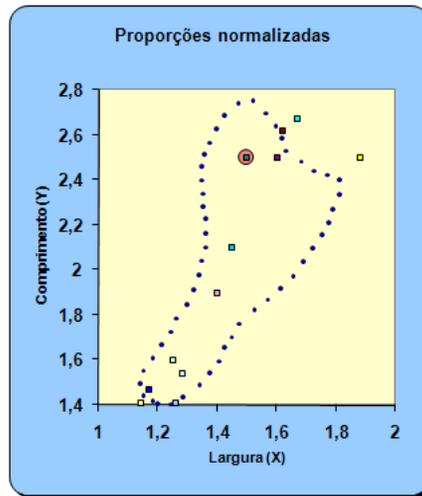


Figura 7.47 – Avaliação das dimensões da sala de referência pelo diagrama de Bolt, Beranek e Newman.

Sala de Referência		Regiões	
Hz		Hz	
0	a	28	X
28	a	150	A
150	a	599	B
599	a	20 K	C

Tabela 7-6 – As quatro regiões características da sala de referência.

Para a simulação no ANSYS foram adotados:

- pressão de referência $2 \cdot 10^{-5}$ Pa,
- densidade $1,2 \text{ kg/m}^3$ (referente à densidade do ar no nível do mar),
- velocidade do som 340 m/s ,
- admitância dos limites 0 (zero), ou seja, coeficiente de absorção 0 (zero), sendo, portanto, as superfícies consideradas perfeitamente reflexivas.

O aplicativo ANSYS fornece como resultados os modos encontrados em cada contorno, por faixa de frequência.

Inicialmente foram considerados os 50 primeiros modos, até aproximadamente 170 Hz ($\lambda = 2,00 \text{ m}$). Em seguida, modos nas bandas de 330 Hz ($\lambda = 1,03 \text{ m}$) e 1000 Hz ($\lambda = 0,34 \text{ m}$).

7.7.1 Resultados obtidos

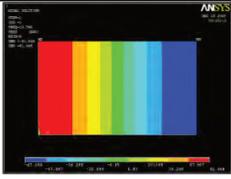
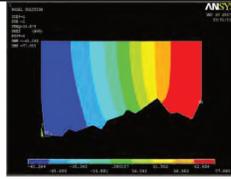
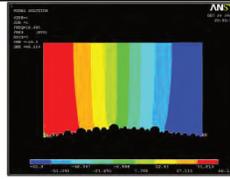
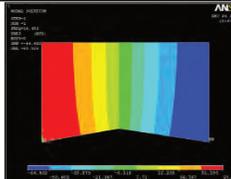
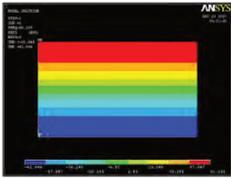
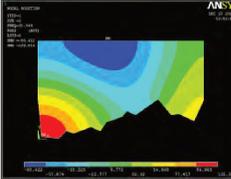
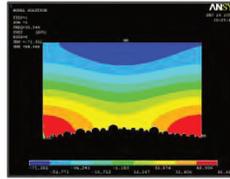
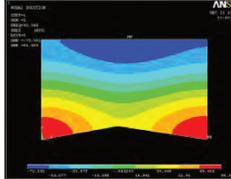
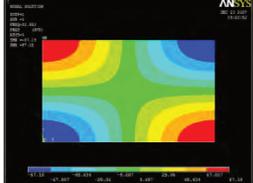
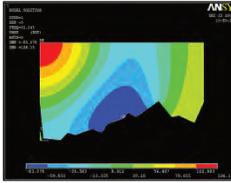
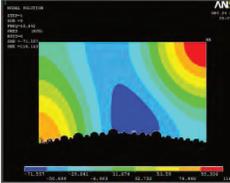
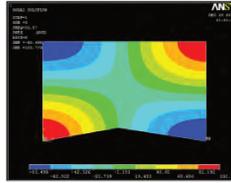
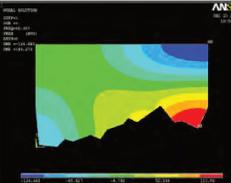
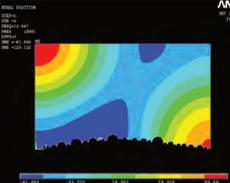
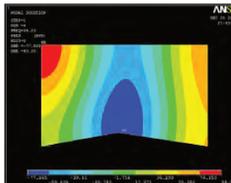
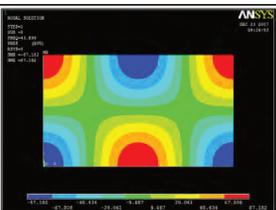
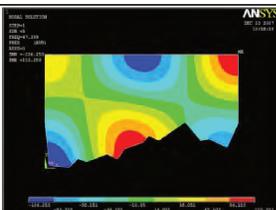
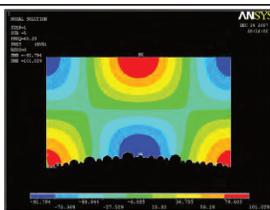
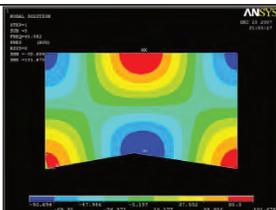
QUAD	LNSS	SCSS	RLN_SCSS
			
16,8Hz M_{QUAD01}	15,9Hz M_{LNSS01}	16,5Hz M_{SCSS01}	16,5Hz M_{RLN_SCSS01}
			
28,3Hz M_{QUAD02}	31,5Hz M_{LNSS02}	30,3Hz M_{SCSS02}	30,1Hz M_{RLN_SCSS02}
			
32,9Hz M_{QUAD03}	33,2Hz M_{LNSS03}	33,8Hz M_{SCSS03}	33,6Hz M_{RLN_SCSS03}
			
33,5Hz M_{QUAD04}	40,4Hz M_{LNSS04}	33,9Hz M_{SCSS04}	34,2Hz M_{RLN_SCSS04}
			
43,9Hz M_{QUAD05}	47,4Hz M_{LNSS05}	45,2Hz M_{SCSS05}	45,6Hz M_{RLN_SCSS05}

Figura 7.48 – Análise modal: modos 1 a 5. (16 a 47Hz) Melhorias em relação aos modos M_{QUAD02} , 03 e 04 e, para LNSS, em relação ao modo M_{QUAD05} .

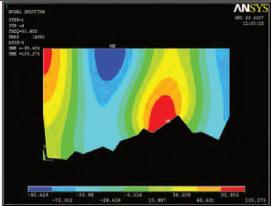
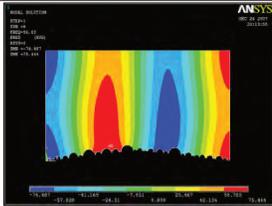
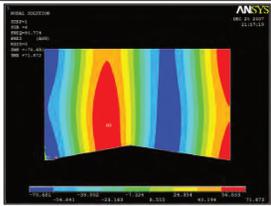
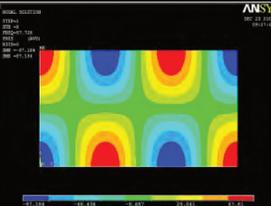
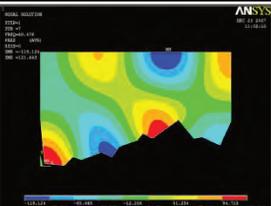
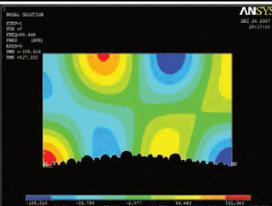
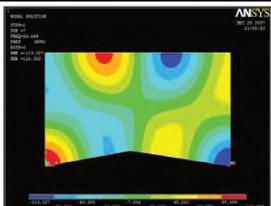
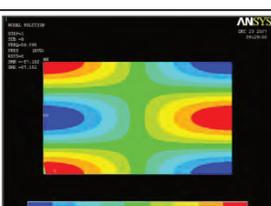
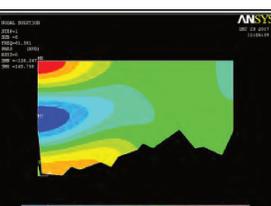
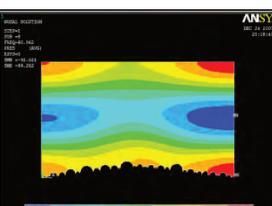
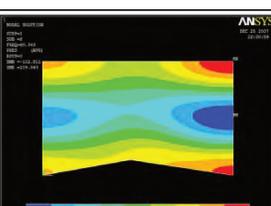
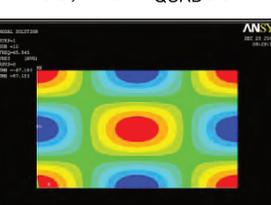
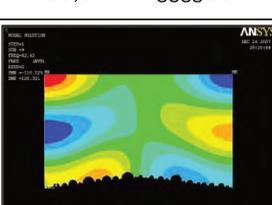
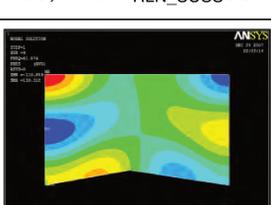
QUAD	LNSS	SCSS	RLN_SCSS
			
50,3Hz M_{QUAD06}	50,7Hz M_{LNSS06}	50,6Hz M_{SCSS06}	50,8Hz M_{RLN_SCSS06}
	Modo axial quebrado pela superfície LNSS	Modo axial quebrado pela superfície SCSS	Modo axial quebrado pela superfície RLN_SCSS
56,7Hz M_{QUAD07}			
			
57,7Hz M_{QUAD08}	60,5Hz M_{LNSS07}	58,4Hz M_{SCSS07}	58,4Hz M_{RLN_SCSS07}
			
59,1Hz M_{QUAD09}	61,4Hz M_{LNSS08}	60,8Hz M_{SCSS08}	60,4Hz M_{RLN_SCSS08}
	Modo tangencial quebrado pela superfície LNSS		
65,8Hz M_{QUAD10}		62,4Hz M_{SCSS09}	61,9Hz M_{RLN_SCSS09}

Figura 7.49 – Análise modal: melhorias em relação aos modos M_{QUAD06} a 10 (50 a 66Hz) Destaque para a quebra do modo M_{QUAD07} pelas superfícies difusoras e do modo M_{QUAD10} , pela superfície LNSS.

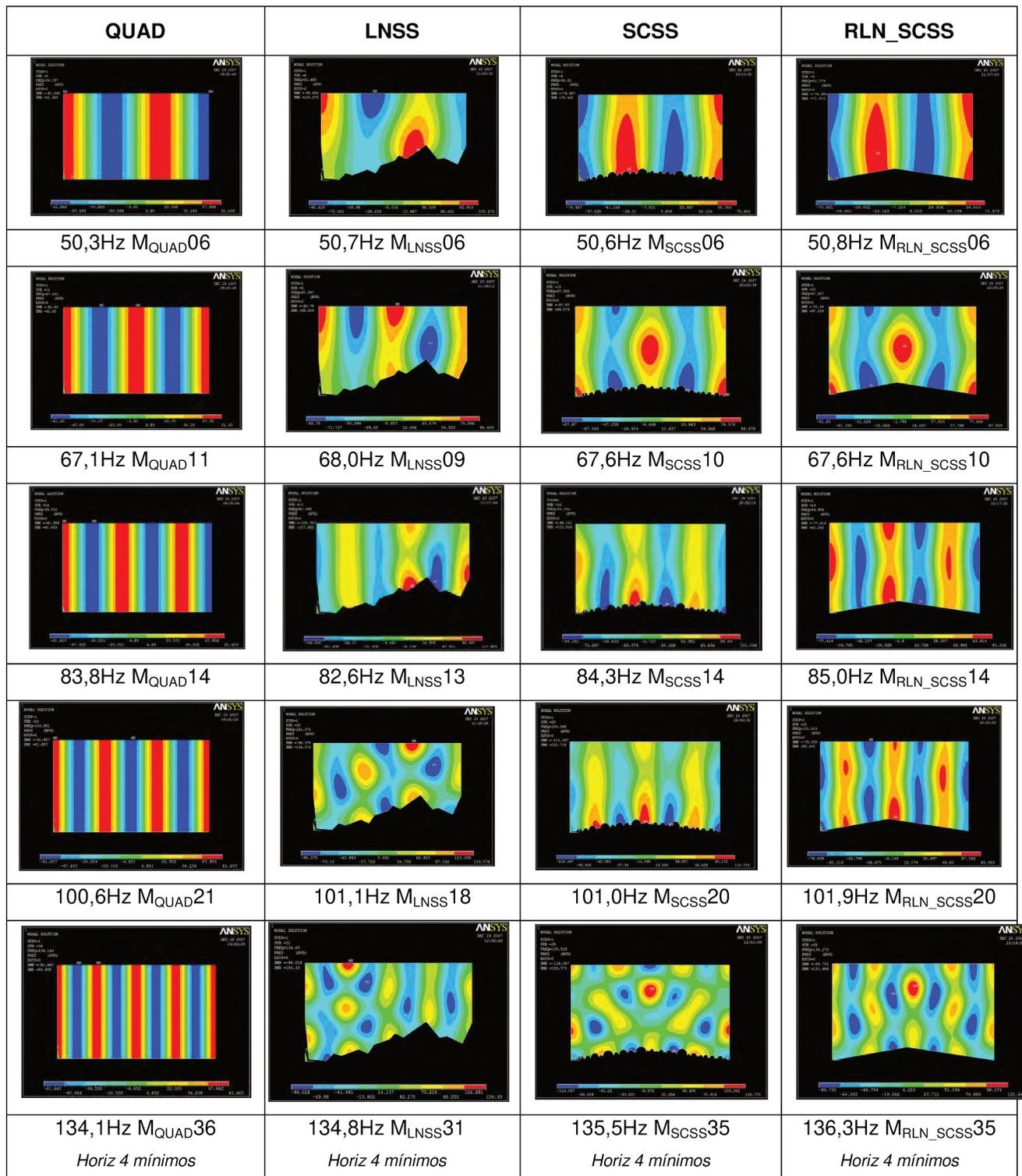


Figura 7.50 – Análise modal: melhorias em relação aos modos axiais horizontais: $M_{QUAD} 11, 14, 21$ e 36 (50 a 136Hz)
A periodicidade horizontal de variação de pressão tende a tornar-se irregular com o aumento da frequência..

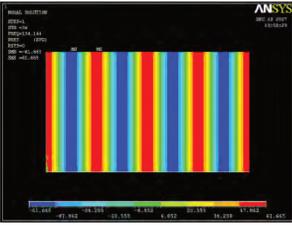
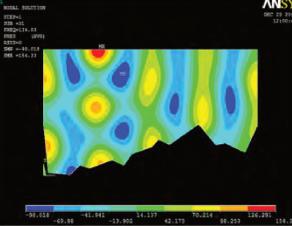
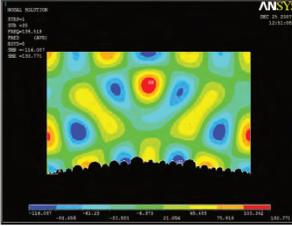
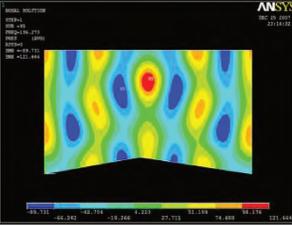
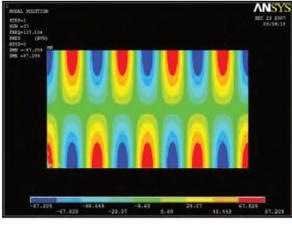
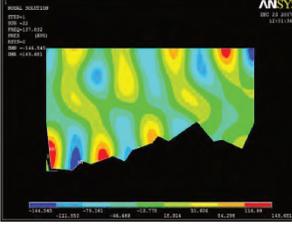
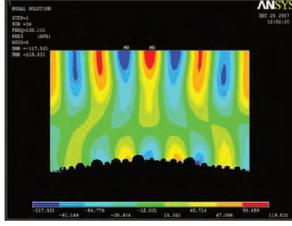
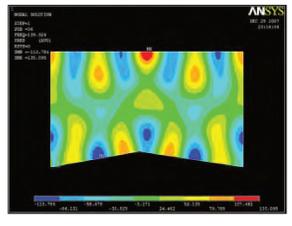
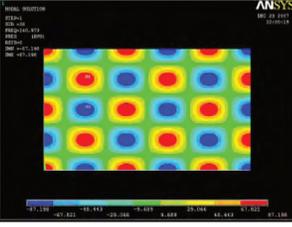
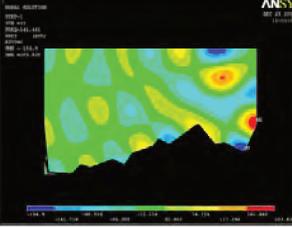
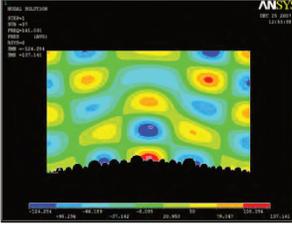
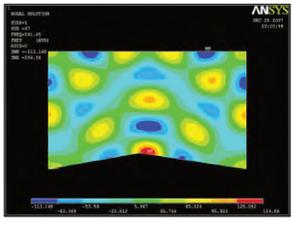
QUAD	LNSS	SCSS	RLN_SCSS
 <p>134,1Hz M_{QUAD36} Horizontal: 5:4 máximos:mínimos</p>	 <p>134,8Hz M_{LNSS31} Horizontal: 5:4 máximos:mínimos</p>	 <p>135,5Hz M_{SCSS35} Horizontal: 5:4 máximos:mínimos</p>	 <p>136,3Hz M_{RLN_SCSS35} Horizontal: 5:4 máximos:mínimos</p>
 <p>137,1Hz M_{QUAD37} Horizontal superior: 4:5 máximos:mínimos</p>	 <p>137,8Hz M_{LNSS32} Horizontal superior: 4:5 máximos:mínimos</p>	 <p>138,1Hz M_{SCSS36} Horizontal superior: 4:5 máximos:mínimos</p>	 <p>139,3Hz M_{RLN_SCSS36} Horizontal superior: 4:5 máximos:mínimos</p>
 <p>141,0Hz M_{QUAD38} Horizontal: 3:3 máximos:mínimos Vertical: 3:2 e 2:3 máximos:mínimos</p>	 <p>141,5Hz M_{LNSS33} Horizontal: 3:3 máximos:mínimos Vertical: 3:2 e 2:3 máximos:mínimos</p>	 <p>141,0Hz M_{SCSS37} Horizontal: 3:3 máximos:mínimos Vertical: 3:2 e 2:3 máximos:mínimos</p>	 <p>141,4Hz M_{RLN_SCSS37} Horizontal: 3:3 máximos:mínimos Vertical: 3:2 e 2:3 máximos:mínimos</p>

Figura 7.51 – Análise modal: melhorias em relação aos modos M_{QUAD36} , 37 e 38 (134 a 141Hz) Destaque no modo M_{QUAD37} para ventres de pressão que desaparecem nas proximidades da superfície SCSS e, no modo M_{QUAD38} , redução de 77 a 87% do número de ventres de pressão pela ação das superfícies difusoras.

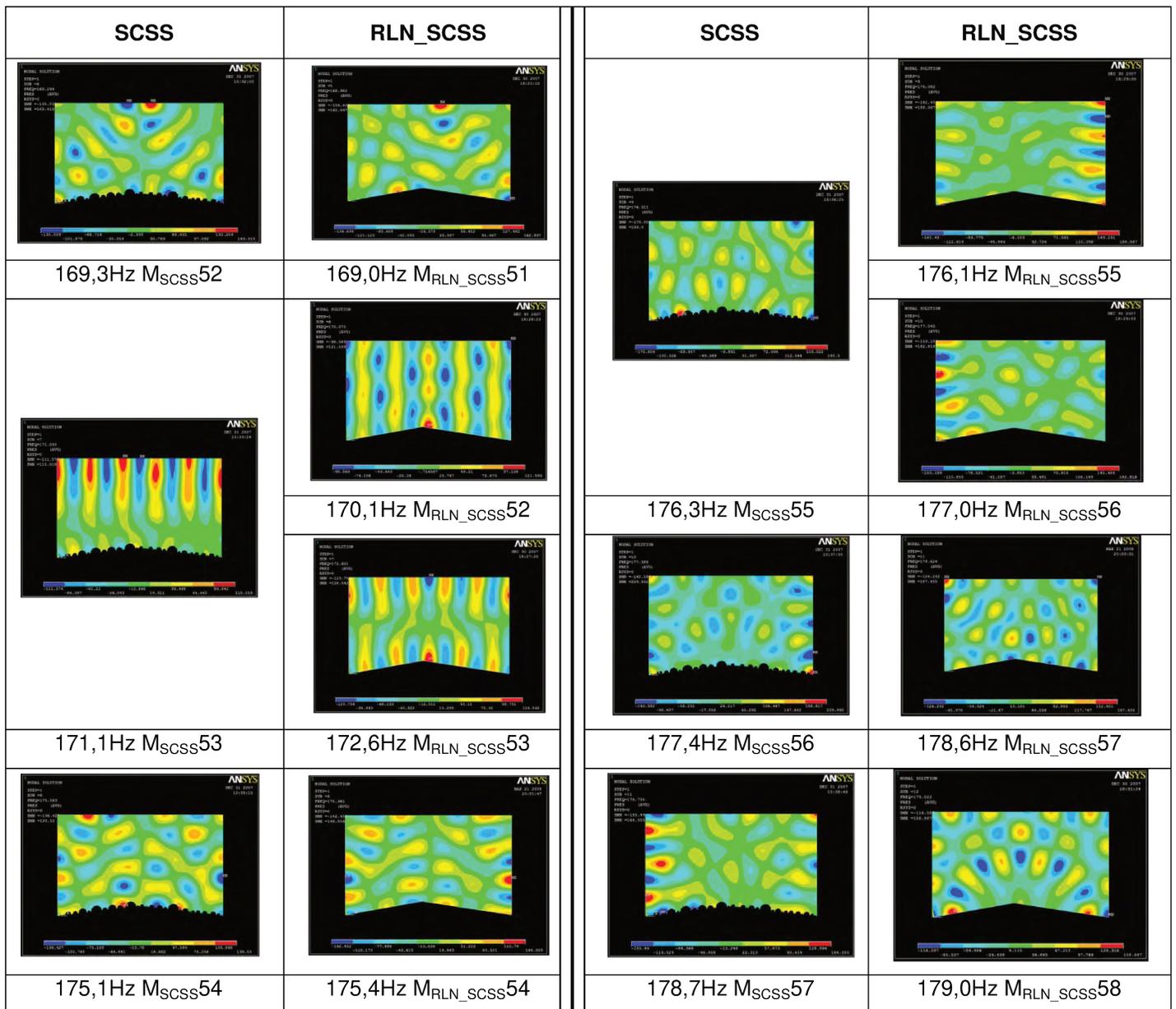


Figura 7.52 - Análise modal: influência da série de elementos semicilíndricos em SCSS independentemente da inclinação das superfícies. Comparação M_{SCSS52} a 57 e M_{RLN_SCSS51} a 58 | (169 a 179Hz)
(obs.: tabela em duas colunas)

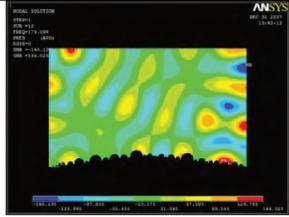
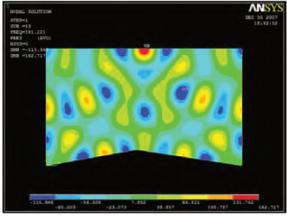
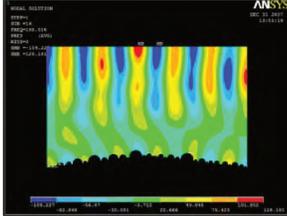
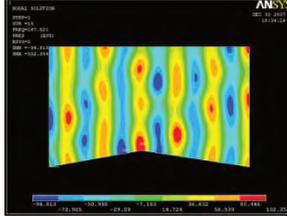
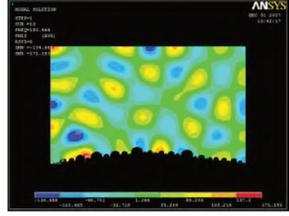
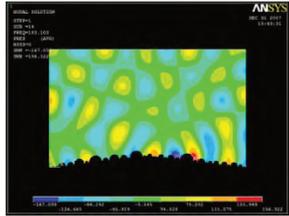
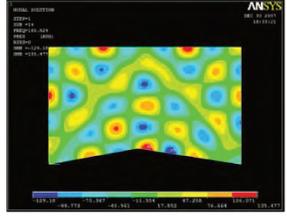
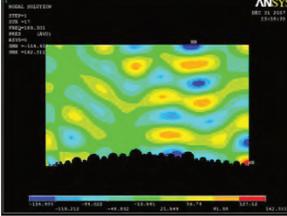
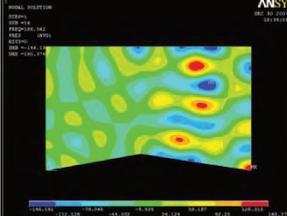
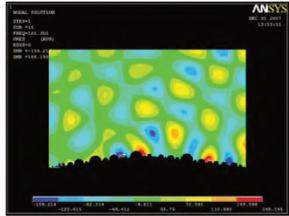
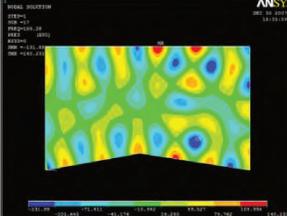
SCSS	RLN_SCSS	SCSS	RLN_SCSS
 <p>179,1Hz M_{SCSS58}</p>			
 <p>180,5Hz M_{SCSS59}</p>	<p>181,2Hz M_{RLN_SCSS59}</p>	<p>188,0Hz M_{SCSS62}</p>	<p>187,0Hz M_{RLN_SCSS61}</p>
 <p>183,1Hz M_{SCSS60}</p>			 <p>188,6Hz M_{RLN_SCSS62}</p>
 <p>185,3Hz M_{SCSS61}</p>	<p>185,8Hz M_{RLN_SCSS60}</p>	<p>189,3Hz M_{SCSS63}</p>	 <p>189,3Hz M_{RLN_SCSS63}</p>

Figura 7.53 – Análise modal: atuação dos elementos semicilíndricos independentemente da inclinação das superfícies. Comparação M_{SCSS58} a 63 e M_{RLN_SCSS59} a 63 | (179 a 189Hz)
(obs.: tabela em duas colunas)

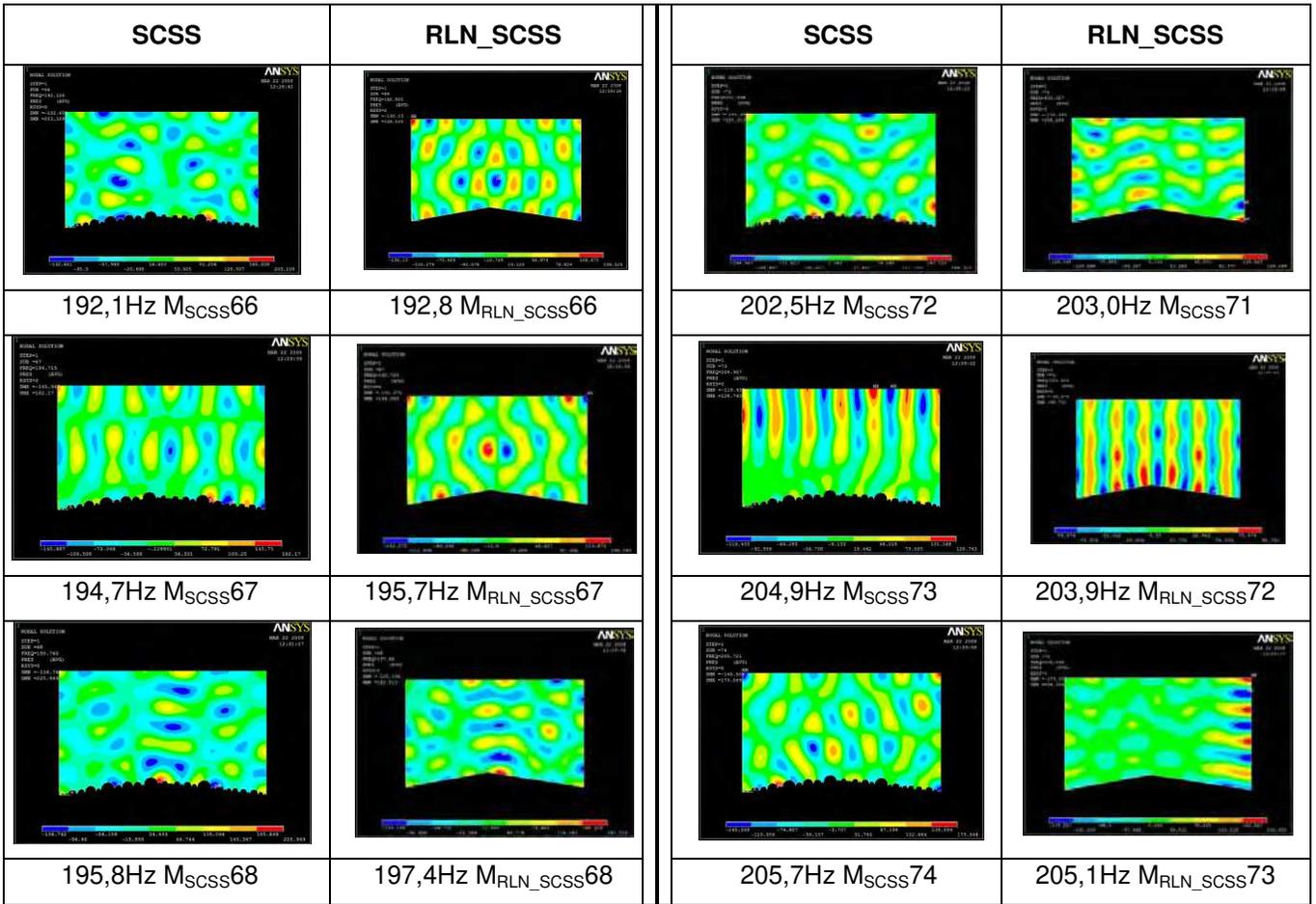


Figura 7.54 – Análise modal: atuação dos elementos semicilíndricos independentemente da inclinação das superfícies. Coluna da esquerda: Comparação M_{SCSS66} a 68 e M_{RLN_SCSS66} a 68 | (192 a 197Hz)
 Coluna da direita: Comparação M_{SCSS72} a 74 e M_{RLN_SCSS71} a 73 | (202 a 205Hz)

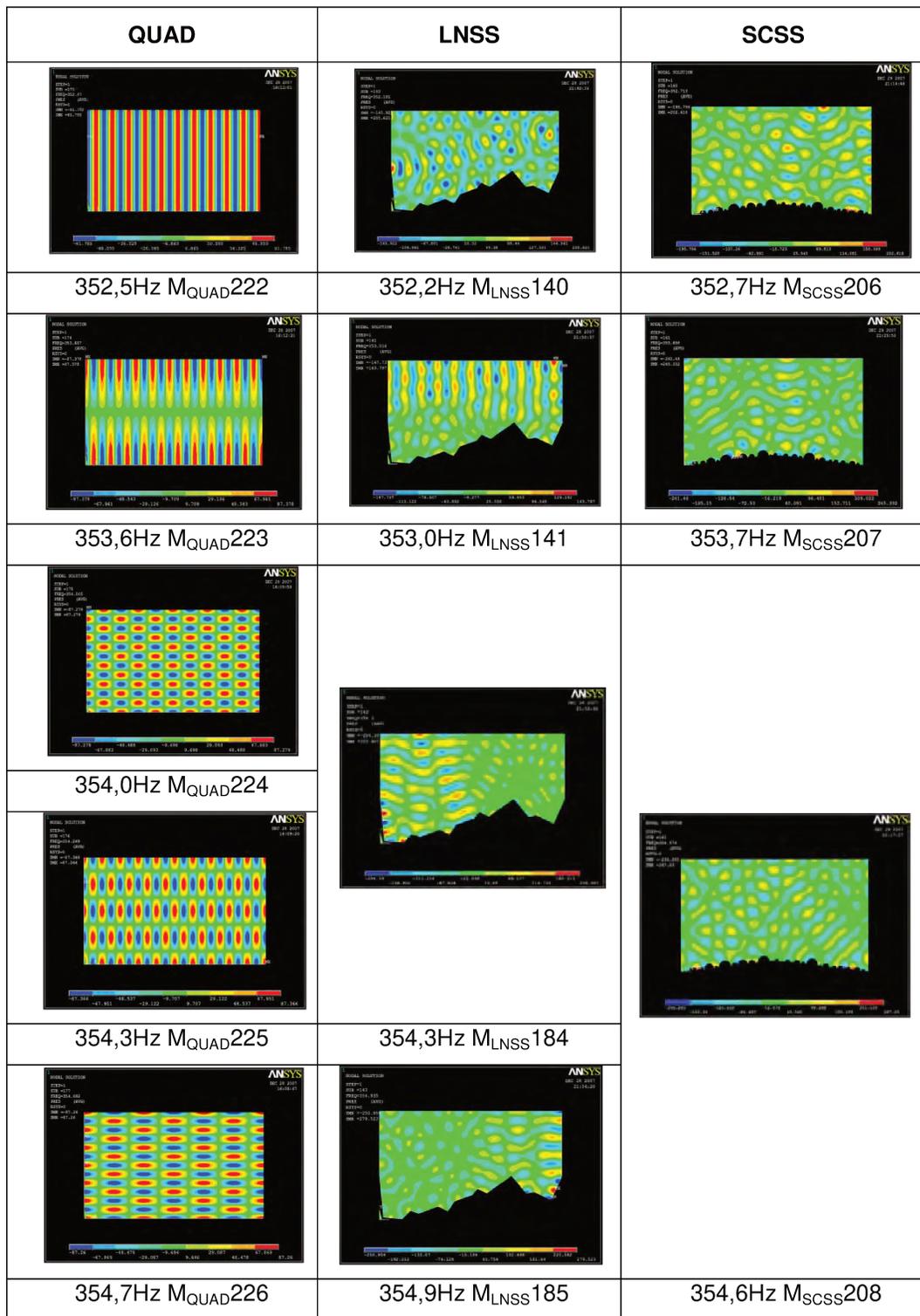


Figura 7.55 – Análise modal: seqüência dos modos (QUAD, LNSS e SCSS) entre 352 e 354Hz.

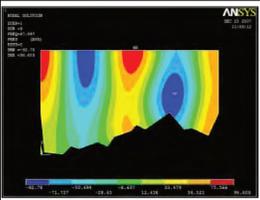
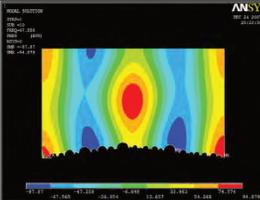
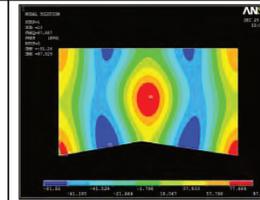
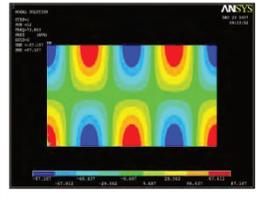
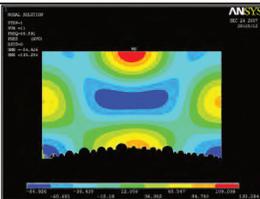
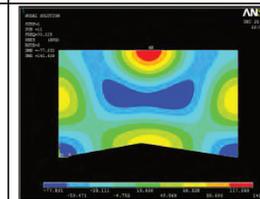
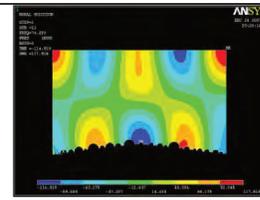
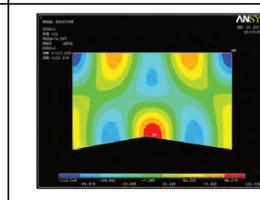
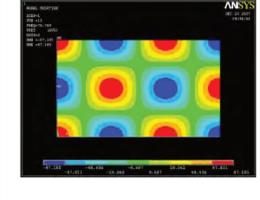
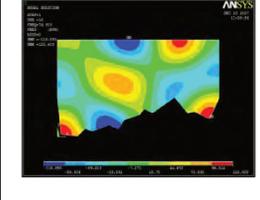
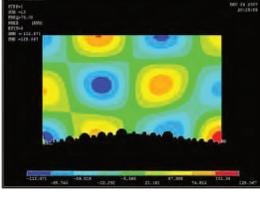
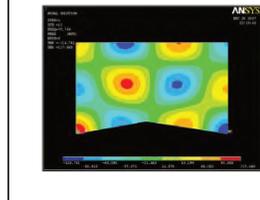
QUAD	LNSS	SCSS	RLN_SCSS
			
67,1Hz M_{QUAD11}	68,0Hz M_{LNSS09}	67,6Hz M_{SCSS10}	67,6Hz M_{RLN_SCSS10}
	Modo tangencial quebrado pela superfície LNSS		
		69,9Hz M_{SCSS11}	70,1Hz M_{RLN_SCSS11}
			
70,8Hz M_{QUAD12}		74,3Hz M_{SCSS12}	74,9Hz M_{RLN_SCSS12}
			
75,8Hz M_{QUAD13}	74,9Hz M_{LNSS10}	79,1Hz M_{SCSS13}	76,8Hz M_{RLN_SCSS13}

Figura 7.56 – Análise modal: quebra do modo tangencial M_{QUAD12} (70,8Hz) pela superfície LNSS.

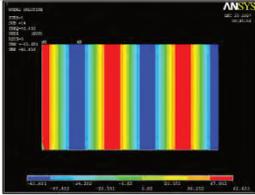
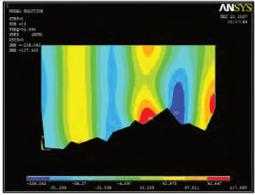
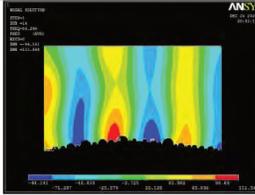
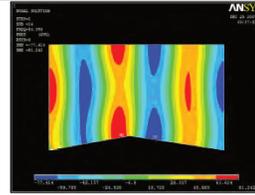
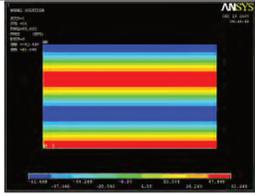
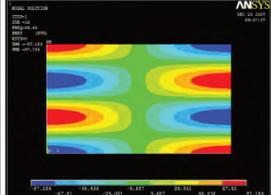
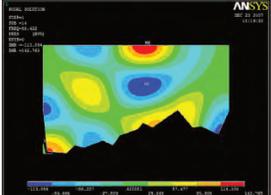
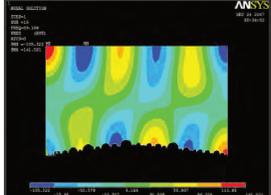
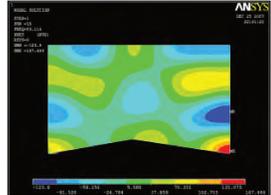
QUAD	LNSS	SCSS	RLN_SCSS
			
83,8Hz M_{QUAD14}	82,6Hz M_{LNSS13}	84,3Hz M_{SCSS14}	85,0Hz M_{RLN_SCSS14}
	Modo axial quebrado pela superfície LNSS	Modo axial quebrado pela superfície SCSS	Modo axial quebrado pela superfície RLN_SCSS
85,0Hz M_{QUAD15}			
			
86,6Hz M_{QUAD16}	88,4Hz M_{LNSS14}	89,2Hz M_{SCSS15}	89,1Hz M_{RLN_SCSS15}

Figura 7.57 – Análise modal: quebra do modo axial M_{QUAD15} (85,0Hz) pelas superfícies LNSS, SCSS e RLN_SCSS.

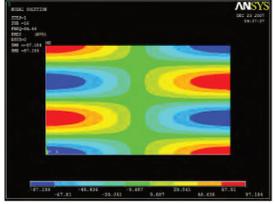
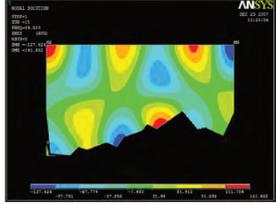
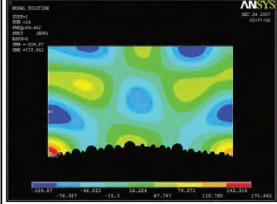
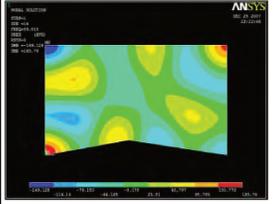
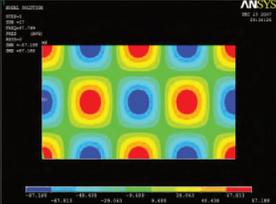
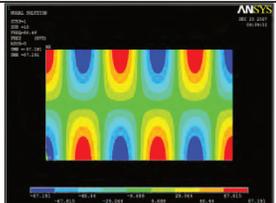
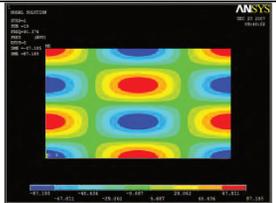
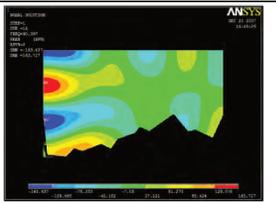
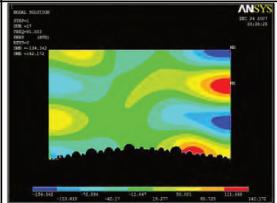
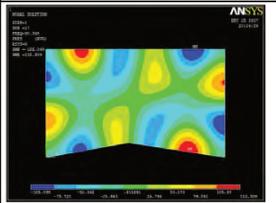
QUAD	LNSS	SCSS	RLN_SCSS
			
86,6Hz M_{QUAD16}	89,5Hz M_{LNSS15}	89,6Hz M_{SCSS16}	89,8Hz M_{RLN_SCSS16}
	Modo tangencial quebrado pela superfície LNSS	Modo tangencial quebrado pela superfície SCSS	Modo tangencial quebrado pela superfície RLN_SCSS
87,8Hz M_{QUAD17}			
	Modo tangencial quebrado pela superfície LNSS	Modo tangencial quebrado pela superfície SCSS	Modo tangencial quebrado pela superfície RLN_SCSS
88,5Hz M_{QUAD18}			
			
91,4Hz M_{QUAD19}	90,4Hz M_{LNSS16}	91,0Hz M_{SCSS17}	90,3Hz M_{RLN_SCSS17}

Figura 7.58 – Análise modal: quebra dos modos tangenciais M_{QUAD17} e 18 (87,8 e 88,5Hz) pelas superfícies LNSS, SCSS e RLN_SCSS.

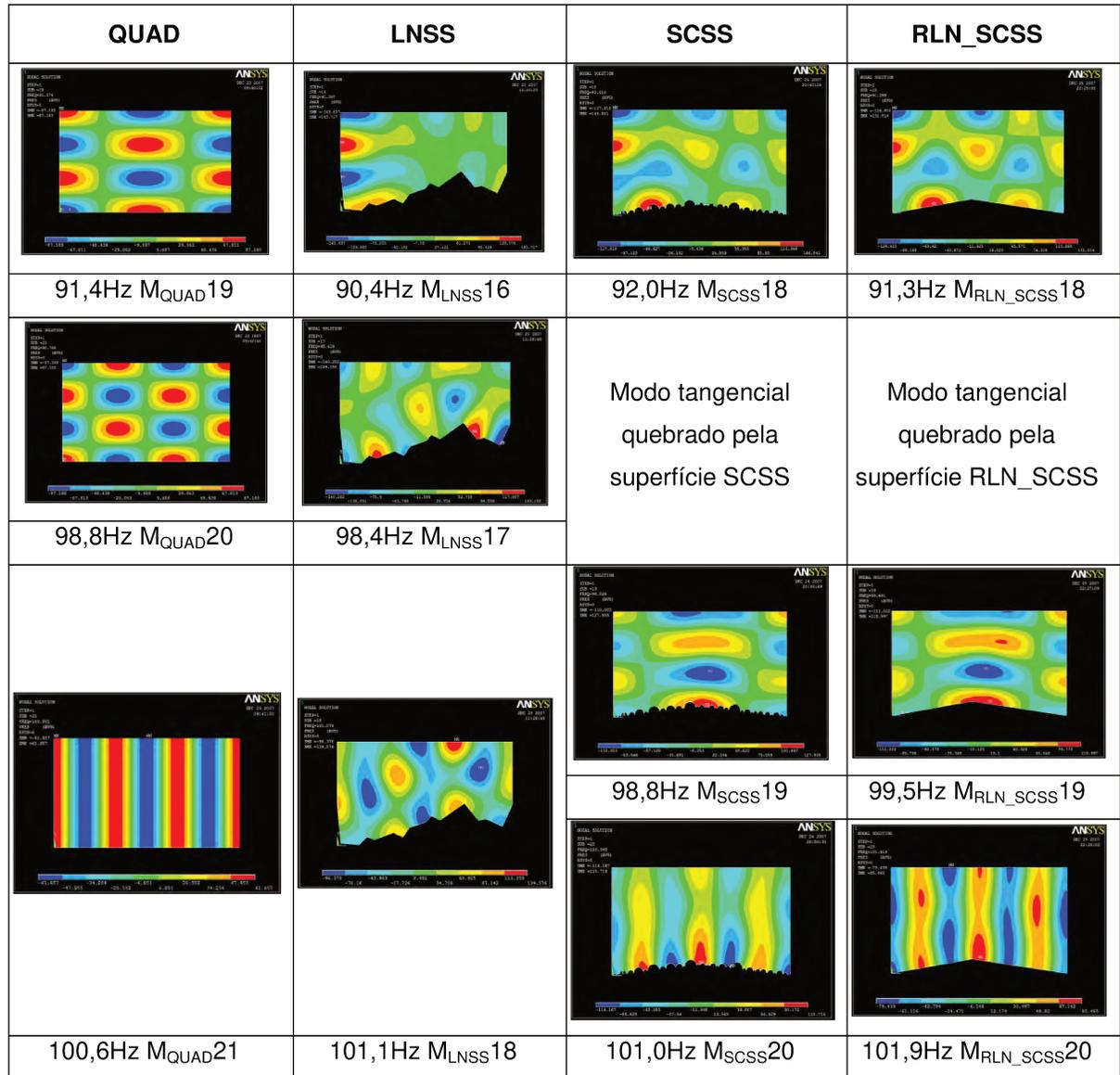


Figura 7.59 – Análise modal: quebra do modo tangencial M_{QUAD20} (98,8Hz) pelas superfícies SCSS e RLN_SCSS.

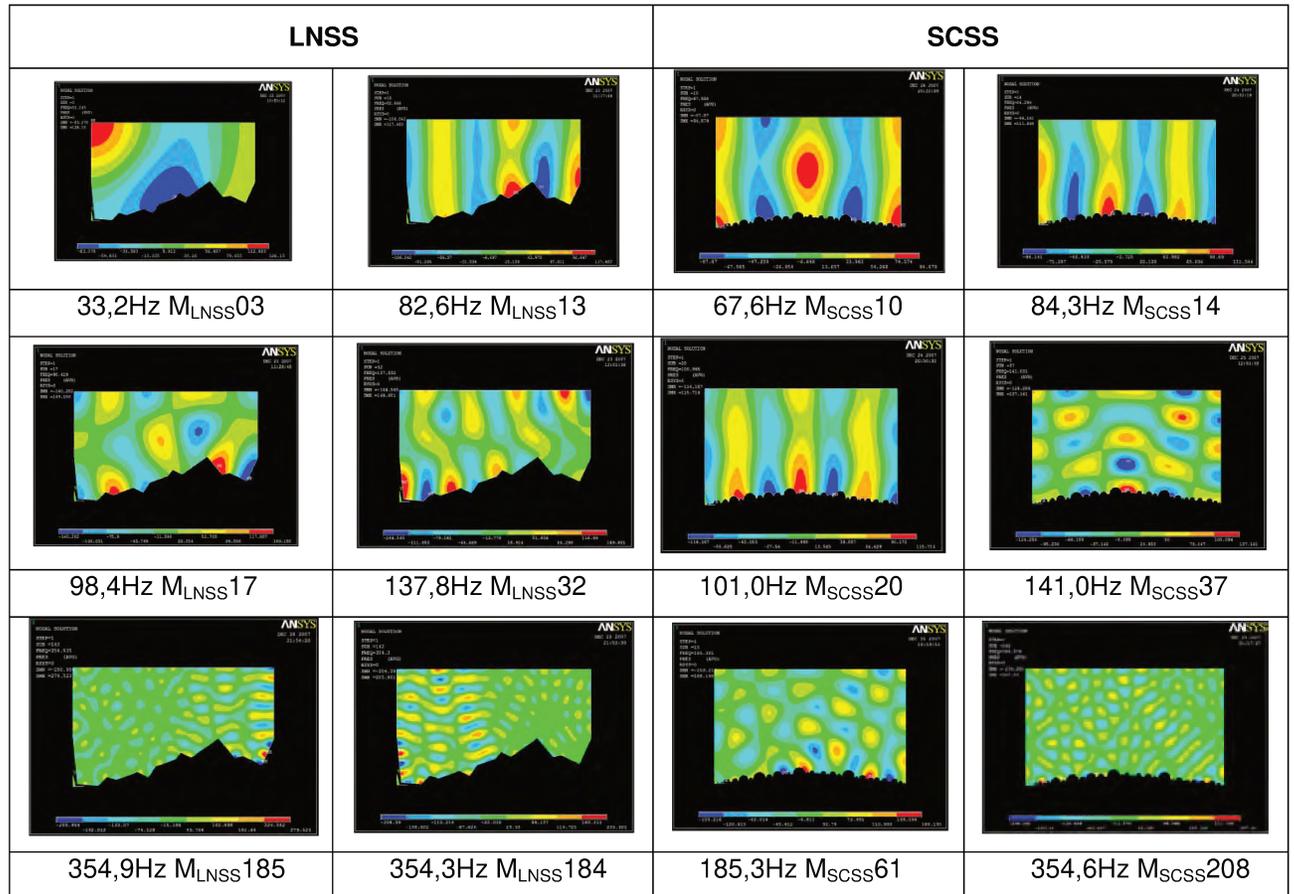


Figura 7.60 – Análise modal: modos onde se pode observar a tendência dos ventres com máximos e mínimos de pressão em se concentrarem próximos às *superfícies seriais difusoras*.

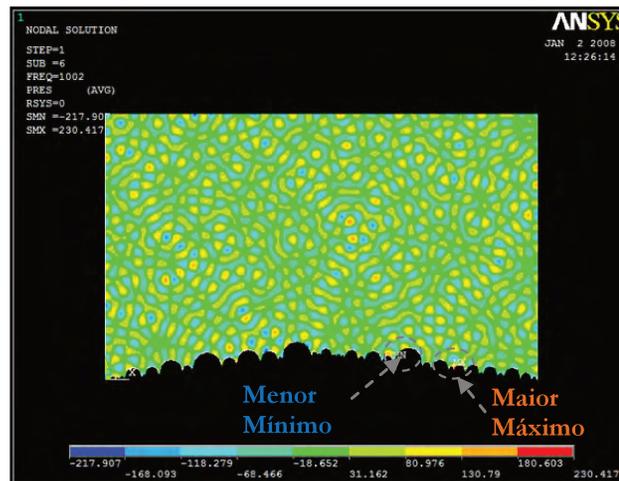
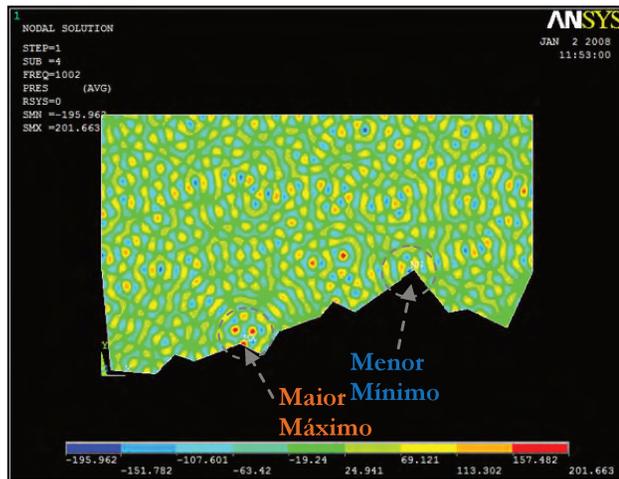
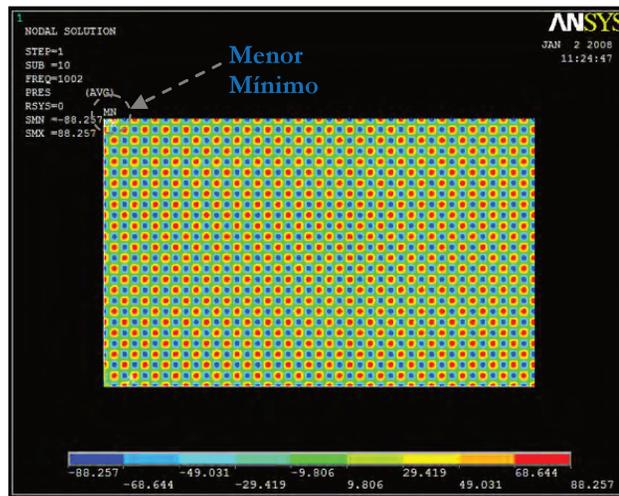


Figura 7.61 – Análise modal: modos na frequência de 1001,8Hz em QUAD (acima), LNSS (centro), SCSS (abaixo). Em LNSS e SCSS (ao centro e abaixo) os maiores valores máximos e os menores valores mínimos estão junto às superfícies seriais.

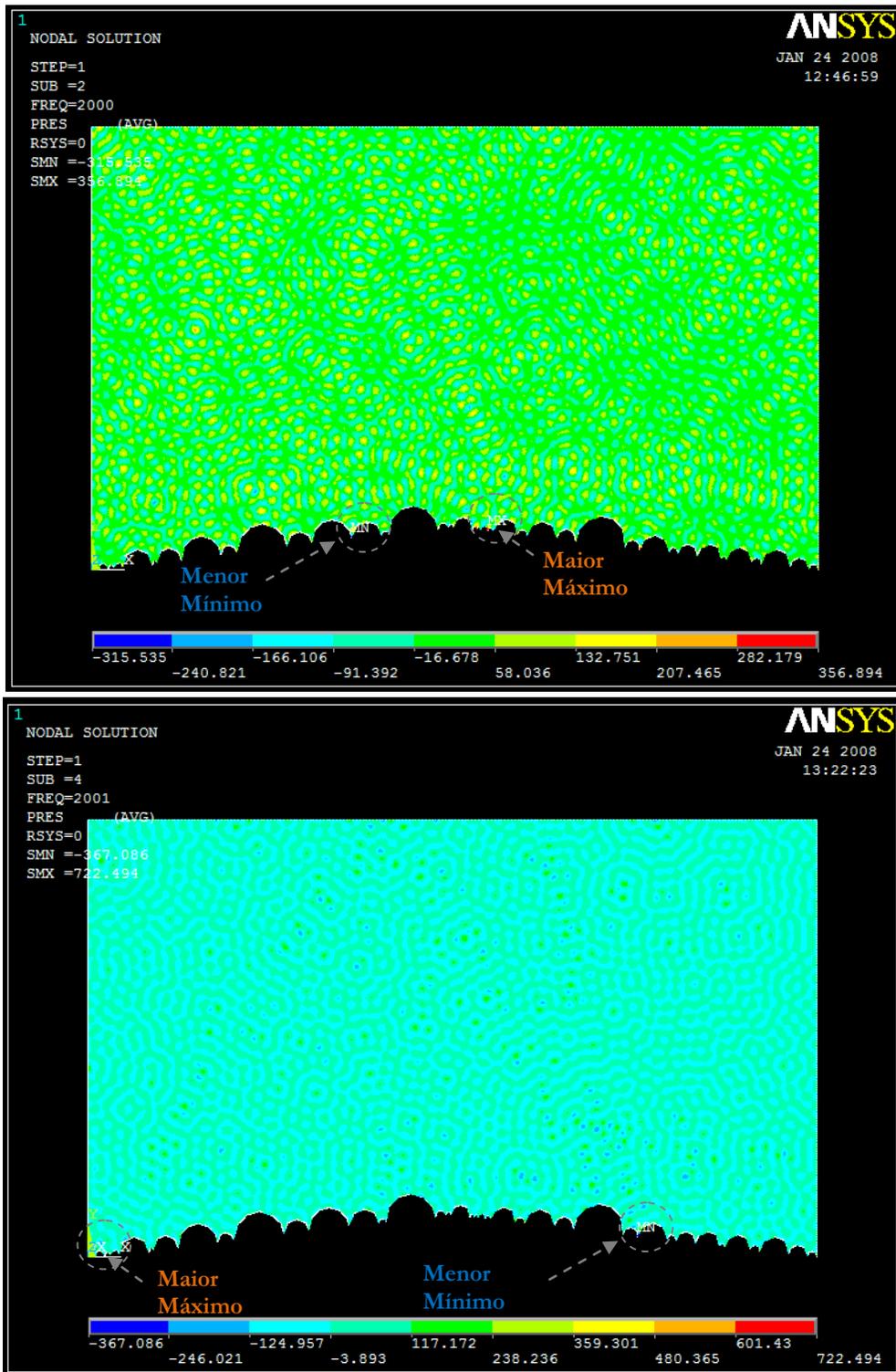


Figura 7.62 – Análise modal: maiores valores máximos e menores valores mínimos em dois modos da sala com tratamento SCSS em 2KHz estão próximos à superfície serial difusora.

7.7.2 Avaliação dos resultados de simulação obtidos através do aplicativo ANSYS

Esta avaliação está fortemente baseada na observação das formas resultantes do aplicativo ANSYS. Após a familiarização com as figuras e seus comportamentos, as formas e suas dinâmicas adquiriram sentido. Se a coerência dos processos é reflexo de comportamentos sistemáticos, dela parece emergir uma linguagem da morfologia das imagens, graças à qual, assimilada durante a observação, se pode enxergar o que se passa, como que “lendo” nas próprias formas observadas. Os recursos verbais de raciocínio lógico e a tipologia de simetrias serviram para traduzir essas impressões, não representando-as mas procurando posicionar o leitor diante dos objetos, sugerindo como e para onde olhar, de modo a enxergar o que vê, perceber o que enxerga e a compreender o que percebe. As formas dizem o que estão acontecendo com elas e o olhar comparativo entre figuras permite-nos assimilar essa “coerência”, aprender essa “sintaxe” e a “ler” pelas dinâmicas. Recomenda-se aos leitores entrarem no mundo das formas e imagens para enxergar o que se desejou mostrar.

7.7.2.1 Distribuição variada dos máximos e mínimos de pressão

De maneira geral, observa-se como nas salas com superfícies LNSS, SCSS e RLN_SCSS os ventres com máximos e mínimos de pressão variam constantemente suas posições. A localização variada, espalhada, regular e uniforme dos ventres de máximos e mínimos em função da frequência contribui para que a resposta acústica seja homogênea, desejável para uma sala destinada a performance e audição musical.

Contrariamente, na *sala de referência* (QUAD) os ventres estão preponderantemente localizados em determinados pontos, linhas e regiões, mais do que em outros. Sobre qualquer eixo de simetria da figura geométrica há acúmulo de ventres de pressão, e o número de eixos de simetria na *sala de referência* é superior às demais. Esses locais devem ser evitados. Por exemplo, em medições acústicas, os pontos de posicionamento do microfone devem estar a uma distância mínima das superfícies das partições, pois nelas há acúmulo sistemático de ventres de pressão e levam a resultados que só se verificam localmente e não podem ser generalizados para todo recinto em medição.

7.7.2.2 Identificação de modos com simetrias

Os modos 06 M_{QUAD06} , M_{SCSS06} e M_{RLN_SCSS06} se caracterizam juntamente com os modos 14 por *simetria axial* dupla, uma morfológica (portanto de espaço) em relação ao eixo vertical e outra de pressão (*Cf. 3.1 Tipologia da simetria* , p. 64). O modo M_{LNSS06} apresenta *simetria rotacional* de espaço e *axial* de pressão.

Os modos 07 comparados resultam em dois grupos, um formado pelo modo M_{QUAD07} (linhas horizontais) e o outro formado pelos modos M_{LNSS07} , M_{SCSS07} e M_{RLN_SCSS07} com alguns ventres circulares e com simetrias rotacionais tanto em relação ao eixo vertical quanto horizontal. Porém, este tipo de simetria é justamente o do modo M_{QUAD08} com o qual esses modos acabam se identificando.

Os modos 08 comparados resultam igualmente em dois grupos, um formado pelo modo M_{QUAD08} , com simetria rotacional em eixos vertical e horizontal com total de 8 ventres de pressão, e o outro formado pelos modos M_{LNSS08} , M_{SCSS08} e M_{RLN_SCSS08} com elementos de simetria axial em relação ao eixo vertical e tendendo a 6 ventres de pressão. Porém, essa é a exata simetria do modo M_{QUAD09} , com o qual se assemelham.

7.7.2.3 Quebra de modos pelas superfícies seriais difusoras

Identificada a semelhança entre os resultados da análise modal dos modos M_{LNSS07} , M_{SCSS07} e M_{RLN_SCSS07} (*Cf. Figura 7.49*) e o modo M_{QUAD08} , bem como dos modos M_{LNSS08} , M_{SCSS08} e M_{RLN_SCSS08} e o modo M_{QUAD09} , pode-se atribuir a essas identidades comportamentos acústicos igualmente similares. Como os modos estão encadeados continuamente em suas progressões individuais, constata-se, então, que o comportamento acústico observado no modo M_{QUAD07} está ausente das famílias de modos M_{LNSS} , M_{SCSS} , M_{RLN_SCSS} . Pode-se concluir que esses comportamentos foram inibidos ao instalar os difusores *LNSS*, *SCSS*, *RLN_SCSS*. De forma figurativa, adotou-se o termo “*quebrar*” *um modo* quando um difusor instalado em um local elimina determinado comportamento modal presente no recinto original.

Observa-se, então, a quebra do segundo modo axial no sentido da profundidade da sala, modo M_{QUAD07} (56,7Hz) (*Cf. Figura 7.49*). Ainda na mesma figura, temos a quebra do modo tangencial M_{QUAD10} (65,8Hz) pela superfície *LNSS*.

7.7.2.4 Diminuição do número de ventres de pressão e da área que ocupam

No grupo dos primeiros modos $M_{QUAD}01$ a 05 (16 a 47Hz) (Cf. *Figura 7.48*) observa-se uma melhora em relação ao modo $M_{QUAD}02$ (axial), que pela ação das superfícies seriais difusoras perde a regularidade das faixas horizontais de pressão. O mesmo ocorre, de forma mais pronunciada, em relação aos modos $M_{LNS5}03$ e 04 , $M_{SC55}03$ e 04 , onde as superfícies seriais diminuíram significativamente a área ocupada pelos ventres de pressão, bem como o número total de ventres, de 4 para 3 em $M_{SC55}03$ e de 4 para 2 em $M_{LNS5}03$.

O modo $M_{LNS5}08$ (61,4Hz) apresenta uma diminuição de 6 para 2 ventres em relação ao modo $M_{QUAD}09$ (59,1Hz). Ambos os modos $M_{SC55}09$ (62,4Hz) e $M_{RLN_SC55}09$ (61,9Hz) diminuíram os ventres de pressão de 9 para 3 em relação ao modo $M_{QUAD}10$ (65,8Hz).

Os modos $M_{QUAD}37$ (137,1Hz) – $M_{LNS5}32$ (137,8Hz) – $M_{SC55}36$ (138,1Hz) e $M_{RLN_SC55}36$ (139,3Hz), são todos caracterizados e unidos por possuírem estrutura derivada de um original ($M_{QUAD}37$) com 9 ventres acima (4 máximos e 5 mínimos) e abaixo (5 máximos e 4 mínimos). Percebe-se claramente que as superfícies difusoras praticamente “desmancharam” os ventres de pressão da linha inferior da configuração inicial da sala (QUAD), mas guardam o embrião de 9 ventres com simetria rotacional que pode ser visualizado apesar dos ventres de pressão da linha inferior estarem bastante debilitados.

O enfraquecimento dos ventres de máximos e mínimos de pressão devido à ação das superfícies seriais também pode ser constatado observando os seguintes grupos de modos (Cf. *Figura 7.50*, *Figura 7.51*):

- $M_{QUAD}11$ – $M_{LNS5}09$ – $M_{SC55}10$ – $M_{RLN_SC55}10$
- $M_{QUAD}14$ – $M_{LNS5}13$ – $M_{SC55}14$ – $M_{RLN_SC55}14$
- $M_{QUAD}21$ – $M_{LNS5}18$ – $M_{SC55}20$ – $M_{RLN_SC55}20$
- $M_{QUAD}36$ – $M_{LNS5}31$ – $M_{SC55}35$ – $M_{RLN_SC55}35$
- $M_{QUAD}38$ – $M_{LNS5}33$ – $M_{SC55}37$ – $M_{RLN_SC55}37$

A atuação das superfícies seriais difusoras é cada vez mais forte na medida em que os modos vão se elevando. Na *Figura 7.51*, o modo $M_{LNS5}33$ (141,5Hz) quase que perde as características visuais de observação que o unem a $M_{QUAD}38$. O que permitiu sua identificação foi a frequência ao redor de 141Hz; o número de máximos e mínimos em alinhamento vertical ao lado direito de $M_{LNS5}33$; e a semelhança da região direita deste com $M_{SC55}37$ e $M_{RLN_SC55}37$.

Comparando M_{QUAD} , M_{LNSS} e M_{SCSS} , na banda de 352 a 354Hz, além de modos quebrados, o número de ventres de máximos e mínimos diminuiu em torno de 90%, sendo reduzidos a alguns pontos esparsos, portanto, com área igualmente total reduzida.

7.7.2.5 Atuação das irregularidades semicilíndricas em SCSS

A análise modal da superfície RLN_SCSS foi efetuada para poder comparar os resultados com SCSS e identificar a partir de que frequência as irregularidades semicilíndricas serializadas passam a interferir nos modos normais. Nos primeiros modos a atuação predominante é a da inclinação dos eixos alinhando os centros dos círculos que seccionam os cilindros, dispostos em “v” invertido, situado na superfície inferior de RLN_SCSS.

Observando os modos M_{SCSS} e M_{RLN_SCSS} percebe-se correlações entre os *patterns* das figuras formadas pelos modos normais. A partir de $M_{SCSS}58$ (179,1Hz) e $M_{RLN_SCSS}59$ (181,2Hz) até $M_{SCSS}63$ (189,3Hz) e $M_{RLN_SCSS}63$ (189,3Hz) (Cf. Figura 7.53) nota-se o enfraquecimento da correlação.

Em $M_{SCSS}53$ (171,1Hz) as irregularidades semicilíndricas começam claramente a atuar quando comparado com o resultado da análise modal de $M_{RLN_SCSS}52$ (170,1Hz) e $M_{RLN_SCSS}53$ (172,6Hz): as respostas possuem o mesma base de formas, mas as transformações das variações de pressão próximo à superfície SCSS são significativas, dissolvendo praticamente as colunas de máximos e mínimos de pressão. O mesmo se verifica entre $M_{SCSS}62$ (188,0Hz) e $M_{RLN_SCSS}61$ (187,0Hz) (Cf. Figura 7.53) e entre $M_{SCSS}73$ (204,9Hz) e $M_{RLN_SCSS}72$ (203,9Hz) (Cf. Figura 7.54).

Comparando-se as seqüências de modos $M_{SCSS}66$ a 68 e $M_{RLN_SCSS}66$ a 68 , constata-se como a superfície serial semicilíndrica minimizou drasticamente a formação dos dois ventres de pressão ao centro de $M_{RLN_SCSS}67$.

Verifica-se, assim, que a partir da banda de frequência de 170-190Hz ($\lambda = 2,00$ a 1,79m) ($\lambda/4 = 50$ cm a 45cm) há influência das irregularidades semicilíndricas (diâmetros entre 10 e 50cm) serializadas no comportamento modal do sistema todo.

Concluindo este item, constata-se na simulação bidimensional das salas a atuação das superfícies seriais para a difusão das ondas sonoras incidentes a partir de 30Hz, com aumento proporcional à frequência, a influência das irregularidades de SCSS a partir de 170Hz, salientando

mais uma vez que apenas uma das superfícies foi tratada, permanecendo as demais com os paralelismos propícios à formação de ondas estacionárias.

7.7.2.6 Tendência dos ventres de máximos e mínimos de pressão estarem próximos às superfícies seriais difusoras

Quanto aos ventres de pressão, além da redução em número destes nos contornos das plantas das salas alteradas em relação à *sala de referência*, nota-se nos remanescentes a tendência a se situarem próximos às superfícies difusoras, muitas vezes junto a elas (*Cf. Figura 7.60, p. 272*) o que suscita a recomendação de evitar qualquer ponto nesses arredores, prevendo um recuo dentro do qual as condições acústicas tem fortes chances de proporcionarem uma escuta desequilibrada. Da mesma forma medições aí efetuadas estarão sujeitas a valores discrepantes em relação às demais localizações que possuem melhor uniformidade, homogeneidade e equilíbrio na distribuição e variação das posições dos máximos e mínimos de pressão. Essa tendência das superfícies seriais difusoras em “atraírem” os ventres de pressão para si representa, portanto, uma vantagem e ao mesmo tempo um alerta: a vantagem é que, além de diminuir a quantidade de ventres, os poucos que restam estarão próximos a ela. Portanto ao nos afastarmos da superfície difusora estarão significativamente diminuídos os máximos e mínimos de pressão em número e em área ocupada. Conhecendo a tendência dos ventres de pressão se situarem próximos às superfícies seriais, não só sabemos onde eles provavelmente estão como também, pela manipulação das superfícies, podemos deslocá-los solidariamente a estas. O alerta é para evitar qualquer ponto de escuta e captação muito próximos a uma superfície serial difusora, estando sujeito a resultados inadequados, como é o caso do *ponto 3* de medição da *cabine de controle de gravação* da Sala Villa-Lobos (*Cf. Figura 8.40, p. 327*). A resposta do T_{40} de 2K a 4KHz nesse ponto difere demasiadamente dos demais (*Cf. Figura 8.38, p. 326; Figura 8.39, p. 326; Figura 8.41, p. 327*). Para conhecer mais precisamente a distância que deve ser mantida, será necessário um trabalho complementar envolvendo medições e análises. Contudo, observando as figuras, é possível estimar que a aproximadamente 1,0 a 1,5m estejamos livres do acúmulo de ventres de pressão. O *ponto 3* de medição da *cabine de controle de gravação* da Sala Villa-Lobos estava a aproximadamente 1,0m da superfície serial difusora e, assim, sujeito ao acúmulo de máximos e mínimos. Os demais

pontos de medição na cabine apresentam desvios de tempo de reverberação inferiores a 5% em todas banda de frequência em relação à média (Cf. *Figura 8.42, p. 328*).

8. RESULTADOS

8.1 PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO ACÚSTICAS PARA A SALA DE TOMADA DE SOM DO ESTÚDIO DO LAMI/ECA/USP (SP)

8.1.1 Proposta

A proposta de adequação acústica da sala de tomada de som do estúdio do LAMI atende às seguintes necessidades:

1. Diminuição da *absorção* devida a sistemas de membranas (madeirite com material de absorção solto e camada de ar por trás) atualmente existentes nas paredes e teto:
 - Criando sobre as superfícies atuais novas superfícies formadas por placas de madeira espessas (38 mm) ou placas de gesso duplo acartonado. As novas superfícies se sustentariam sobre novas estruturas fixadas sobre as superfícies atualmente existentes. As novas estruturas devem ser ao mesmo tempo coerentes e solidárias às estruturas de suporte atuais.
2. Minimização dos efeitos dos *modos normais* e melhoria de qualidade à prática musical resultando em melhores índices de *vivacidade* (RT_{60} e *EDT*), *preenchimento do som*, *espacialidade*, *fração de energia lateral* (*LF*), *center time* (*CT*), *difusão*, *balanço*, *mistura*, *conjunto*, *ausência de eco* e *uniformidade*:
 - Instalando elementos difusores, mais especificamente, *superfícies seriais difusoras lineares articuladas em dois eixos ortogonais* – *LNSS2*;
3. Melhoria na *vivacidade* (RT_{60} e *EDT*), *preenchimento do som* e *brilho*:
 - Empregando materiais prioritariamente reflexivos;
4. Não prejudicar o *balanço tonal* (*TB*) nem proporcionar colorações inconvenientes:

- Alternando materiais com coeficientes de absorção variados no revestimento aparente interno (DE MARCO, 1982).

8.1.2 Projeto

O projeto compreende:

- SUPERFÍCIE SERIAL DIFUSORA LNSS2
 - Material: gesso duplo acartonado complementada com lã de vidro colada por trás;
 - Geometria: irregular, conforme *proposta 2*;
 - Instalação: ao fundo da sala, com estrutura de perfis metálicos sobre as placas de madeirite atualmente existentes;
 - Finalidades:
 - produzir difusão em ampla banda de frequências;
 - minimizar os efeitos dos *modos normais*;
 - melhoria da qualidade da sala às práticas musicais.
- SUPERFÍCIES LATERAIS (Cf. Anexo 2)
 - Material: Madeira com espessura de pelo menos 38 mm, alternando com o gesso da superfície ao fundo e do teto;
 - Geometria: irregular, combinando um par alinhado de superfícies com elementos côncavos com núcleos convexos e uma superfície oposta à porta de acesso ao auditório;
 - Instalação: nas laterais, no sentido do comprimento da sala, sobre as placas de madeirite;
 - Finalidades:
 - evitar reflexões indesejadas e ondas estacionárias entre as superfícies laterais paralelas;
 - produzir difusão em ampla banda de frequências;
 - minimizar os efeitos dos *modos normais*;
 - melhoria da qualidade da sala às práticas musicais.
- TETO

- Material: gesso duplo acartonado com lã de vidro colada por trás;
- Geometria: placas constituindo um plano irregular inclinado;
- Instalação: pendurado em estrutura metálica com tirantes possuindo amortecedores;
- Finalidades:
 - evitar reflexões indesejadas e ondas estacionárias entre o teto e o piso;
 - minimizar os efeitos dos *modos normais*;
 - melhoria da qualidade da sala às práticas musicais.

8.1.2.1 Superfície serial difusora linear articulada em dois eixos ortogonais – LNSS2

Instalação de um segmento da superfície serial LNSS2 ao fundo da *sala de tomada de som*, sobre a parede atual. (*Figura 8.1, Figura 8.2, Figura 8.3*) apresentada no *item 7.6.3 (Proposta 2, p. 245)*. Por ser demasiadamente extensa e idealmente sem fim, a superfície LNSS2 foi seccionada num trecho escolhido por se adequar à instalação no local previsto. Essa verificação foi feita experimentalmente, com observações e tentativas, tendo sido selecionado o segmento que obteve melhor resultado. O material de revestimento proposto foi *gesso duplo acartonado*, montado sobre suportes de perfis metálicos tendo, por trás, fixado às placas, uma camada de Painéis PSI⁵⁵ de densidade a partir de 40Kg/m³ e espessura entre 75 e 100mm, devidamente recortados, se adaptando às formas das placas de gesso. Ao meio da superfície serial há uma abertura conduzindo, através de um duto a ser instalado, à entrada de ar natural, na parede do fundo, abaixo e ao centro.

⁵⁵ Painéis rígidos ou semi-rígidos de lã de vidro aglomerada com resina sintética (produto incombustível) ABNT NBR 11358.

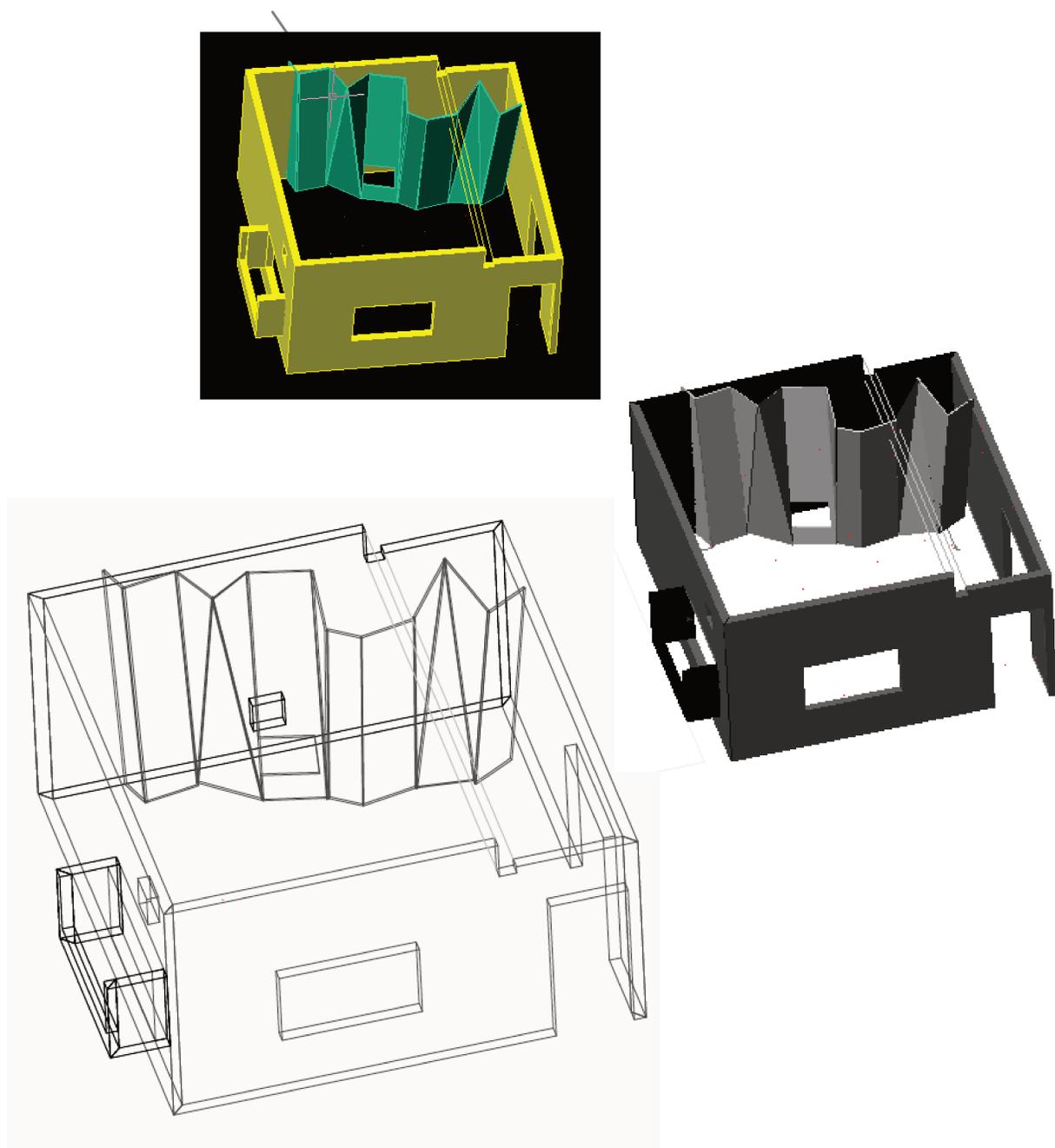


Figura 8.1 – *Superfície serial difusora* LNSS2 em gesso duplo acartonado sobre a parede ao fundo da Sala de Gravação do Estúdio do LAMI/ECA/USP. Embaixo de um dos elementos centrais, nota-se abertura para entrada natural de ar.

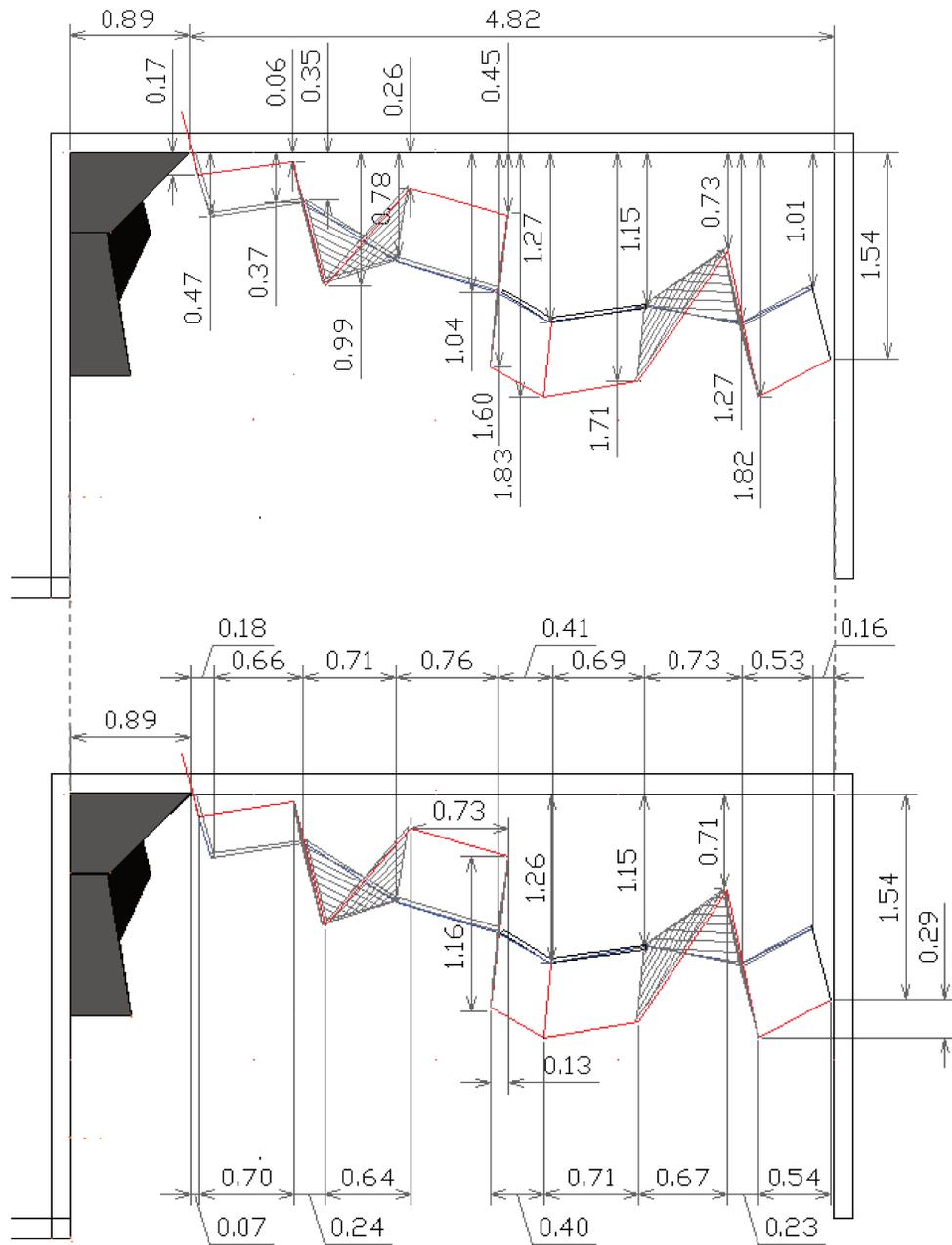


Figura 8.2 – Coordenadas para instalação da *superfície serial difusora* LNSS2 em gesso duplo acartonado. À esquerda, para referência, parte da parede de madeira lateral.

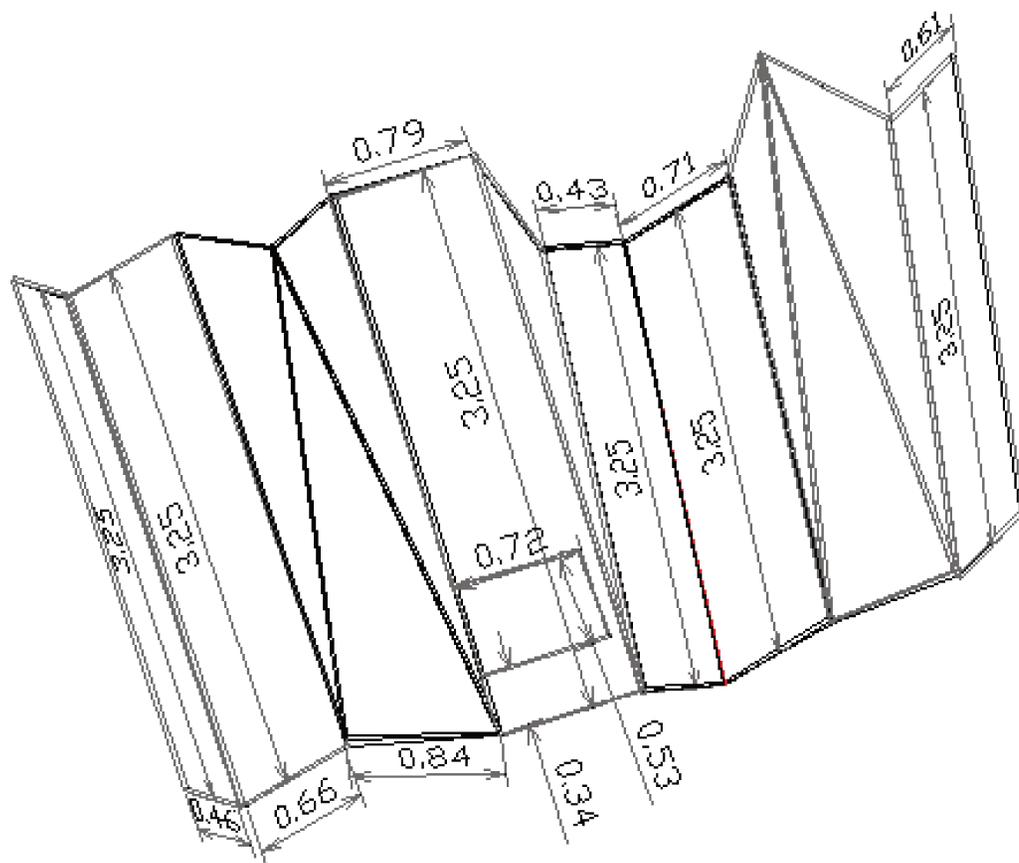


Figura 8.3 - Dimensões de elementos da *superfície serial difusora* LNSS2 projetada para o LAMI em gesso duplo acartonado.

8.1.3 Melhorias esperadas na sala de captação de som do LAMI com a adequação acústica

As implementações propostas tem por objetivo:

- Minimizar efeitos dos modos normais na sala;
- Obter uma mistura equilibrada das fontes sonoras dispostas em diferentes pontos do estúdio;
- Proporcionar que na maior abrangência possível se tenha uma mistura uniforme de fontes sonoras dispostas em diferentes posições;
- Obter o tempo de reverberação maior possível garantindo um melhor preenchimento do som;
- Harmonizar as respostas em frequência dos tempos de reverberação considerando as necessidades à performance e audição musical (Cf.3.3.5);
- Eliminar reflexões indesejadas, sobretudo eventuais *flutter echo*;
- Fazer com que os músicos se sintam bem tocando no local;
- Proporcionar condições para uma escuta técnica apurada mesmo se for necessário no espaço de tomada de som.
- ter *clareza* de forma satisfatória na maior abrangência possível da sala;
- minimizar os efeitos de eco devido às superfícies paralelas;
- Fazer com que músicos tenham um bom retorno entre si e uma escuta equilibrada e agradável.

Os difusores concebidos para este caso devem proporcionar potencialização da reverberação (sem perda de energia das ondas incidentes Cf. 4.6.1, p. 162; 4.6.1.1, p. 162) e conseqüentemente do *preenchimento do som*.

Conforme exposto no *item 2.4 (p. 61)* que as adequações desenvolvidas para o LAMI não tiveram uma possibilidade de ser realizadas e portanto não puderam ser medidas. A oportunidade de emprego do aplicativo ANSYS para análise modal por elementos finitos surgiu

somente no final do processo deste pesquisa e só pode ser utilizado em cálculo bidimensional, enquanto que a análise das superfícies do LAMI requerem cálculo tridimensional.

Contudo, foi uma opção ter conservado todo o processo de adequação do LAMI neste trabalho, pela inspiração que proporcionou ao desenvolvimento e à formalização das superfícies difusoras, sem o qual esta pesquisa não teria ocorrido.

8.2 PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO ACÚSTICA PARA AUDITÓRIO E CABINE DE CONTROLE DE GRAVAÇÃO DA SALA VILLA-LOBOS, UNI-RIO (RJ)

8.2.1 Proposta para auditório: Sala Villa-Lobos

A proposta de adequação acústica do *auditório* da Sala Villa-Lobos atende as seguintes necessidades:

- Minimização de efeitos dos *modos normais*:
 - modificando a geometria das partições internas dando-lhes formas irregulares;
 - alterando a profundidade do Auditório de forma que se aproxime de resultados mais desejados conforme Diagrama de Bonello e Proporções de Bolt, Beranek e Newman ambos vistos em 7.5.2.2 *Avaliação das necessidades* (p. 229 et seq.);
 - desalinhando as superfícies laterais tanto o quanto for possível, no limite das poltronas a serem instaladas assegurando a manutenção da capacidade da platéia esperada;
- Juntamente com a minimização dos efeitos dos *modos normais*, melhoria de qualidade acústica à prática musical potencializando *vivacidade* (RT_{60} e EDT), *preenchimento do som*, *espacialidade*, *fração de energia lateral* (LF), *center time* (CT), *fator de suporte* ($ST1$), *difusão*, *balanço*, *mistura*, *conjunto*, *ausência de eco* e *uniformidade*:
 - através da instalação no palco uma *superfície serial difusora linear* - LNSS;
- Não prejudicar o *balanço tonal* (TB) com colorações inconvenientes:
 - alternando materiais de revestimento possuindo coeficientes de absorção variados (DE MARCO, 1982).
- Assegurar um direcionamento da projeção sonora sobre a audiência:

- através de superfícies laterais irregulares e rebatedores sobre o palco e sobre a platéia, fortalecendo *EDT*, *clareza*, *center time (CT)*, *Fator de Força (G)*, *Fração de Energia Lateral (LF)*, *espacialidade (ASW e LEV)*.
- Isolamento acústico entre a área externa e o *auditório*
 - com duas portas e um corredor intermediário evitando vazamento de ruídos de circulação e externos.

8.2.2 Proposta para Cabine de controle de gravação: Sala Villa-Lobos

A proposta de adequação acústica da *cabine de controle de gravação* da Sala Villa-Lobos atende às seguintes necessidades:

- Minimização dos efeitos dos *modos normais* procurando proporcionar, na medida do possível, uma RFZ:
 - modificando a geometria das partições internas dando-lhes formas irregulares e adequadas;
- Além da minimização dos efeitos dos *modos normais*; atendimento dos requisitos para uma concepção de *design LEDE* da sala; melhoria de qualidade da escuta musical resultando em melhores índices de *vivacidade (RT₆₀ e EDT)*, *preenchimento do som*, *espacialidade*, *fração de energia lateral (LF)*, *center time (CT)*, *Difusão*, *Balço*, *Mistura*, *Conjunto*, *Ausência de eco e Uniformidade*:
 - instalando uma *superfície serial difusora com elementos semicilíndricos* – SCSS ao fundo;
- Não prejudicar o *balço tonal (TB)* nem proporcionar qualquer coloração inconveniente:
 - alternando na medida do possível materiais com coeficientes de absorção variados no revestimento aparente interno (DE MARCO, 1982).

8.2.3 Projeto: Auditório

O projeto compreende:

- SUPERFÍCIE SERIAL DIFUSORA – LNSS
 - Material: gesso duplo acartonado complementada com lã de vidro colada por trás;
 - Geometria: irregular, conforme *Proposta 1 LNSS*
 - Instalação: ao fundo do palco com estrutura de perfis metálicos;
 - Finalidades:
 - Produzir difusão em ampla banda de frequências;
 - Inibir eventuais efeitos de *modos normais*;
 - Melhoria da mistura sonora no palco e, conseqüentemente, da distribuição dos sons entre os músicos;
 - Dar mais profundidade à imagem sonora da sala, dadas suas dimensões reduzidas;

- SUPERFÍCIES LATERAIS
 - Materiais alternados: gesso duplo acartonado; compensado de madeira, placas revestidas de cerâmica ou azulejos (este último podendo ser revestido após medição final conforme eventuais necessidades de absorção).
 - Geometria: irregular, porém orientada para rebater as fontes sonoras de diversos pontos do palco para toda a platéia e limitando-se ao espaço entre a parede de alvenaria e o final da coluna sem invadir os assentos da platéia;
 - Instalação: nas laterais, no sentido do comprimento da sala, com materiais alternados de um elemento a outro;
 - Finalidades:

- Distribuir as primeiras reflexões uniformemente pela sala;
- Minimizar reflexões indesejadas e ondas estacionárias entre as superfícies laterais paralelas;
- Procurar minimizar efeitos de *modos normais*;
- Melhoria da qualidade da sala às práticas musicais.

- REBATEDORES DE PALCO

- Material: placas de compensado sobre estrutura metálica;
- Geometria: placas retangulares;
- Instalação: sobre estruturas metálicas móveis, podendo ser deslocadas pelo palco conforme a formação musical em performance;
- Finalidades:
 - Melhorar, através superfícies reflexivas próximas às fontes sonoras, as primeiras reflexões do som proveniente do palco para a platéia;
 - Aumentar o nível e a inteligibilidade do som oriundo do palco percebido pela platéia;
 - Tornar mais perceptíveis detalhes de articulações executadas nas fontes sonoras;
 - Melhoria da qualidade da sala às práticas musicais.

- REBATEDORES DE TETO

- Material: placas de compensado;
- Geometria: placas retangulares envergadas proporcionando maior espalhamento sonoro;
- Instalação: montagem dos elementos e posterior instalação pendurando cada uma ao forro atual com quatro cabos metálicos, sobre o palco e sobre a platéia;

- Finalidades:
 - Melhorar as primeiras reflexões do som proveniente do palco para a platéia;
 - Aumentar o nível e a inteligibilidade do som oriundo do palco percebido pela platéia;
 - Tornar mais perceptíveis detalhes de articulações executadas nas fontes sonoras;
 - Melhoria da qualidade da sala às práticas musicais.

- SUPERFICIE ANTERIOR (ENTRADA DO PUBLICO)
 - Material: gesso duplo acartonado com lã de vidro colada por trás;
 - Geometria: placas constituindo plano irregular inclinado;
 - Instalação: Sobre estrutura de perfis metálicos;
 - Finalidades:
 - Evitar reflexões indesejadas entre o palco e a parede frontal ao fundo no nível da platéia;
 - Evitar eco;
 - Inibir eventuais efeitos de *modos normais*;
 - Espalhar as ondas sonoras que atingem a parte traseira da sala.
 - Proporcionar melhor isolamento do ambiente externo;
 - Evitar a interferência de ruídos ocasionados por pessoas entrando na sala ou em circulação na entrada da sala.

- SUPERFICIE ANTERIOR NIVEL SUPERIOR (DIANTE DA CABINE)
 - Material: gesso duplo acartonado com lã de vidro colada por trás;

- Geometria: placas constituindo dois planos em ‘V’ com inclinações de 6° cada um em relação à parede dianteira da *cabine de controle de gravação*;
- Instalação: em estrutura metálica fixada à parede dianteira da cabine;
- Finalidades:
 - Evitar reflexões indesejadas entre o palco e a parede frontal no nível da cabine;
 - Evitar eco;
 - Inibir eventuais efeitos de *modos normais*;
 - Espalhar as ondas sonoras que chegam ao fundo da sala.

8.2.3.3 Palco

O palco compreende:

- ao fundo uma parede com *superfície serial LNSS*;
- ao lado direito de quem olha para a cena, uma parede em ‘V’ para evitar *modos normais axiais* entre as superfícies laterais do palco;
- com deslocamento livre pelo palco, porém com marcações definidas de posicionamentos, 6 (seis) rebatedores de palco, sendo 3 (três) do lado esquerdo e 3 do lado direito;
- sobre o palco, em alturas e ângulos definidos, rebatedores de teto sobre o palco.

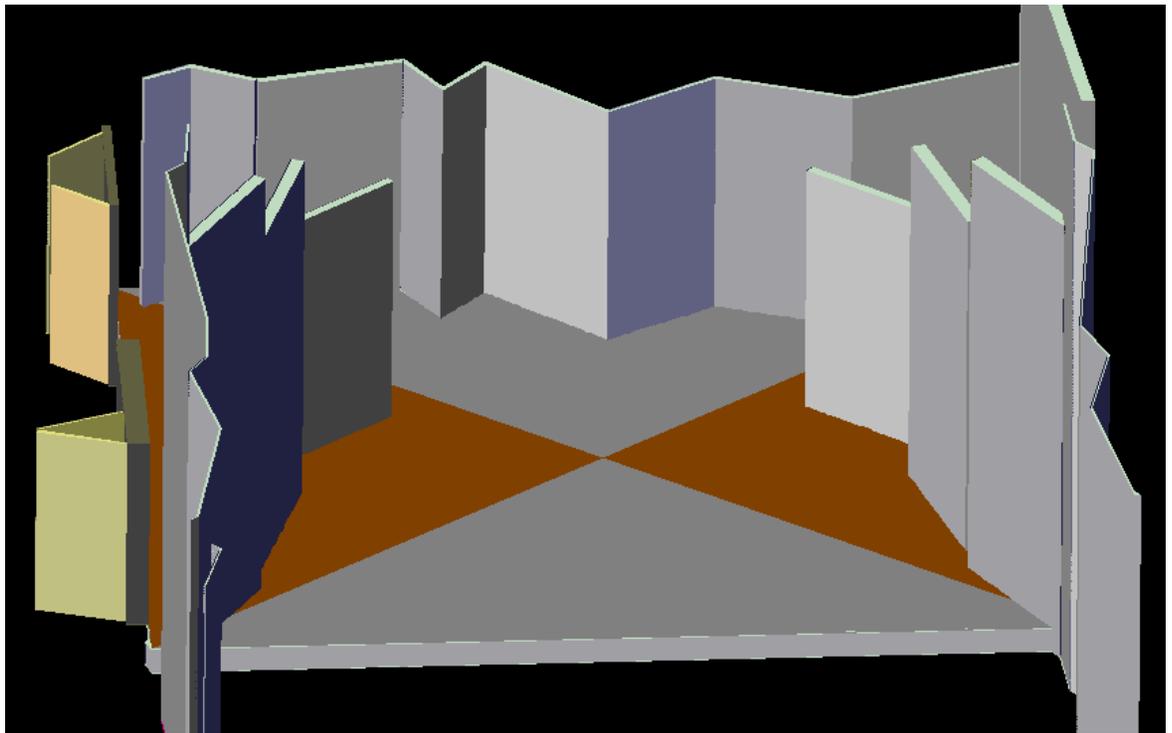


Figura 8.6 – Palco visto da *cabine de controle de gravação*: ao fundo superfície LNSS.

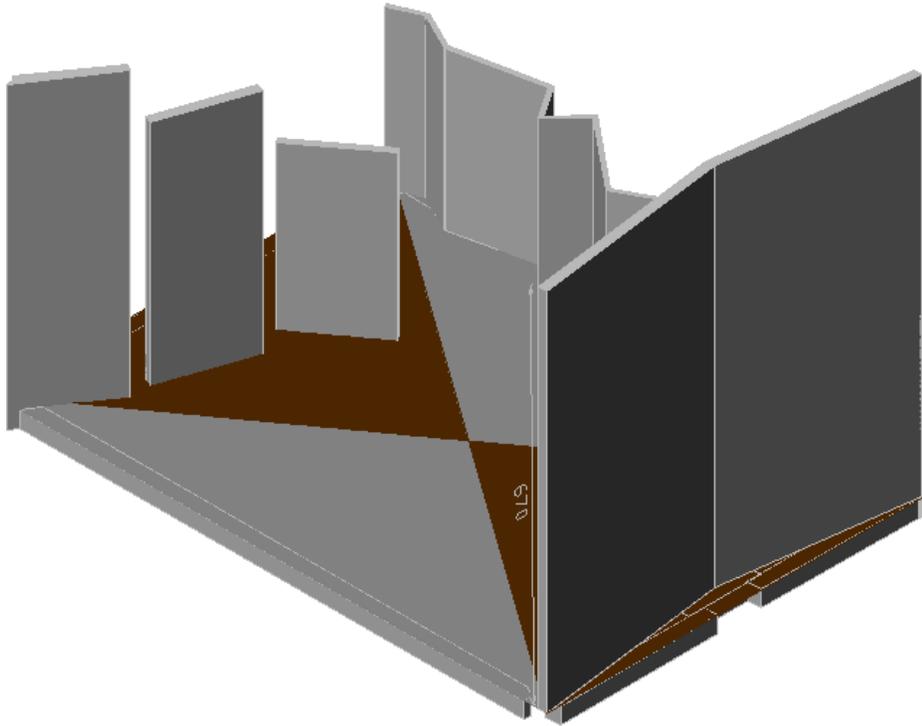


Figura 8.7 – Rebatedores de palco, Parede lateral reflexiva em ‘V’; Superfície serial ao fundo.

8.2.4 Projeto: Cabine de Controle de Gravação

O projeto compreende:

- SUPERFÍCIE SERIAL DIFUSORA – SCSS
 - Material: tubos de PVC em meia cana, pintados;
 - Geometria: série de cilindros com a parte convexa para fora, conforme *Proposta 3*
 - Instalação: ao fundo da cabine fixados a uma superfície de base lisa em forma de ‘V’ com inclinações de 8° em relação à alvenaria da parede original ao fundo;
 - Finalidades:
 - Produzir difusão em ampla banda de frequências;
 - Inibir eventuais efeitos de *modos normais*;
 - Melhoria da mistura sonora na cabine;

- Dar mais profundidade ao ambiente de escuta através de reflexões difusas por trás;
- SUPERFÍCIES LATERAIS E TETO
 - Materiais: Placas de compensado.
 - Geometria: superfícies lisas e lineares abrindo em expansão no sentido do fundo da cabine, lembrando um pavilhão de saída dos instrumentos da família dos metais, porém com abertura linear ao invés de exponencial;
 - Instalação: sobre estrutura de madeira;
 - Finalidades:
 - Evitar reflexões indesejadas e ondas estacionárias entre superfícies paralelas (paredes laterais e teto e piso);
 - Inibir efeitos de *modos normais*;
 - Favorecer a propagação das ondas sonoras, proporcionando uma expansão natural mais livre, sobretudo às frentes de onda das primeiras reflexões das gravações monitoradas.
- SUPERFÍCIE DIANTEIRA INTERNA
 - Materiais: Gesso duplo acartonado.
 - Geometria: Superfície lisa inclinada para frente;
 - Instalação: sobre a parede em alvenaria entre a cabine e o auditório;
 - Finalidades:
 - Evitar reflexões no sentido longitudinal da cabine, dirigindo as ondas incidentes para o piso;
 - Inibir efeitos de *modos normais*;
- RESERVADO TÉCNICO
 - Material: placas de compensado;
 - Geometria: placas retangulares;
 - Instalação: sobre estrutura de madeira. Trata-se da mesma superfície que a lateral direita da cabine em expansão;
 - Finalidades:

- Entrepasto de equipamentos e materiais de consumo;
- PAREDE ENTRE O ALTO DA ESCADA E A ENTRADA DA CABINE
 - Material: alvenaria;
 - Geometria: reta;
 - Instalação: sobre a laje do mezanino;
 - Finalidades:
 - Isolamento sonoro entre a cabine e a entrada do auditório, onde há circulação de pessoas e ruídos externos quando a porta de entrada está aberta.
- SUPERFICIE EXTERNA DA CABINE INTEGRANDO O AUDITÓRIO
 - Material: gesso duplo acartonado com lã de vidro colada por trás;
 - Geometria: placas constituindo dois planos em ‘V’ com inclinações de 6° cada um em relação à parede dianteira da *cabine de controle de gravação*;
 - Instalação: em estrutura metálica fixada à parede dianteira da cabine no mezanino;
 - Finalidades:
 - Evitar reflexões indesejadas entre o palco e a parede frontal no nível do mezanino;
 - Evitar eco;
 - Inibir eventuais efeitos de *modos normais*;
 - Espalhar as ondas sonoras que chegam ao fundo da sala.

8.2.4.1 Vista frontal

A frente da cabine na *Figura 8.8* é vista da platéia, na altura do mezanino. Está inclinada em duas ‘águas’ projetando às laterais as ondas sonoras que chegam ao fundo do auditório. Esta superfície não tem efeito na acústica interna da cabine, a não ser pelo fato que

proporciona um melhor isolamento entre a cabine e o auditório, considerando que a janela de vidro esteja devidamente fechada e isolada.

Vêm-se as paredes laterais em expansão na direção ao fundo da cabine e a superfície difusora ao fundo constituída de tubos em meia cana.

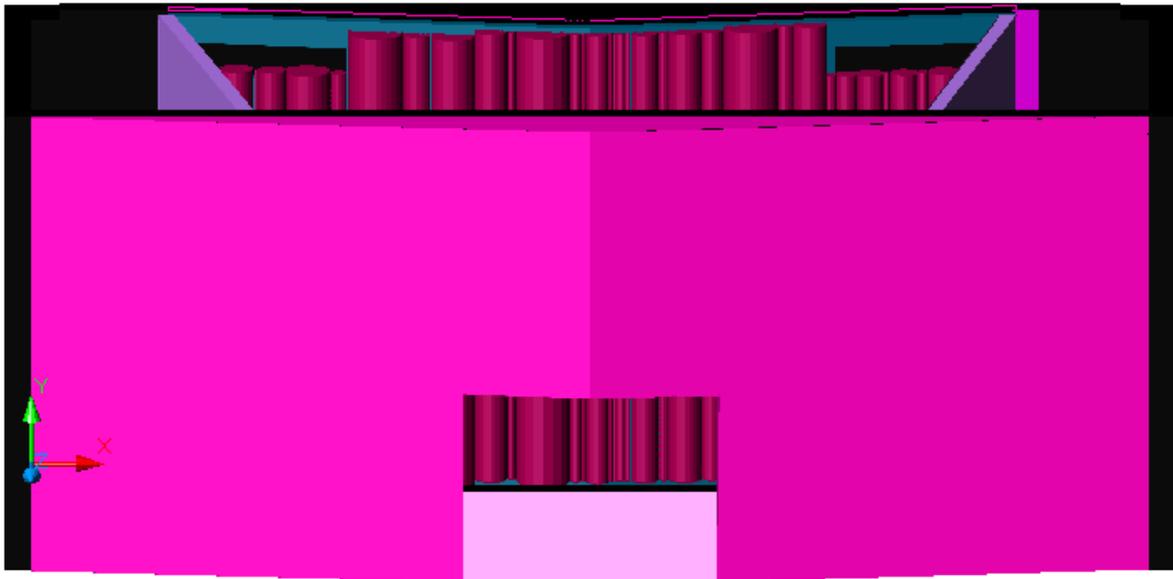


Figura 8.8 – Vista frontal da *cabine de controle de gravação* (a partir da platéia na altura do mezanino).

8.2.4.2 Superfície serial ao fundo da cabine

Ao fundo da *cabine de controle de gravação*, a *superfície serial difusora* SCSS concebida conforme a *Proposta 3*.

Tubos em meia cana aplicados sobre superfície em ‘V’ com inclinação de 8°.

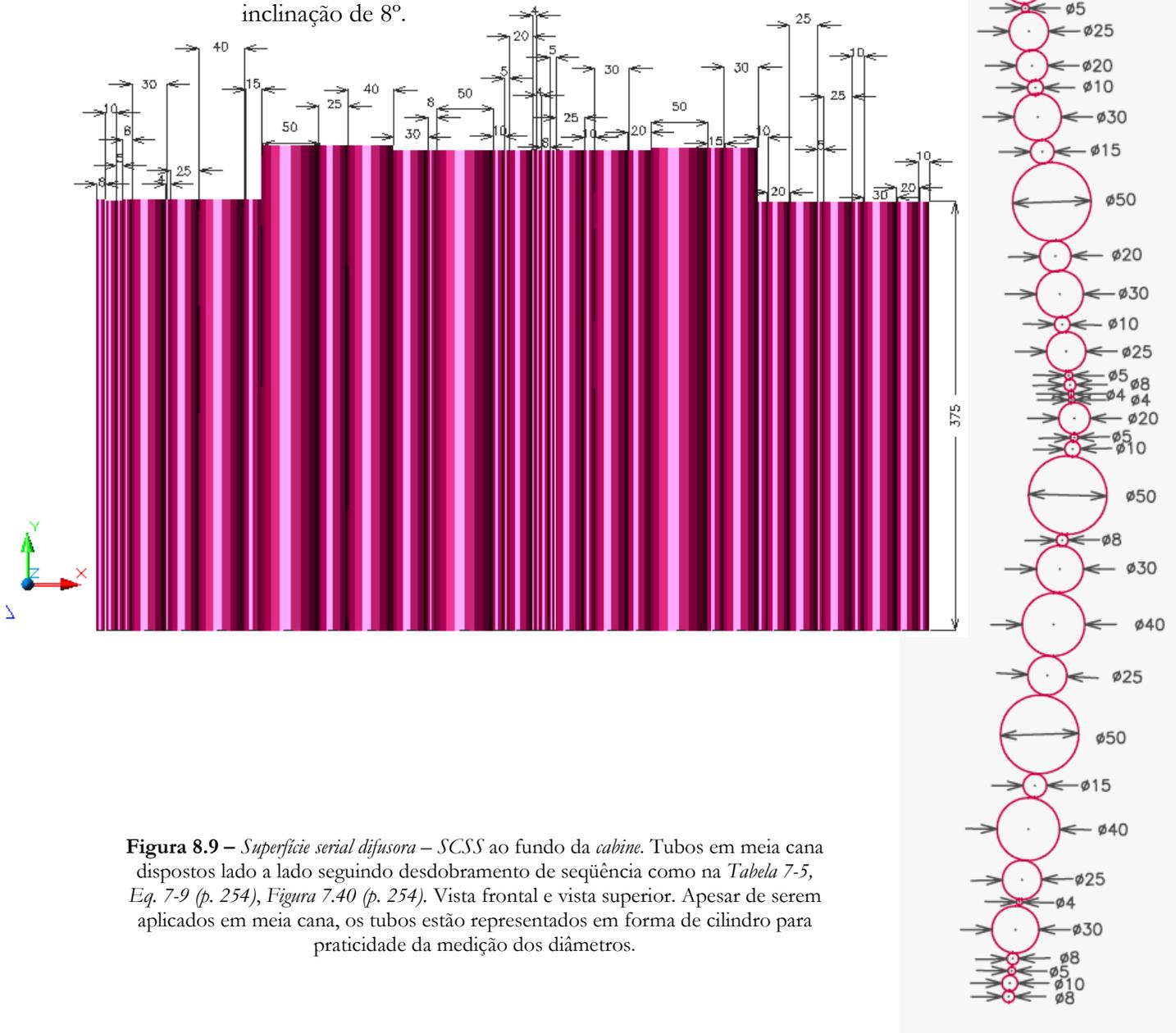


Figura 8.9 – Superfície serial difusora – SCSS ao fundo da *cabine*. Tubos em meia cana dispostos lado a lado seguindo desdobramento de seqüência como na *Tabela 7-5*, *Eq. 7-9* (p. 254), *Figura 7.40* (p. 254). Vista frontal e vista superior. Apesar de serem aplicados em meia cana, os tubos estão representados em forma de cilindro para praticidade da medição dos diâmetros.

8.2.4.3 Vista superior

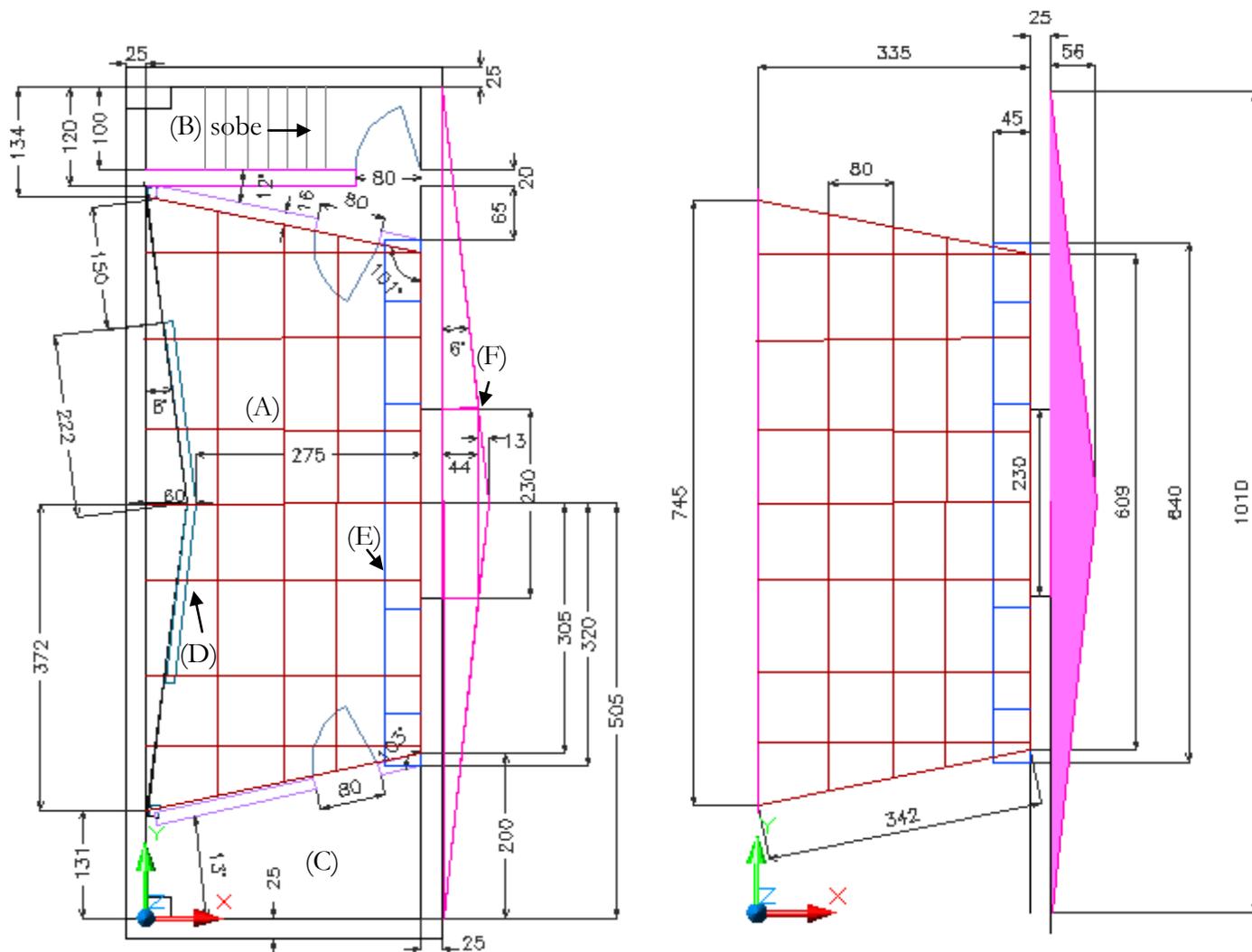


Figura 8.10 – Vista superior: dimensões das partições e aberturas e ângulos das inclinações. (A) cabine de controle de gravação; (B) escada de acesso ao mezanino; (C) reservatório técnico; (D) superfície de base para fixação dos tubos em meia cana da superfície SCSS; (E) superfície sobre a parede dianteira da cabine projetando as ondas incidentes ao solo; (F) parede externa da cabine dando para o Auditório.

8.2.4.4 Vista lateral

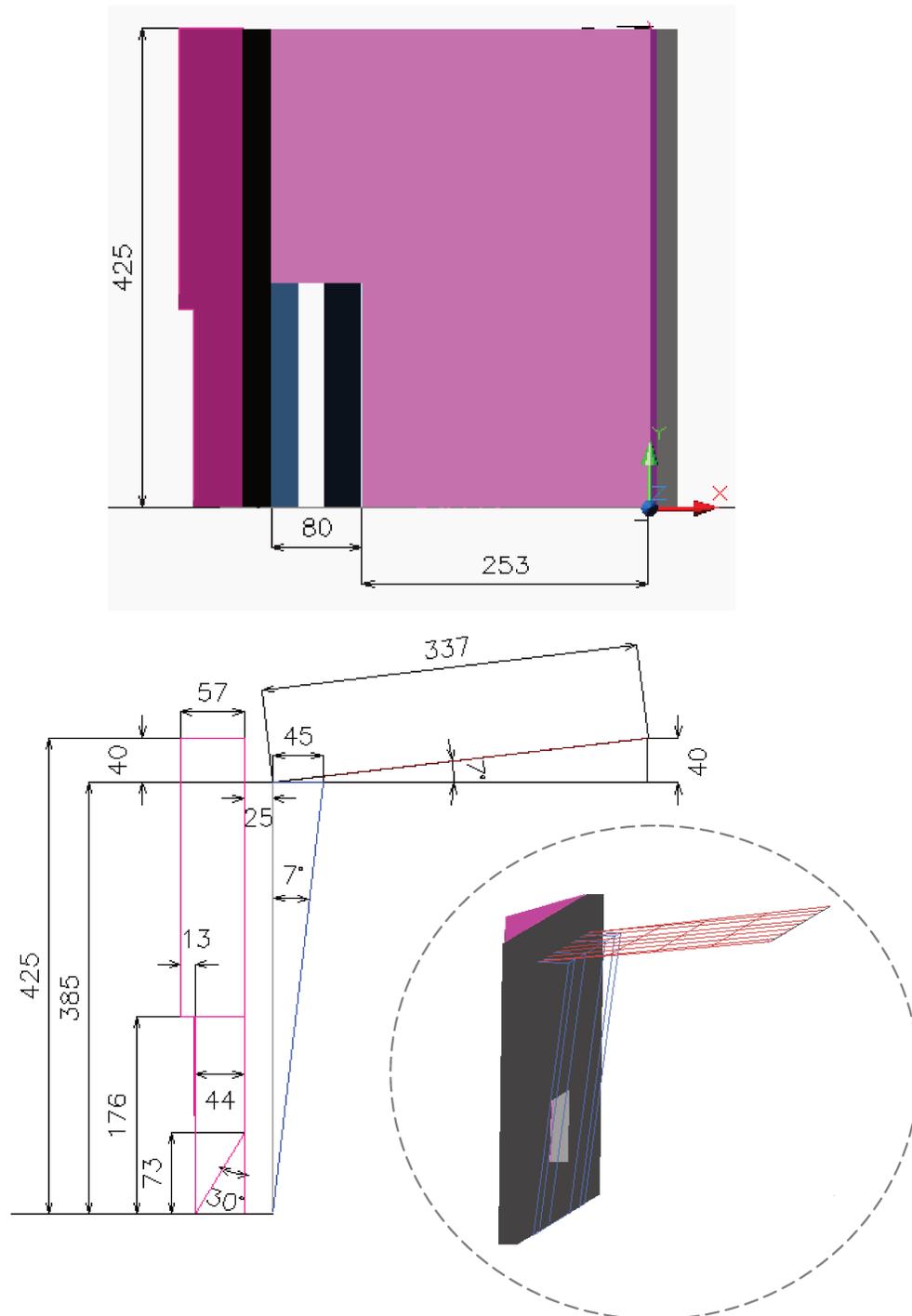


Figura 8.11 – Vista lateral: medidas das três partições dianteiras; inclinação do teto e da parede dianteira interna.

8.2.4.5 Lateral aberta em perspectiva sem superfícies internas laterais

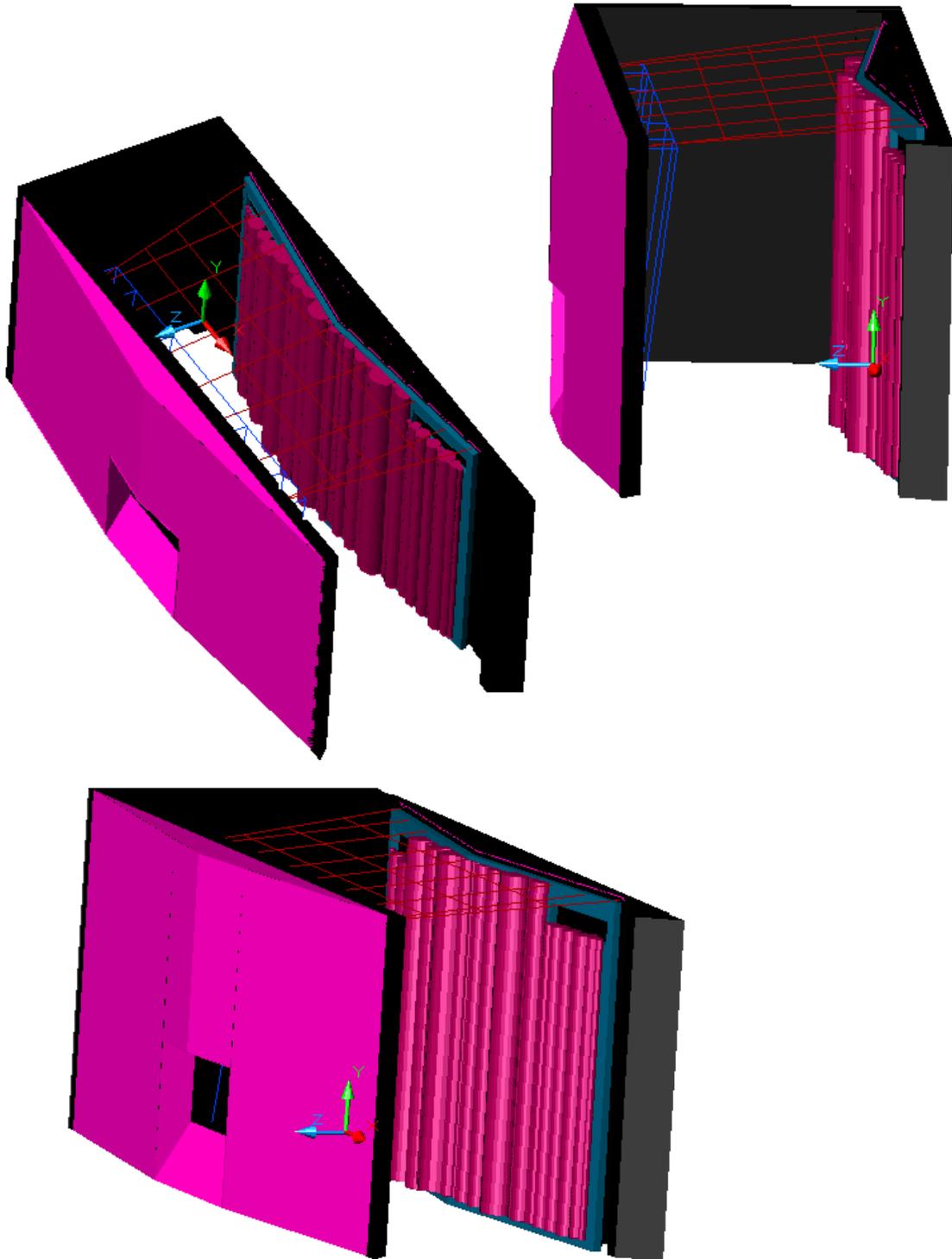


Figura 8.12 – Vistas em perspectiva sem superfícies internas laterais. Vê-se a estrutura do teto vazada.

8.2.4.6 Vista superior e inferior em perspectiva com todas as superfícies

Na *Figura 8.13* pode-se ver em perspectiva o *reservado técnico* e a parede de alvenaria lateral ao alto da escada, onde estão previstas duas portas na entrada na cabine.

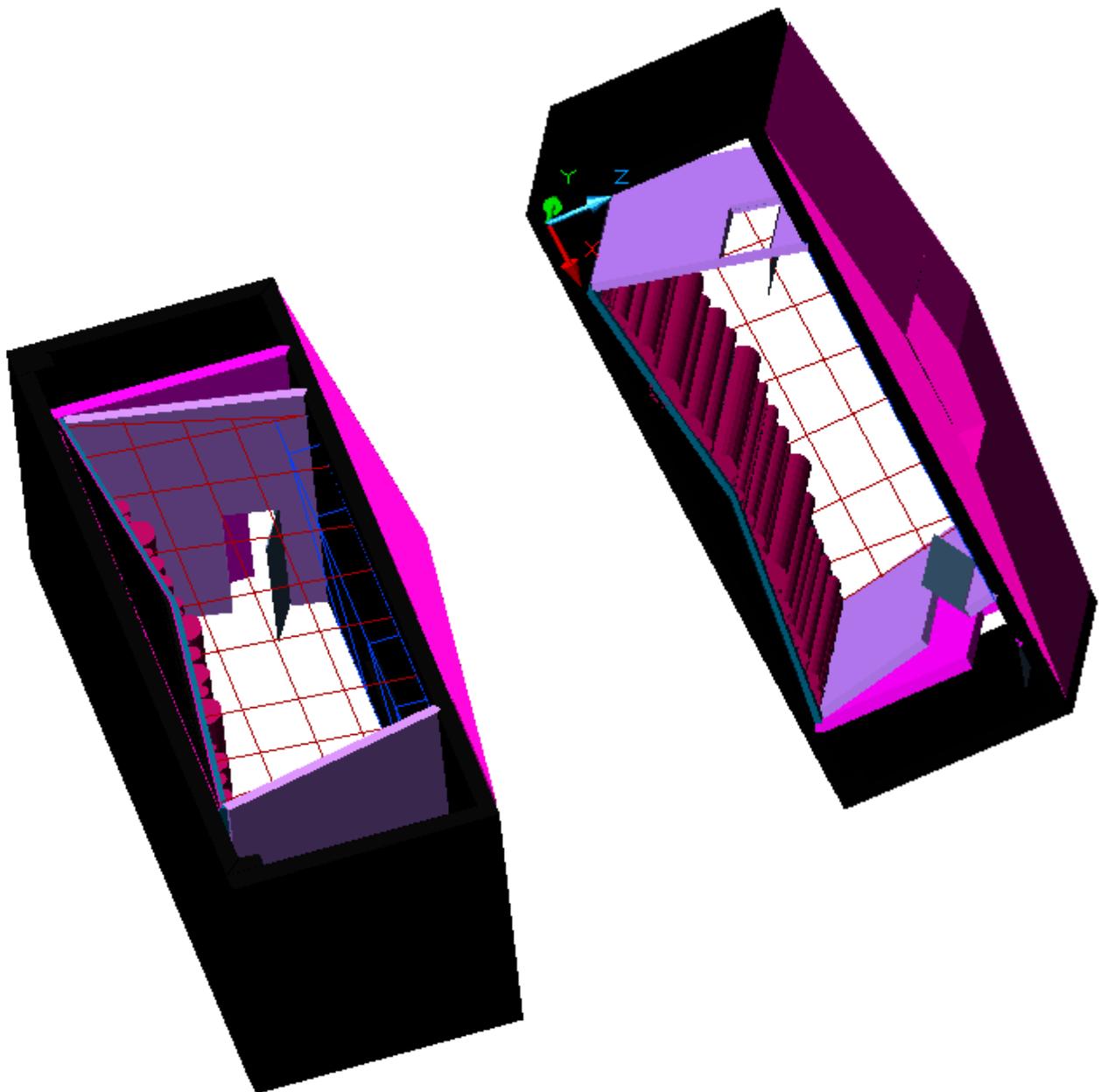


Figura 8.13 - Vistas em perspectiva superior e inferior com todas as superfícies.

8.2.5 Melhorias esperadas com o projeto de adequação da Sala Villa-Lobos

Com as implementações planejadas espera-se:

- Minimizar efeitos dos modos normais nas respostas do auditório e da cabine de controle de gravação;
- Proporcionar uma mistura uniforme de fontes dispostas em diferentes locais da Cabine;
- Proporcionar condições para uma escuta técnica apurada na Cabine;
- Obter um tempo de reverberação suficiente para uma escuta técnica agradável e de boa qualidade na Cabine;
- Obter um tempo de reverberação suficiente à execução musical no Auditório;
- Melhorar a sensação de *espacialidade* dentro da Cabine, com uma difusão ao fundo, compensando a pequena profundidade do local;
- Harmonizar a resposta em frequência da reverberação às necessidades próprias à música;
- Eliminar reflexões indesejadas, sobretudo *flutter echo*;
- Fazer com que músicos se sintam acusticamente bem tocando no Auditório;

No caso específico do auditório da Sala Villa-Lobos:

- Obter uma mistura equilibrada das fontes sonoras dispostas em diferentes pontos do palco;
- ter *intimidade* e *clareza* de forma satisfatória na maior abrangência possível da platéia;
- minimizar os efeitos de eco devido às superfícies paralelas;
- Fazer com que músicos tenham um bom retorno entre si no palco e que a audiência possa ter uma escuta equilibrada e agradável.

Para todas as *superfícies seriais difusoras* concebidas, espera-se que proporcionem reverberação sem perda de energia das ondas incidentes (*Cf. 4.6.1, p. 162; 4.6.1.1, p. 162*) de forma a potencializar o *preenchimento do som*.

8.2.6 Medições após realização parcial dos trabalhos

Concluída a etapa inicial dos trabalhos, foram efetuadas, em 22 de setembro de 2006, medições no *auditório* e na *cabine de controle de gravação* com o aplicativo AcMus desenvolvido na Universidade de São Paulo – USP; método de medida: resposta impulsiva; fontes sonoras: duas caixas acústicas JBL bi amplificadas dispostas conjuntamente, uma voltada à platéia e outra ao fundo do palco, emitindo sinais gerados pelo aplicativo; um microfone de medição ECM8000 Behringer; placa de som EDIROL FA101 e computador Dell Latitude D800.

8.2.6.1 Situação do *auditório* e da *cabine* no momento das medições

8.2.6.1.1 *Auditório*

- Parede ao fundo do palco concluída (*superfície serial linear* LNSS, *Proposta 1*, em gesso duplo acartonado com lã de rocha aderida por trás);
- Parede lateral em ‘V’ à direita do palco concluída. (revestida com azulejos pintados);
- Rebatedores de palco concluídos (em placas de compensado sobre suportes metálicos);
- Superfícies das laterais concluídas (diversos materiais alternados, gesso, placas de compensado e azulejo pintado) sendo que foram executadas até aproximadamente 4,20metros de altura e nos espaços entre as colunas das laterais, estas permanecendo expostas; sobram aproximadamente 3metros de altura de superfícies laterais paralelas separadas de aproximadamente 10metros o que favorece a formação de ondas estacionárias com primeiro modo a aproximadamente 17Hz.
- Superfície ao fundo do *auditório* concluída (Em gesso duplo acartonado com lã de rocha aderida por trás) somente com as

angulações laterais, sem a inclinação adiante para direcionar as ondas incidentes ao piso;

- Superfície em ‘V’ externa à *cabine de controle de gravação* concluída (Em gesso duplo acartonado);
- Rebatedores de teto concluídos (em madeira: placas de compensado envergadas e coladas em molduras evitando que vibrem como uma membrana) divididos em duas fileiras ao longo do teto, e com um único modelo de dimensão para todos. Dois grandes rebatedores sobre o palco acima dos demais e o último rebatedor sob a janela da *cabine* para a sala (os rebatedores que estão em desenho vazado, ou seja, somente o delineamento externo, na *Figura 11.5*) não puderam ser confeccionados;
- Os rebatedores de teto não estavam afinados, ou seja, dispostos e inclinados conforme projetado inicialmente, mas em disposição provisória;
- As poltronas ainda não haviam sido instaladas e a sala estava apenas com pequena ocupação.

8.2.6.1.2 Cabine de controle de gravação

- Superfície difusora ao fundo concluída (*superfície serial difusora* SCSS *Proposta 3*, tubos em meia cana preenchidos internamente e pintados por fora);
- Paredes e teto concluídos (em placas de compensado sobre estrutura de madeira)
- A inclinação da parede dianteira projetando as ondas incidentes ao piso não pode ser confeccionada.
- A parede ao lado da escada para melhorar o isolamento com o ambiente externo não pode ser confeccionada.

8.2.6.2 Pontos de medições no auditório

- FONTE: Centro do palco (emitindo sinal em duas direções: ao público e ao fundo do palco)
- PONTO 1: Centro do corredor central
- PONTO 2: Lateral
- PONTO 3: Corredor Fundo
- PONTO 4: Corredor central deslocado para direita
- PONTO 5: Regente
- PONTO 6: Trompa
- PONTO 7: Percussão

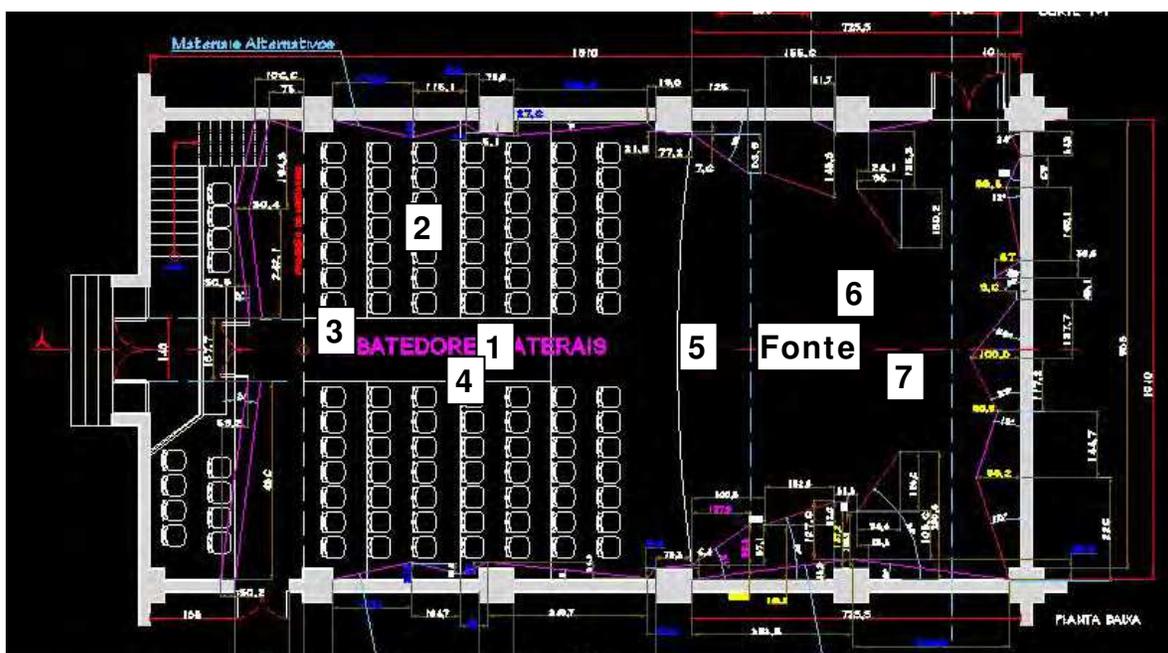


Figura 8.14 – Pontos de medição no *auditório* da Sala Villa-Lobos. Fonte sonora no palco. Microfone: platéia (1 a 4) e palco (5 a 7)

8.2.6.3 Pontos de medições na cabine de controle de gravação

- FONTE: Posição central, no nível do solo. (emitindo sinal em direção à posição do técnico operador, inclinada para cima até 45°)

- PONTO 1: Posição à frente e à direita do técnico operador;
- PONTO 2: Posição ao lado do técnico operador;
- PONTO 3: Posição atrás e à esquerda do técnico operador;
- PONTO 4: Posição lateral afastada à esquerda do técnico operador

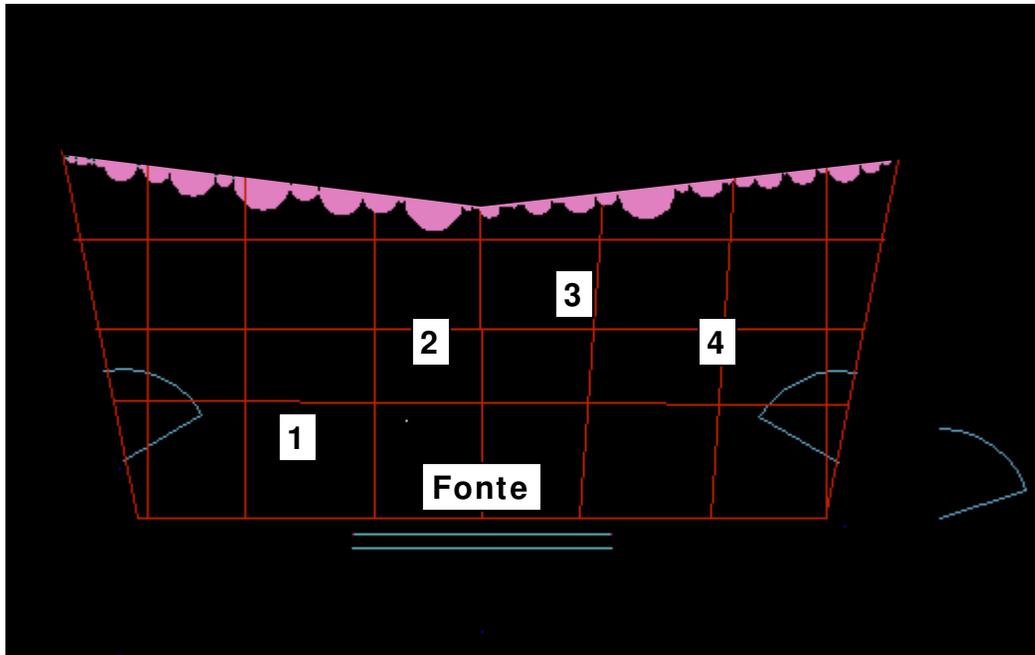


Figura 8.15 – Pontos de medição na *cabine de controle de gravação* da Sala Villa-Lobos.

8.2.6.4 Resultados das medições: Auditório

A linha das abscissas dos gráficos a seguir corresponde aos pontos de medição em cada local (*auditório* e *cabine de controle de gravação*).

8.2.6.4.1 Tempo de reverberação: EDT, T_{20} , T_{30} e T_{40} – RT_{60} inferido.

EDT, T_{20} , T_{30} e T_{40} por banda de oitava, lembrando o cálculo por regressão linear do tempo de caimento medido t_m

$$\begin{aligned}T_{20} &= 5t_m \\T_{30} &= 2t_m \\T_{40} &= \frac{2}{3}t_m\end{aligned}$$

o que permite comparar as inclinações dos caimentos entre si e com o T_{60} .

RT_{60} (500-1K)

Valores usuais: Entre 1,0 e 2,4 segundos

Valores ótimos para música: Entre 1,4 e 2,2 segundos

Valores obtidos: Entre 1,17 e 1,31 segundos

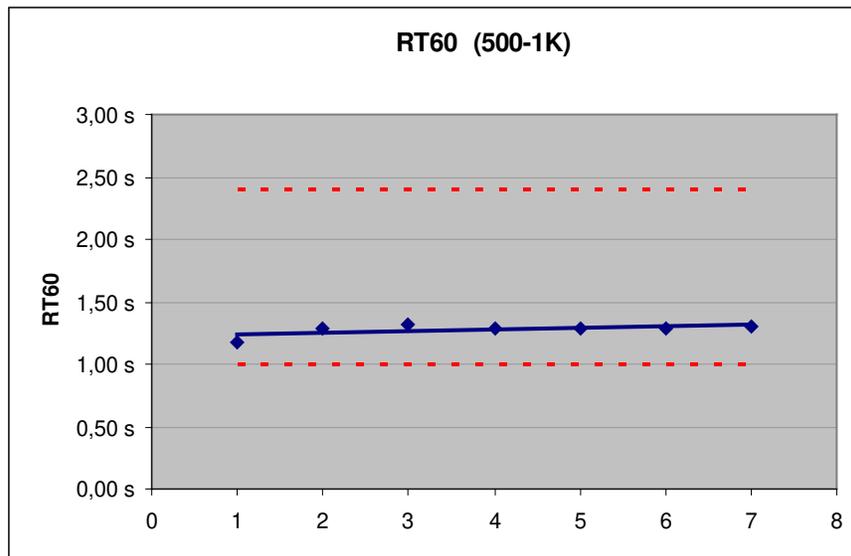


Figura 8.16 – Medições *auditório*: RT_{60} a partir de T_{30} (avg 500 e 1Khz). No eixo das abscissas: pontos de medição na platéia (1 a 4) e no palco (5 a 7).

EDT (500-1K)

Valores usuais: Entre 1,8 e 2,6 segundos (Pisani)
Entre 2,25 e 2,75 segundos (Beranek, melhores salas)
Entre 1,4 e 2,0 segundos (Beranek, salas menos favorecidas)

Valores obtidos: Entre 1,17 e 1,31 segundos

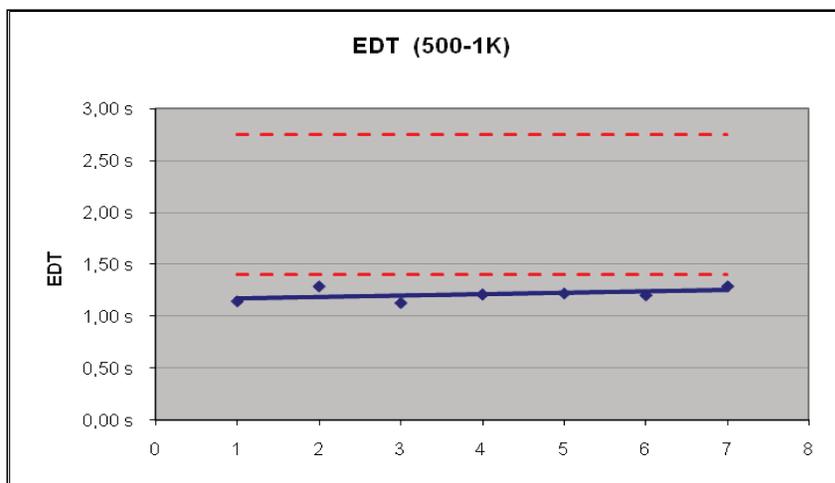


Figura 8.17 – Medições *auditório*: EDT em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Linhas pontilhadas em vermelho indicando valores máximo e mínimo dentre os valores usuais praticados.

Correlação EDT / RT₆₀

Média Beranek (2004, p. 506): 500-1KHz = 0,985

Valores obtidos: Entre 0,85 e 1,01

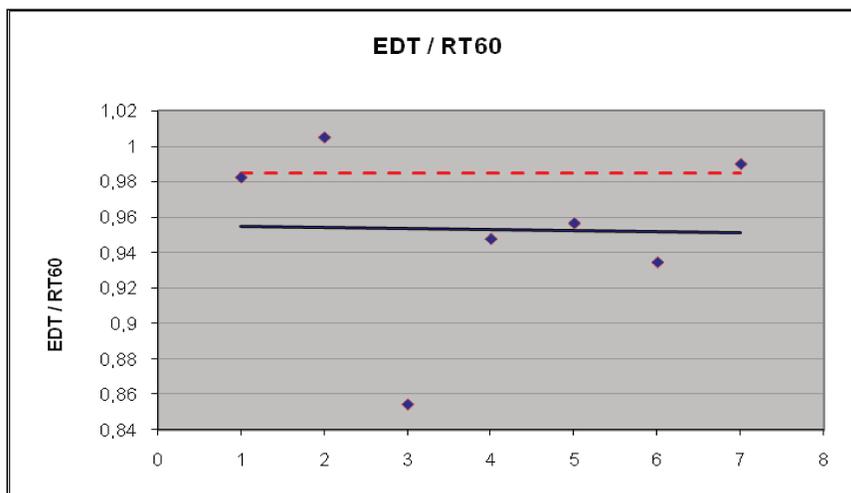


Figura 8.18 – Medições *auditório*: razão entre EDT e RT₆₀ em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Linha pontilhada indicando média de valores obtidos por Beranek (2004, p. 506) em 500-1KHz.

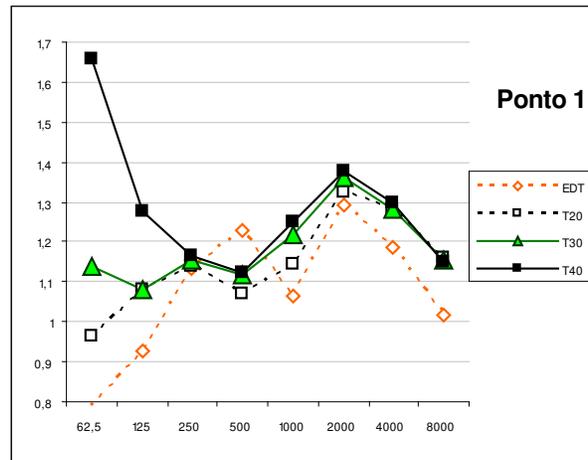


Figura 8.19 – Medições *auditório*: tempo de reverberação por banda de oitava. Ponto 1 (platéia)

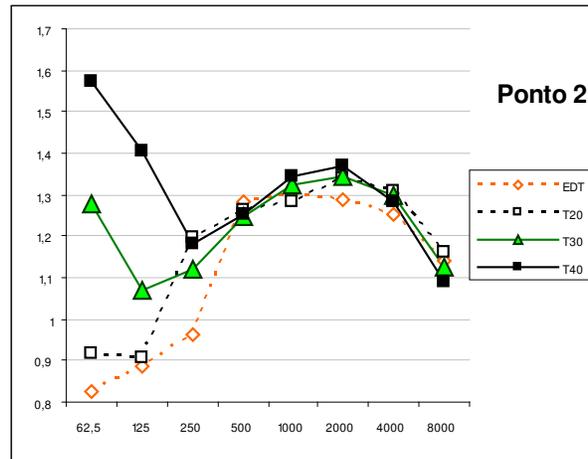


Figura 8.20 – Medições *auditório*: tempo de reverberação por banda de oitava. Ponto 2 (platéia)

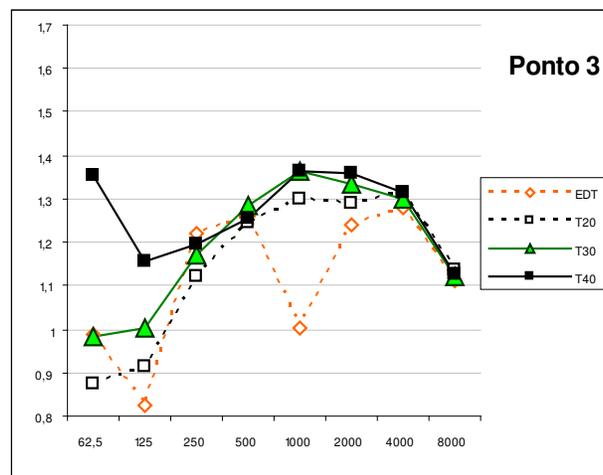


Figura 8.21 - Medições *auditório*: tempo de reverberação por banda de oitava. Ponto 3 (platéia)

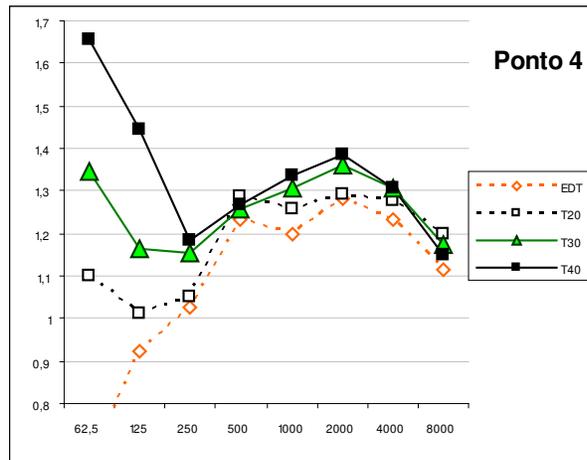


Figura 8.22 - Medições *auditório*: tempo de reverberação por banda de oitava. Ponto 4 (platéia)

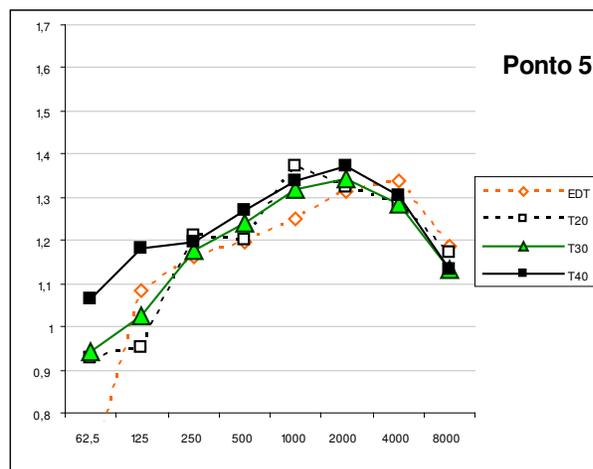


Figura 8.23 – Medições *auditório*: tempo de reverberação por banda de oitava. Ponto 5 (palco)

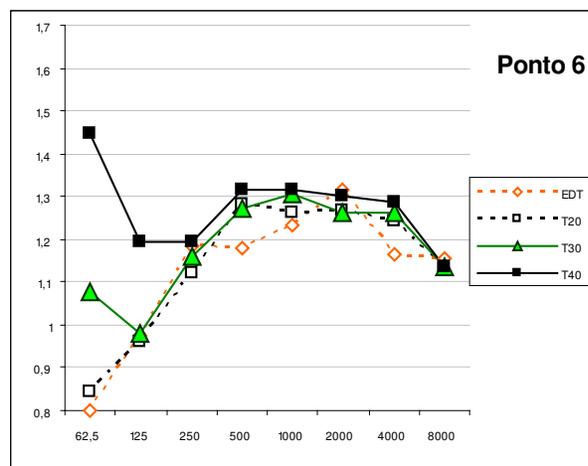


Figura 8.24 – Medições *auditório*: tempo de reverberação por banda de oitava. Ponto 6 (palco)

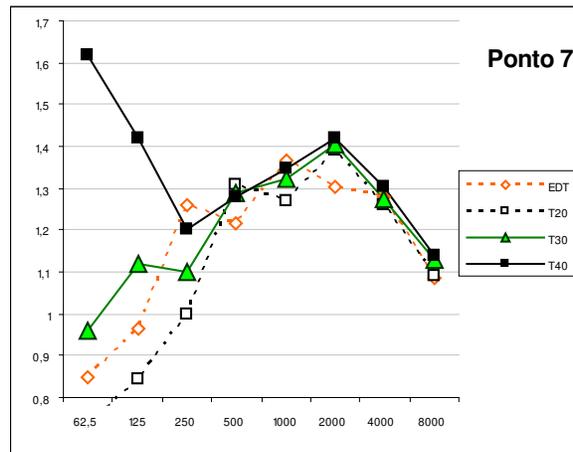


Figura 8.25 - Medições *auditório: tempo de reverberação* por banda de oitava. Ponto 7 (palco)

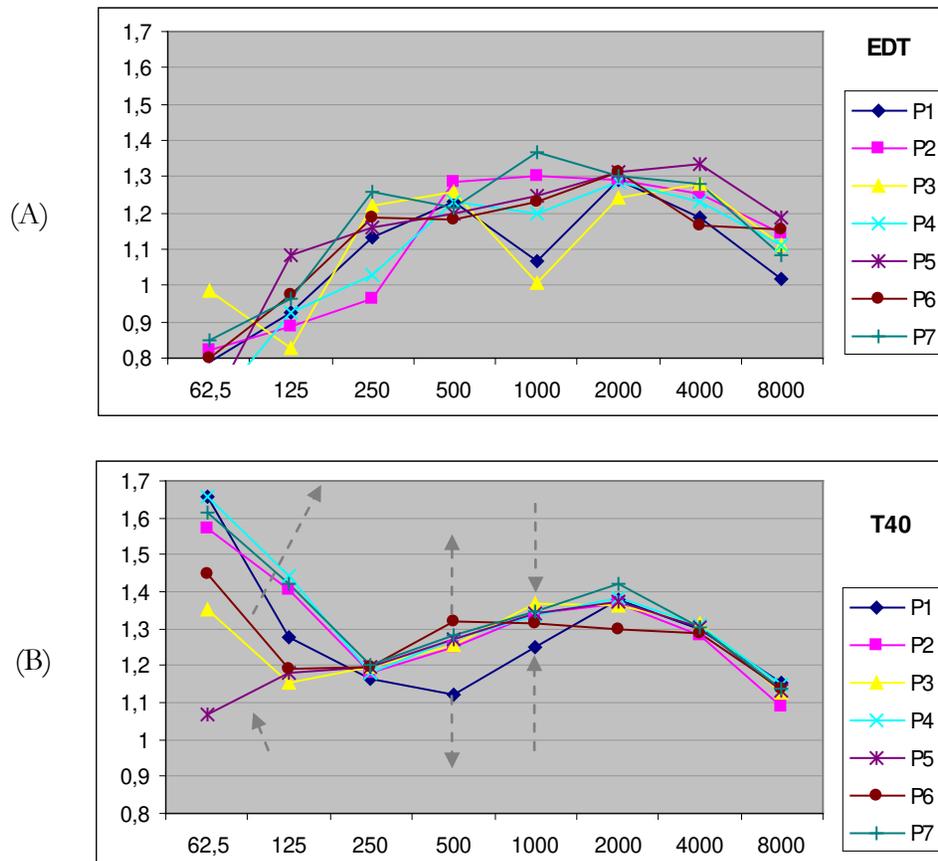


Figura 8.26 – Comparação entre EDT (A) e T_{40} (B) obtidos em todos os pontos de medição. As setas no gráfico abaixo mostram a movimentação das curvas obtidas em cada ponto de medição em relação ao gráfico superior.

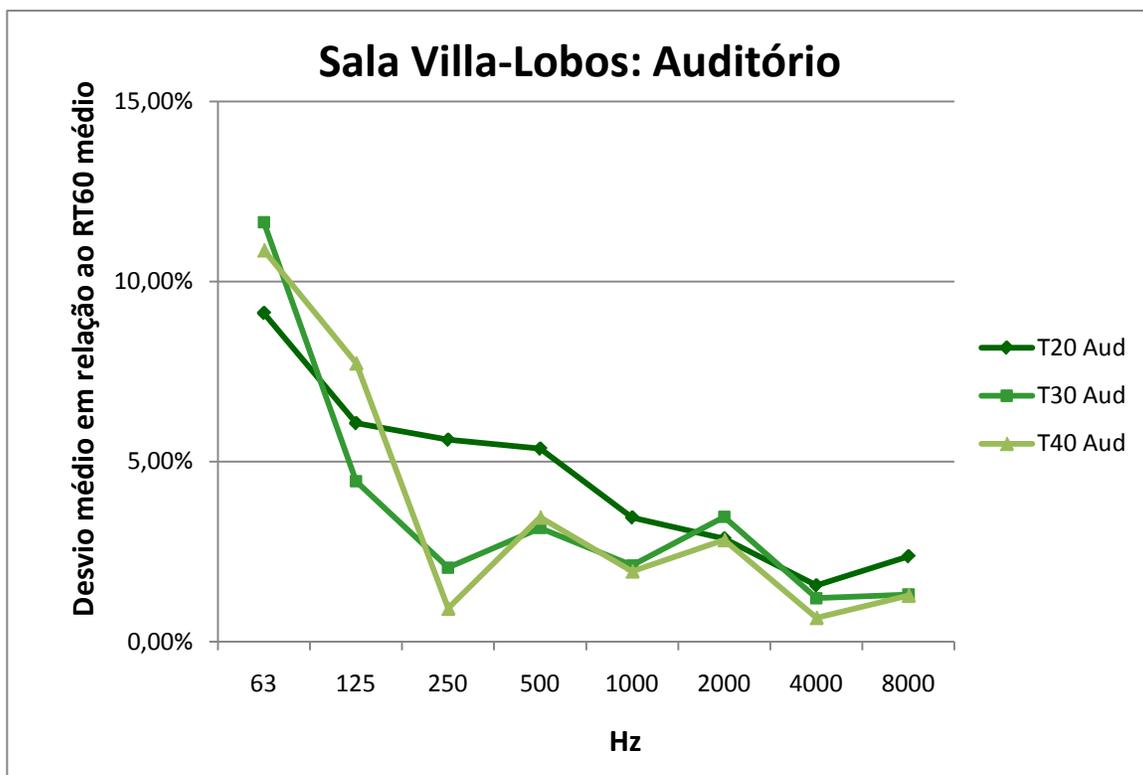


Figura 8.27 – Medições *auditório*: média dos desvios do RT_{60} de cada ponto de medição em cada banda de freqüência em relação à média geral do RT_{60} na mesma banda. (N.B.: O Ponto 3 foi suprimido destes cálculos por estar demasiadamente próximo à parede ao fundo da platéia)

Em cada banda de freqüência, o desvio do resultado em cada ponto de medição em relação à média dos pontos é dado por:

$$desvio P_j = \left| 1 - \frac{T_{20Pj}}{T_{20Fi}} \right| \%$$

numa dada banda F_i ($F_1=63$; $F_2=125$; $F_3=250$; $F_4=500$; $F_5=1K$; $F_6=2K$; $F_7=4K$; $F_8=8KHz$)

sendo

$$\overline{T}_{20Fi} = \frac{\sum_{j=1}^m T_{20Pj}}{m} S$$

j refere-se a cada ponto de medição (*Ponto 1, 2, 3 etc.*)

O desvio médio ao qual se refere o eixo das ordenadas do gráfico da *Figura 8.27* (p. 317) é dado por:

$$\overline{Desvio F_i} = \sum_{j=1}^m \left| 1 - \frac{T_{20Pj}}{\overline{T}_{20Fi}} \right| \%$$

em cada banda F_i de frequência.

8.2.6.4.2 Clareza $C_{80}(3)$

Valores usuais: Entre -4,0 e +5,0dB

Valores ótimos para música: correlação entre $C_{80}(3)$ e RT_{60} ⁵⁶

$$C_{80}(3) = -5,61T_{60} + 8,26 \pm 2 (dB) \quad ^{57}$$

Valores obtidos: Entre -1,2 e 7,0dB

A tendência é aumentar com a sala ocupada e as poltronas instaladas

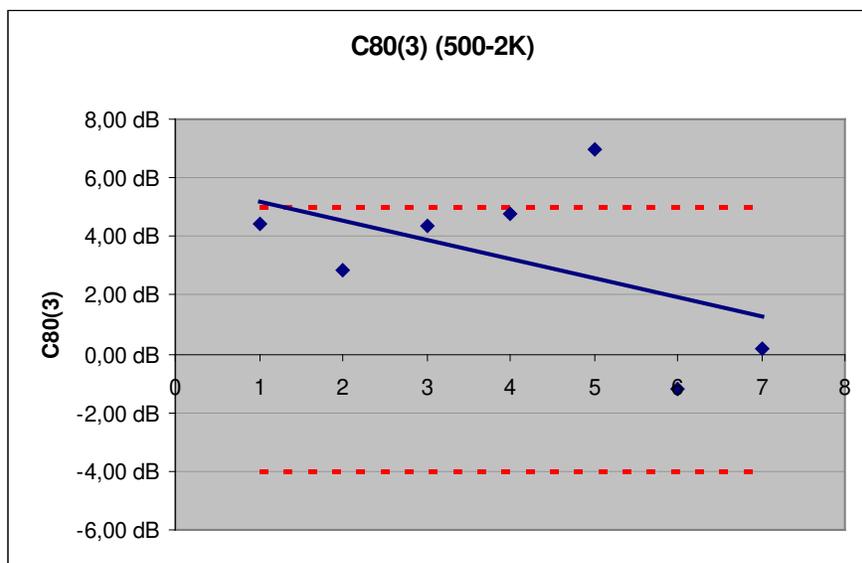


Figura 8.28 – Medições *auditório: clareza* $C_{80}(3)$ em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Pontos de medição: platéia (1 a 4) e palco (5 a 7)

⁵⁶ Beranek (2004, p. 551)

⁵⁷ (Figura 3.37, p. 92)

8.2.6.4.2.1 $C_{80}(3)$, RT_{60} e $(EDT/RT_{60})-1$

$C_{80}(3)$ e RT_{60}

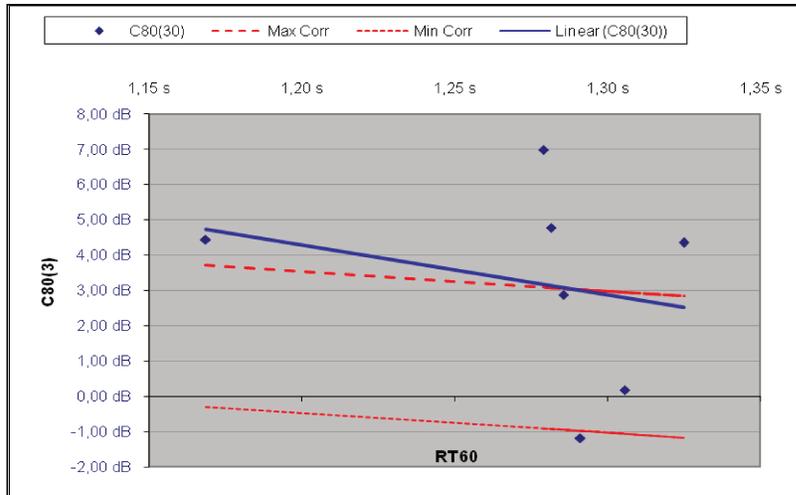


Figura 8.29 – Medições *auditório*: Relação entre $C_{80}(3)$ e RT_{60} . Linhas pontilhadas : faixa de valores obtidos por Beranek (2004, p. 551). Temos elevados valores de *clareza* em relação ao RT_{60} .

$(EDT/RT_{60})-1$, $C_{80}(3)$ e RT_{60}

$(EDT/RT_{60})-1 = \text{negativo} \Rightarrow$ Caimento do EDT é mais rápido que do RT_{60}

$(EDT/RT_{60})-1 = 0 \Rightarrow$ Caimento de ambos é igual

$(EDT/RT_{60})-1 = \text{positivo} \Rightarrow$ Caimento do RT_{60} é mais rápido

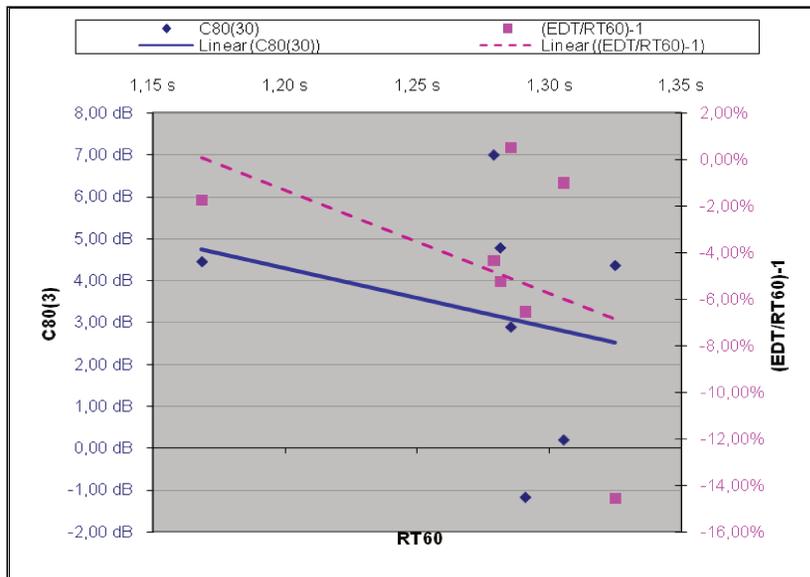


Figura 8.30 – Medições *auditório*: $(EDT/RT_{60})-1$, $C_{80}(3)$ e RT_{60} . Curvas der tendência de $C_{80}(3)$ x RT_{60} (azul e contínua) e de $(EDT/RT_{60})-1$ x RT_{60} (pontilhado e rosa). Apesar de ter valores elevados do parâmetro *clareza* (Cf. Figura 8.29) o EDT é fraco.

8.2.6.4.3 Intimidade (ITDG)

Valores usuais: Entre 2 e 40 milissegundos

Valores ótimos para música: até 25 milissegundos

Valores obtidos: Entre 6 e 7 milissegundos no palco

Entre 19 e 26 milissegundos na platéia

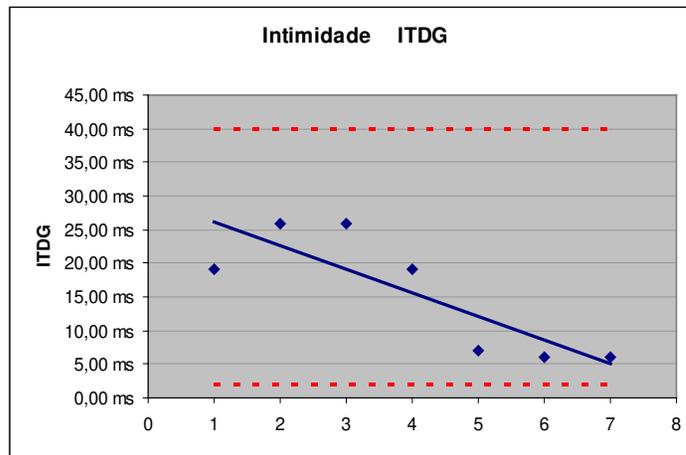


Figura 8.31 – Medições *auditório: intimidade (ITDG)* em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores usuais máximo e mínimo.

8.2.6.4.4 Calor (BR)

Valores ótimos para música:

Entre 1,10 e 1,25 para RT_{60} entre 1,10 e 1,45 segundos

Entre 1,10 e 1,45 para RT_{60} menor que 1,8 segundos

Valores obtidos: Entre 0,82 e 0,96



Figura 8.32 – Medições *auditório: calor (BR)* em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores usuais.

8.2.6.4.5 Fator de suporte (ST1)

Valores usuais: Entre -14,4 e -12,0dB (Beranek)

Entre -11,0 e -7,5dB (Gade)

Valores obtidos: Entre -4,89 e 5,38dB no palco

Entre 1,44 e 9,22dB na platéia

Muito retorno e pouco *EDT*. Conseqüência do *EDT* magro.

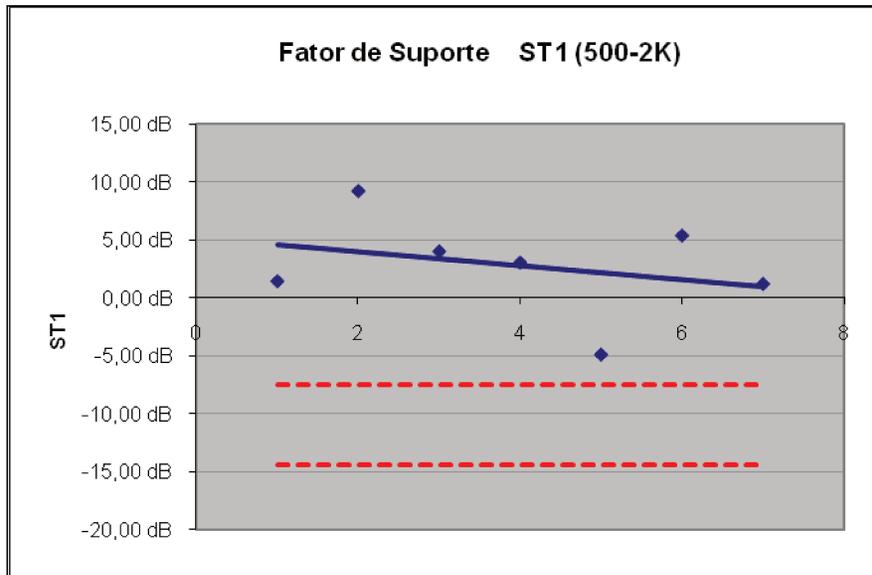


Figura 8.33 – Medições *auditório*: *fator de suporte (ST1)* em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Retorno que os músicos recebem do que tocam. Apesar de estar medido em todos os pontos, só se aplica ao palco. Em vermelho valores usuais.

8.2.6.4.6 *Tempo central (CT)*

Valores de referência: Entre 0 e 50 milissegundos (fala)
Entre 50 e 250 milissegundos (música)
(Pisani, 2001, p. 705)

Valores obtidos: Entre 41,0 e 108,4 milissegundos (palco)
Entre 64,5 e 81,7 milissegundos (platéia)

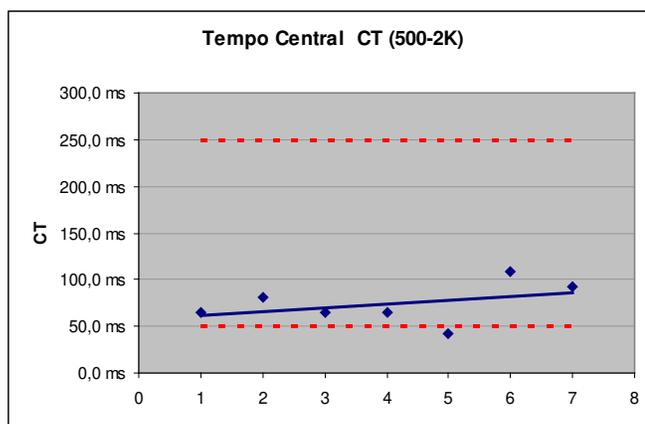


Figura 8.34 – Medições *auditório*: *tempo central (CT)* em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores de referência máximo e mínimo para música. Pontos de medição: platéia (1 a 4) e palco (5 a 7).

8.2.6.4.7 *Balanço tonal (TB)*

Valores usuais: Entre -0,10 e 0,20

Valores ótimos: Em torno de zero

Valores obtidos: Entre 0,03 e 0,07

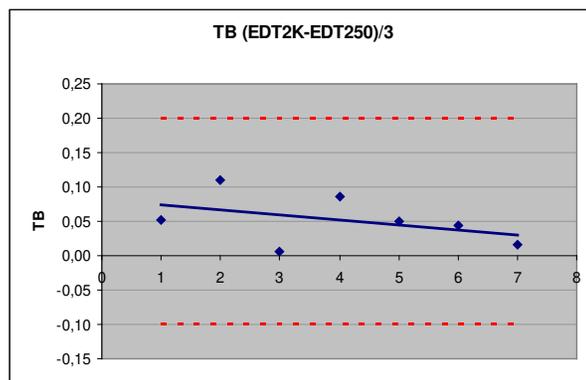


Figura 8.35 – Medições *auditório*: *balanço tonal (TB)* em cada um dos pontos de medição (1 a 7 no eixo horizontal). Em pontilhado valores de referência.

8.2.6.5 Resultados das medições: *cabine de controle de gravação*

8.2.6.5.1 *Tempo de reverberação: EDT, T₂₀, T₃₀ e T₄₀ – RT₆₀ inferido*

EDT , T_{20} , T_{30} e T_{40} por banda de oitava, lembrando o cálculo por regressão linear do tempo de caimento medido t_m

$$T_{20} = 5t_m$$

$$T_{30} = 2t_m$$

$$T_{40} = \frac{2}{3}t_m$$

o que permite comparar as inclinações dos caimentos entre si e com o T_{60} .

Valores usuais para salas de concerto: Entre 1,0 e 2,4 segundos.

A reverberação de cabines de controle de gravação deve ser reduzida para não intervir na percepção fiel da ‘cor do espaço sonoro’ do produto que está sendo registrado ou processado.

$RT_{60}(500-1K)$

Valores usuais (auditórios): Entre 1,0 e 2,4 segundos

Valores ótimos para música (auditórios): Entre 1,4 e 2,2 segundos

Valores obtidos: Entre 0,78 e 0,81 segundos

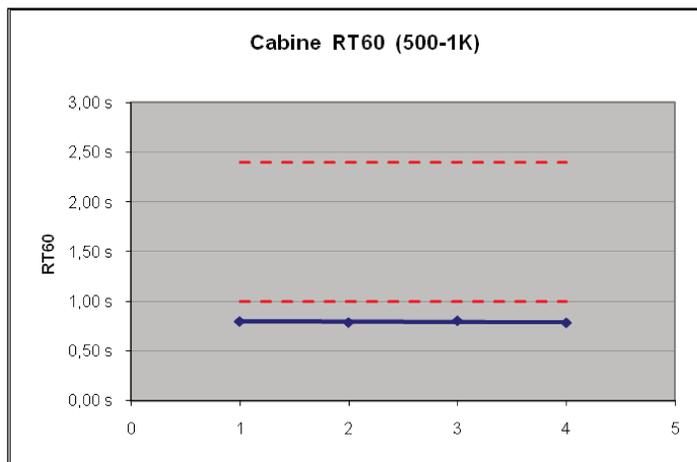


Figura 8.36 – Medições *cabine de controle de gravação*: tempo de reverberação (RT_{60}) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).

$EDT(500-1K)$

Valores usuais (auditórios): Entre 1,8 e 2,6 segundos (Pisani)

Entre 2,25 e 2,75 segundos (Beranek, melhores salas)

Entre 1,4 e 2,0 segundos (Beranek, salas menos favorecidas)

Valores obtidos: Entre 1,17 e 1,31 segundos

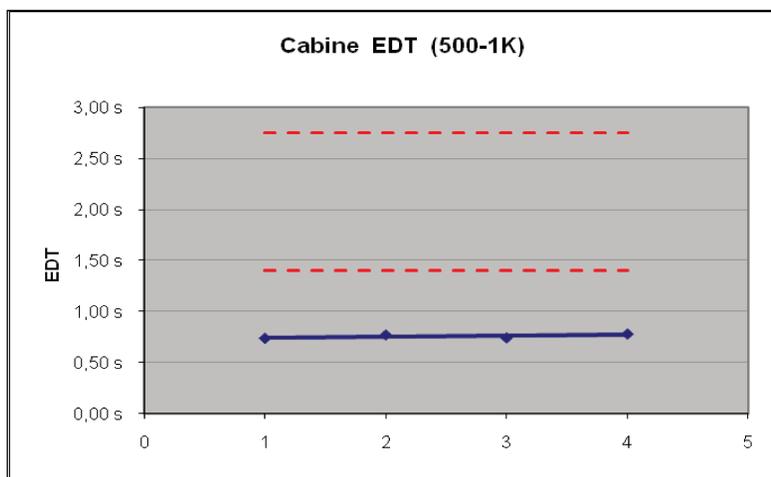


Figura 8.37 – Medições *cabine de controle de gravação*: EDT em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).

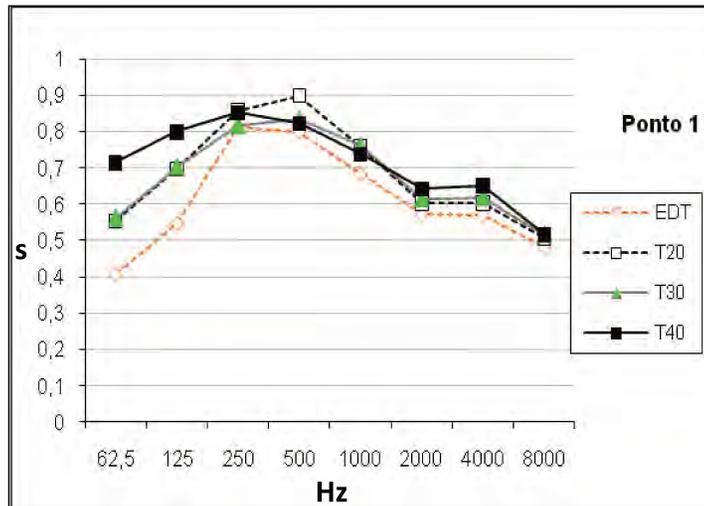


Figura 8.38 - Medições *cabine de controle de gravação: tempo de reverberação(em segundos)* por banda de oitava (Hz). Ponto 1

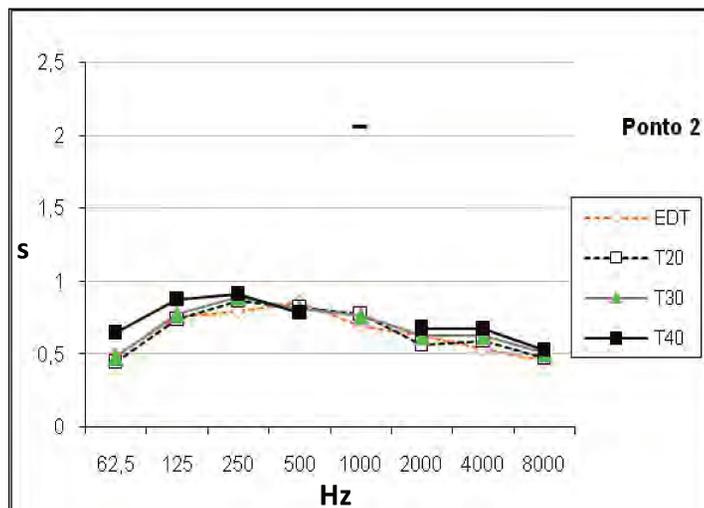


Figura 8.39 – Medições *cabine de controle de gravação: tempo de reverberação(em segundos)* por banda de oitava (Hz). Ponto 2.

O Resultado de T_{40} a 1KHz foi interpretado como um erro de medição e, portanto, desconsiderado.

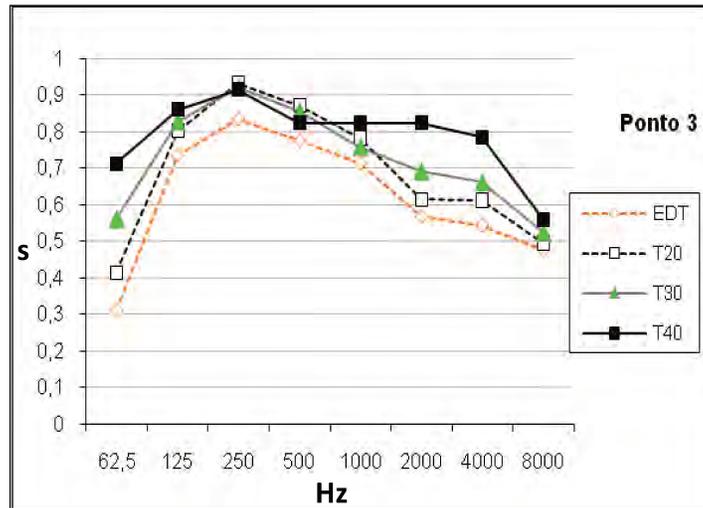


Figura 8.40 – Medições *cabine de controle de gravação: tempo de reverberação(em segundos)* por banda de oitava (Hz). Ponto 3

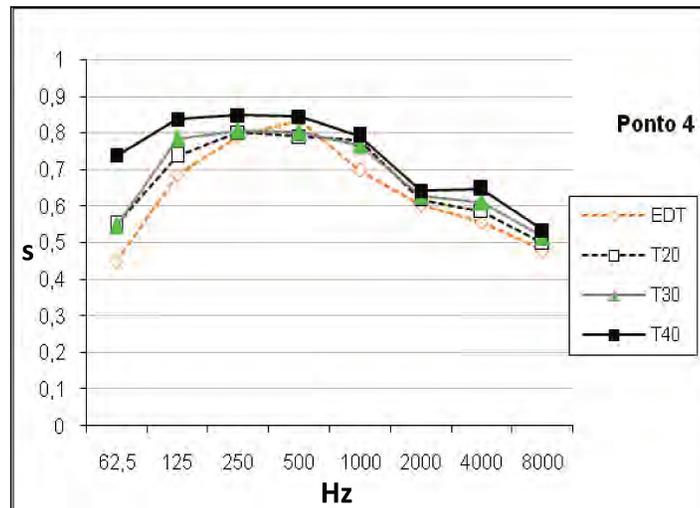


Figura 8.41 – Medições *cabine de controle de gravação: tempo de reverberação(em segundos)* por banda de oitava (Hz). Ponto 4

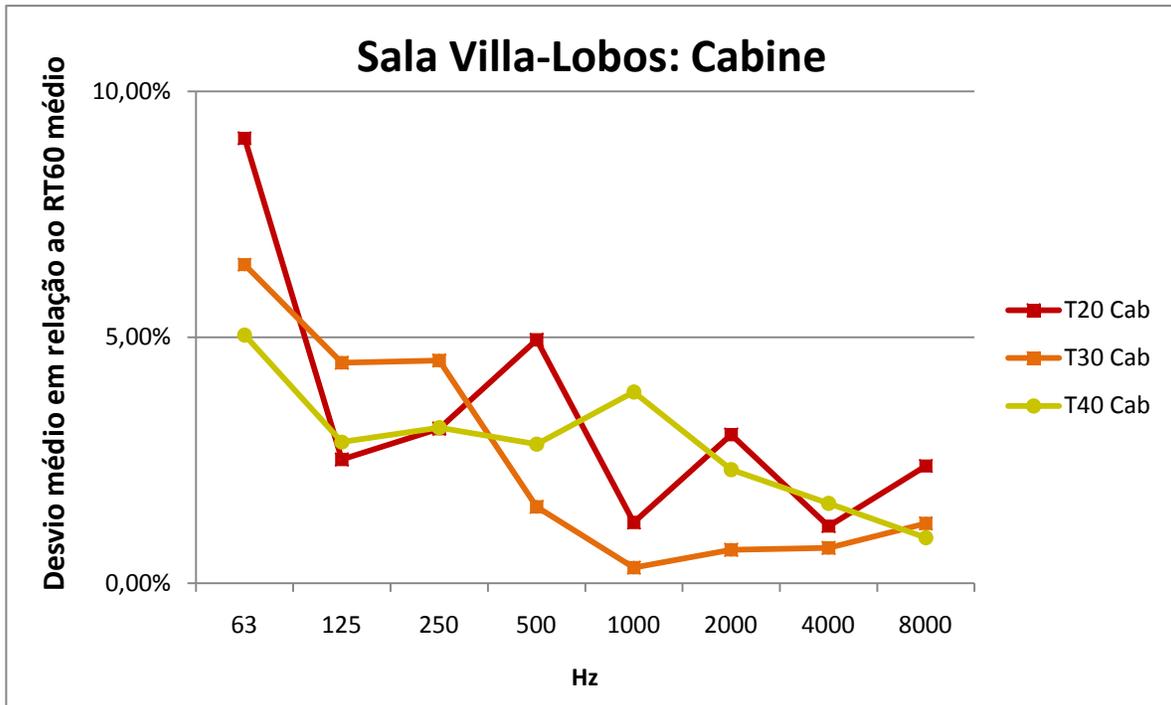


Figura 8.42 – Medições *cabine*: média em cada banda de freqüência dos desvios do RT_{60} de cada ponto de medição em relação à média do RT_{60} na mesma banda. (N.B.: O Ponto 3 foi suprimido destes cálculos por estar demasiadamente próximo à superfície serial difusora ao fundo da cabine)

Em cada banda de freqüência, o desvio do resultado em cada ponto de medição em relação à média dos pontos é dado por:

$$desvio P_j = \left| 1 - \frac{T_{20Pj}}{T_{20Fi}} \right| \%$$

numa dada banda F_i ($F_1=63$; $F_2=125$; $F_3=250$; $F_4=500$; $F_5=1K$; $F_6=2K$; $F_7=4K$; $F_8=8KHz$)

sendo

$$\overline{T}_{20Fi} = \frac{\sum_{j=1}^m T_{20Pj}}{m} S$$

j refere-se a cada ponto de medição (*Ponto 1, 2, 3 etc.*)

O desvio médio ao qual se refere o eixo das ordenadas do gráfico da *Figura 8.27* (p. 317) é dado por:

$$\overline{Desvio F_i} = \sum_{j=1}^m \left| 1 - \frac{T_{20Pj}}{\overline{T}_{20Fi}} \right| \%$$

em cada banda F_i de frequência.

8.2.6.5.2 Clareza $C_{80}(3)$

Valores usuais (auditórios): Entre -4,0 e +5,0dB

Valores obtidos: Entre +6,8 e +7,1dB Escuta clara e analítica.

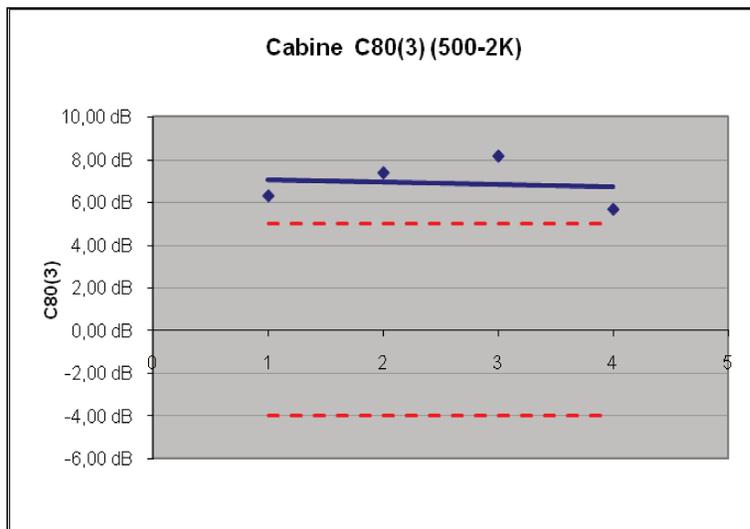


Figura 8.43 – Medições *cabine: clareza* $C_{80}(3)$ em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal). Em pontilhado, valores usuais para auditórios.

8.2.6.5.3 Intimidade (ITDG)

Valores usuais: Entre 2 e 40 milissegundos

Valores obtidos: Entre 6,8 e 7,2 milissegundos

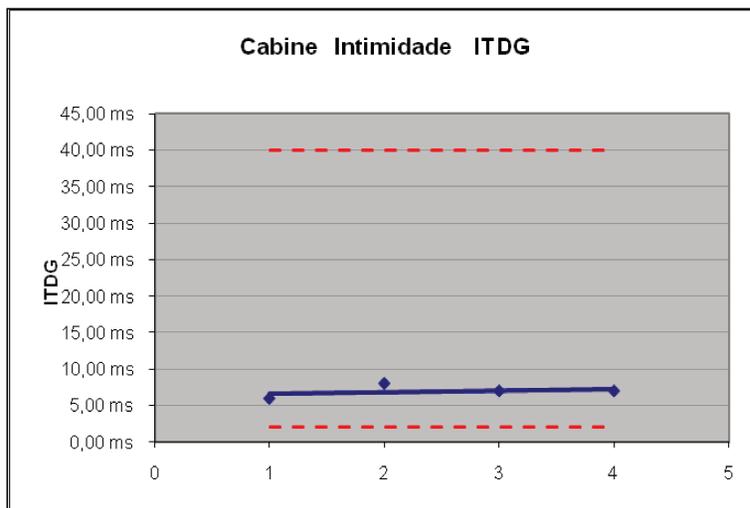


Figura 8.44 – Medições *cabine: intimidade* (ITDG) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).

8.2.6.5.4 Calor (BR)

Valores ótimos para música: Entre 1,10 e 1,25 para $1,10 \leq RT_{60} \leq 1,45$ segundos

Valores obtidos: Entre 1,00 e 1,06 para $0,79 \leq RT_{60} \leq 0,80$ segundos

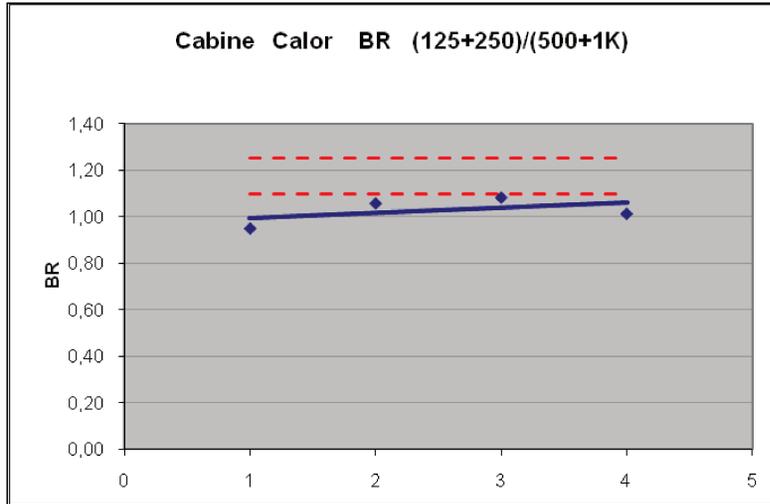


Figura 8.45 - Medições *cabine: calor (BR)* em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).

8.2.6.5.5 Fator de suporte (ST1)

Valores usuais (palcos e fossos): Entre - 11 e +0,3dB

Valores obtidos: Entre +2,8 e +3,6dB

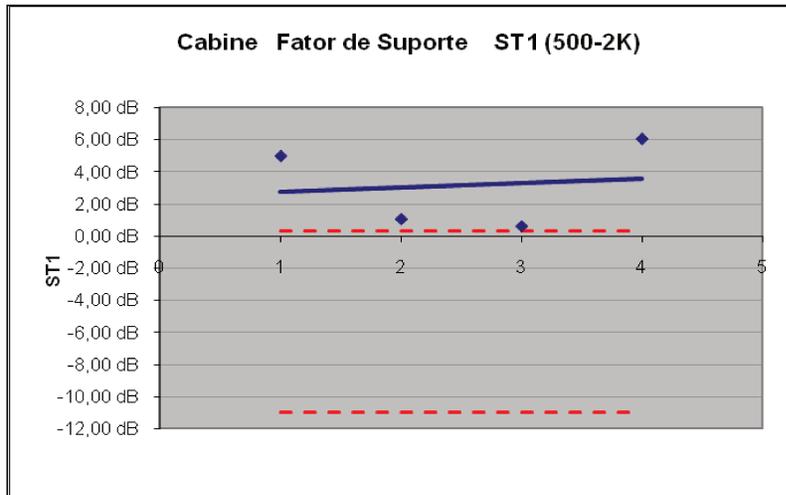


Figura 8.46 – Medições *cabine: fator de suporte (ST1)* em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal). O retorno dos sons emitidos no interior da cabine tem mais energia do que o ataque.

8.2.6.5.6 *Tempo central (CT)*

Valores ótimos para música: Entre 50 e 250 milissegundos

Valores obtidos: Entre 45 e 49 milissegundos.

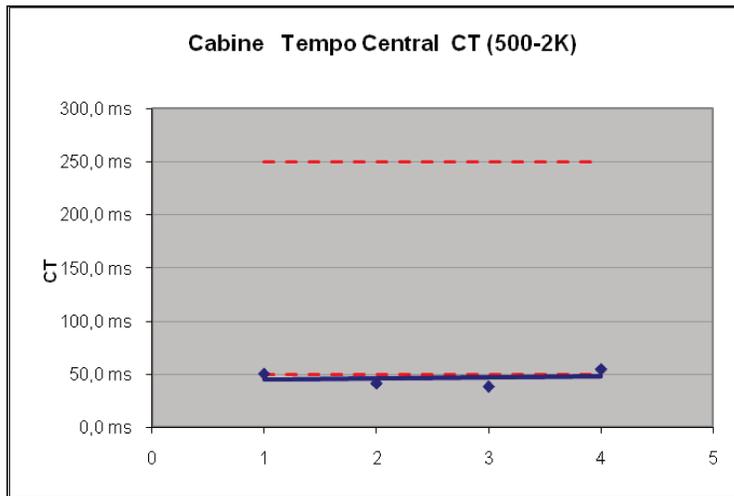


Figura 8.47 – Medições *cabine*: tempo central (CT) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).

8.2.6.5.7 *Balanço tonal (TB)*

Valores usuais: Entre -0,10 e 0,20 (CAPRA *et al.*, 2006)

Valores ótimos: Em torno de zero (PISANI, 2001)

Valores obtidos: Entre -0,086 e -0,071

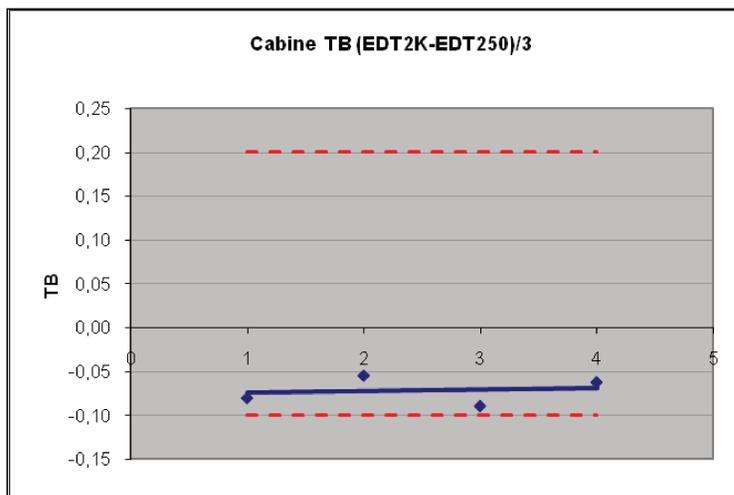


Figura 8.48 – Medições *cabine*: balanço tonal (TB) em cada um dos pontos de medição (1 a 4 no eixo horizontal).

8.2.6.6 Análise dos resultados das medições

Estes resultados são produtos parciais do projeto que ainda prevê uma segunda e última fase para acabamento e finalização da adequação.

8.2.6.6.1 Análise dos resultados do auditório

Enquanto o tempo de reverberação obtido no auditório está dentro dos limites usuais para música (Cf. *Figura 8.16*, p. 312), o *EDT*, que indica a inclinação do caimento dos primeiros 10dB, está abaixo dos valores recomendados (média de 1,24 = 11% abaixo do valor mínimo 1,4)(Cf. *Figura 8.17*, p. 313). O caimento está, portanto, demasiadamente rápido no início do som, apesar de que a reverberação tenha duração suficiente para performances musicais. Quanto à homogeneidade da sonoridade na sala, verifica-se na *Figura 8.27* (p. 317) que a variação de tempo de reverberação em relação à média dos tempos de reverberação, a partir de 500Hz, é inferior a 5%. Portanto, temos homogeneidade e uniformidade significativas na distribuição da energia em campo difuso.

Considerando as poltronas provisórias que se encontravam no local durante as medições, temos como valor do RT_{60} para a sala vazia 1,28s (Cf. *Figura 8.49*).

Os tempos de reverberação obtidos (1,17 a 1,31s – sala vazia com poltronas e 10 pessoas) estão a -8,6% e +2,3% do valor esperado.

A correlação EDT/RT_{60} , em média (0,93), está aproximadamente 5% abaixo do valor (0,985) recomendado por Benarek (2004, p. 506).

A leitura da resposta da sala em RT_{60} por banda de oitava mostra (Cf. *Figura 8.19* a *Figura 8.25*) mostra uma deficiência nos médios e graves entre 125 e 500Hz, quando comparamos à resposta desejada para música (*Figura 3.39*, p.124), o que repercute no parâmetro *calor* (Cf. 3.3.5, p. 123). Outra coisa que deve ser salientada é uma elevação nos tempos de caimento em torno de 2KHz, o que ocasiona uma certa coloração metálica ao som.

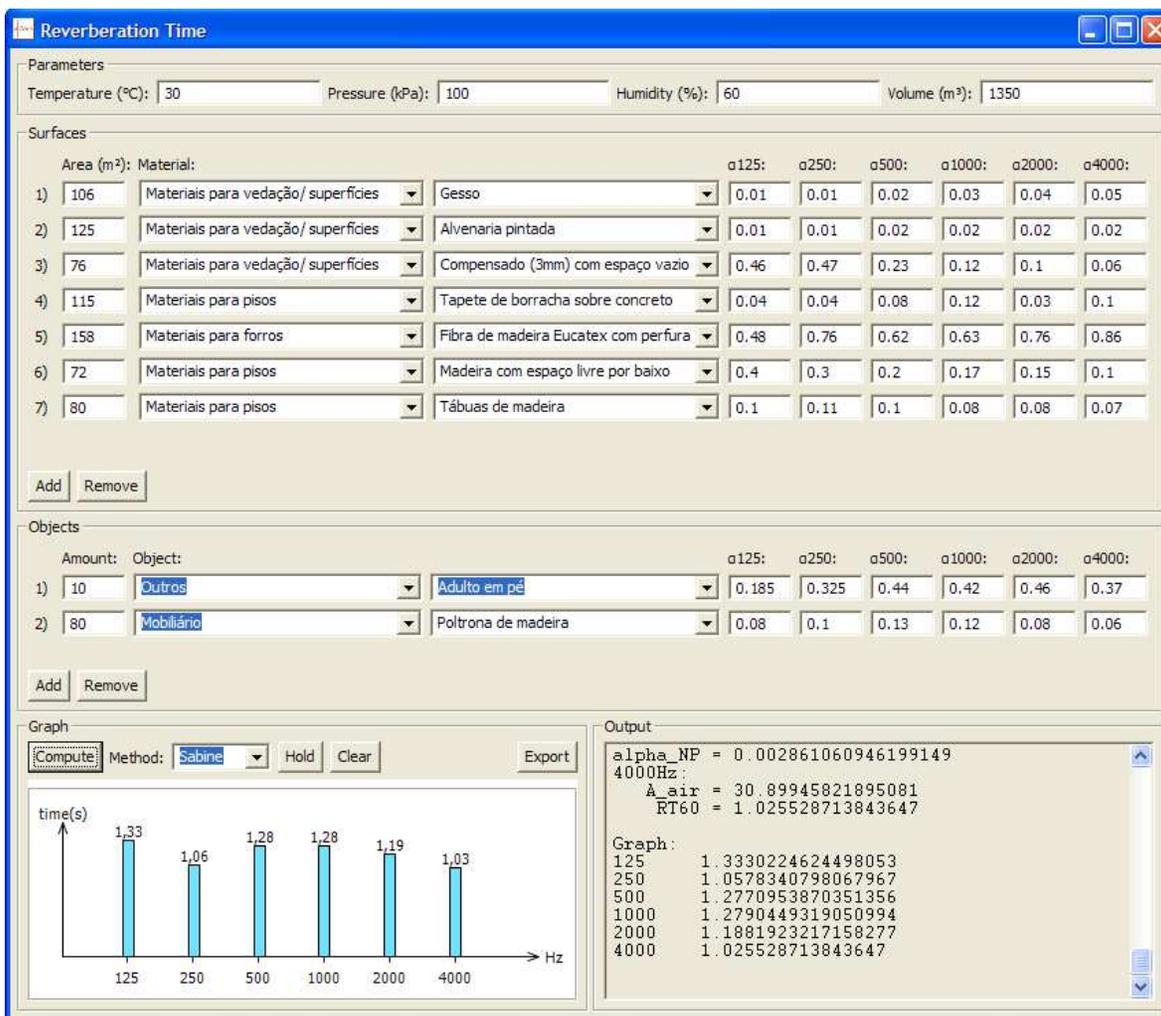


Figura 8.49 – Previsão aproximada do RT_{60} do auditório da Sala Villa-Lobos vazia com poltronas provisórias: 1,28s. Aplicativo: ACMUS (ECA/USP)

A Figura 8.26 (p. 316) mostra como os tempos de caimento em T_{40} (B) são, de modo geral, mais elevados que no EDT (A), confirmando os resultados apresentados na Figura 8.17 com baixos valores de EDT.

A clareza, que compara a energia de 0 a 80ms à energia de 80ms à ∞ , tem resultados acima do normal, como mostra a Figura 8.28 (p. 319), com valores entre -1,2 e 7,0dB. Apesar do caimento rápido do EDT (nos primeiros 10dB), o os sons mantém grande parte de sua energia nos seus primeiros 80ms.

Os resultados para avaliação da *intimidade* estão perfeitamente dentro da faixa desejada (Cf. *Figura 8.31, p. 321*): 6 e 7ms (palco) e 19 e 26ms (platéia).

Para o parâmetro *calor* os resultados são como o que se esperava após a avaliação da resposta em frequência do RT_{60} . Como indica a *Figura 8.32* os resultados estão abaixo dos valores normais.

Os resultados do *fator de suporte* ($ST1$), que se refere à energia emitida por um músico e o retorno que recebe em seus ouvidos, considerando os pontos de medição 5, 6 e 7 que se referem ao palco (onde este parâmetro se aplica) está acima dos valores de referência (Cf. *Figura 8.33, p. 322*), ou seja, o músico tocando no palco estaria ouvindo o retorno de seu som numa proporção muito maior do que ouviria em outra sala. Porém, seria preciso aqui igualmente considerar o fato de que o EDT está baixo.

O *fator de suporte* ($ST1$) consiste na razão quadrática entre a pressão sonora de 20 a 100 milissegundos e a pressão de 0 a 10 milissegundos.

O EDT mede a inclinação do caimento inicial nos primeiros 10dB.

Caso não esteja havendo primeiras reflexões, ou estas estejam sendo espalhadas pelas superfícies irregulares, esses fatos contribuiriam para ter um baixo valor de EDT . Mas até o presente não foi possível examinar se algo assim estaria ou não ocorrendo.

Para um EDT menor que o esperado, os valores de $ST1$ tenderiam a ser maiores (vale o inverso) o que também é uma explicação ponderável para os elevados valores de $ST1$ obtidos. Antes de concluir alguma coisa em relação ao $ST1$ seria necessário examinar mais profundamente quais as possíveis relações entre esses parâmetros nessas medições, o que, por demandar tempo e procedimentos suplementares, poderá ser feito oportunamente em complemento a esta pesquisa.

A avaliação do parâmetro *tempo central* (CT) que indica o “baricentro temporal do som” tem como resultados valores satisfatórios (Cf. 3.3.11, p. 132). Igualmente os valores obtidos de *balanço tonal* são ótimos (Cf. *Figura 8.35, p. 323*).

Com exceção de EDT , $ST1$ e a resposta em frequência da reverberação, nos graves e medio-graves (125-500Hz), atingindo o parâmetro *calor*, e na região 2KHz com uma leve acentuação, todos os demais resultados são ótimos para uma sala de música.

Observou-se durante as medições que:

- Contrariamente à planta fornecida, o forro do auditório era vazado – material envelhecido, danificado – e não fechava o volume do ambiente, o que pode explicar a fuga de graves e o caimento rápido da reverberação nas bandas de frequência mais baixas.
- As paredes laterais inclinadas (sobre as paredes que originalmente estavam na sala) não foram erguidas até o teto como projetado, parando à meia altura. O paralelismo que em decorrência disso permaneceu (área não coberta por paredes inclinadas) pode estar ocasionando ondas estacionárias com fundamental em 17Hz ⁵⁸(distância entre as paredes de 10,1m = $\lambda_{17\text{Hz}}/2$) o que explicaria que a banda de 0 a 125Hz tem menos perdas que as demais imediatamente superiores.
- Os rebatedores de teto, que tiveram que ser adequados, não foram devidamente alinhados para produzir o reforço sonoro por reflexões como previsto no projeto (Cf. 11.1.1.6, Figura 11.7, p. 364).

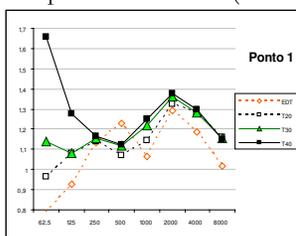
A leve acentuação em 2KHz deve ser devida a uma menor absorção dos materiais da sala nessa banda de frequências. Saliente-se que até o momento da medição não havia sido iniciada a fase final de acabamento, na qual seriam instalados assentos forrados na platéia.

8.2.6.6.2 Cabine de Controle de Gravação

Os *design* de cabines de controle de gravação e produção de áudio LEDE® e RFZ™ (Cf. nota 37, p. 180; nota 38, p. 180) prevêm, respectivamente, zonas absorvente, ao redor das

⁵⁸ Espectro favorecido: $f_1=17\text{Hz}$, $f_2=34\text{Hz}$, $f_3=51\text{Hz}$, $f_4=68\text{Hz}$, $f_5=85\text{Hz}$, $f_6=102\text{Hz}$, $f_7=119\text{Hz}$

Espectro subtraído (cancelamento) múltiplos ímpares de 8,5Hz: 25,5Hz, 42,5Hz, 59,5Hz, 76,5Hz, 93,5Hz, 110,5Hz



fontes (*dead end*), e difusa, ao lado oposto (*live end*), e zona central livre de reflexões (*reflexion free zone*). Uma das razões para essas características é a de que a escuta do material em gravação ou processamento deve ser fiel ao conteúdo absoluto deste. Para isso, a cabine de controle e monitoração deve ter a maior neutralidade possível. Assim, o *design LEDE* e *RFZ* prevê a eliminação de qualquer das primeiras reflexões inerentes à cabine, para que se ouça claramente as primeiras reflexões do conteúdo em produção. Igualmente no que se refere à reverberação, a cabine de controle deve ser seca. Mas, contudo, não deve ser totalmente morta como uma câmara anecóica. Por essa razão a parte posterior de uma cabine *LEDE* é reflexiva e proporciona difusão, o que areja o ambiente à escuta musical, dando mais espacialidade e naturalidade à ambiência acústica.

Assim, sabe-se, então, que muitos dos parâmetros de avaliação acústica de uma sala para música, como os conhecemos para a escuta musical, não são aplicáveis em cabines onde a escuta exige uma apuração técnica extrema e a possibilidade de atentar a um pequeno detalhe, ouvindo-o de forma clara e eficiente. Logicamente não teremos necessidade de ter num local desses um preenchimento do som. O preenchimento do som ouvido será o da sala em que estão os músicos gravando, por exemplo, ou da reverberação empregada na mixagem.

Tampouco considerar parâmetros como *fator de suporte* e *tempo central*, nem *clareza*, no caso deste último, com parâmetros mais elevados que numa sala para audição musical.

Contudo, para comparação do desempenho das superfícies que são objeto desta pesquisa, tais medidas foram efetuadas, por terem sido uma oportunidade de coletar dados sobre os produtos desta pesquisa.

O tempo de reverberação da cabine, como era de se esperar, está abaixo dos valores recomendados para salas de música. Igualmente o *EDT* encontra-se abaixo dos valores usuais. Se considerarmos que numa cabine de controle de gravação não é desejável a atuação das primeiras reflexões, um baixo *EDT* (*Early Decay Time*) seria um dado a favor disso.

A resposta da cabine em tempo de reverberação por banda de oitava mostra (Cf. *Figura 8.38* a *Figura 8.41*, p. 326-327) uma ótima resposta para música (*Figura 3.39*, p.124).

Quanto à homogeneidade da sonoridade na cabine, verifica-se na *Figura 8.42* (p. 328) que a variação de tempo de reverberação em relação à média dos tempos de reverberação, a partir

de 125Hz, é inferior a 5%. Portanto, temos homogeneidade e uniformidade significativas na distribuição da energia em campo difuso.

A *clareza* tem resultados acima do esperado (Cf. Figura 8.43, p. 330), o que é adequado para monitoração de gravação e demais produções de áudio.

O parâmetro *intimidade* (Cf. Figura 8.44, p. 330) evidentemente está contemplado numa pequena sala, com valores dentro do âmbito desejado.

O *calor* está próximo ao limite mínimo (Cf. Figura 8.45, p. 331), provavelmente por ter sobre a cabine o mesmo forro que sobre o auditório, que como vimos no item anterior, deixava os graves escaparem da sala. Sendo o teto da cabine de placas de madeira não muito espessas, os graves ignoram esse obstáculo e o atravessam, saindo do local, ou são absorvidos pelas placas, estas respondendo como membranas (Cf. 3.4.3.1.1, p. 139). Estas foram deixadas na concepção da adequação da cabine, primeiro por ser os graves um dos principais problemas de pequenas salas, segundo, por experiência, ao monitorar uma produção de áudio, é melhor estar próximo do limite inferior dos graves do que pouco acima do limite superior. No primeiro caso temos mais controle para compensação do que no segundo.

O parâmetro *fator de suporte* (*STI*) não se aplica neste caso, mas pode eventualmente nos deixar mais à vontade para aplicar material de revestimento absorvente na cabine (Cf. Figura 8.46, p. 331).

Igualmente o *tempo central* (*CT*) (Figura 8.47, p. 332) não pode ser considerado neste caso com os mesmos parâmetros que os de salas de concerto. O resultado obtido está muito levemente abaixo do mínimo para salas de música, o que é perfeitamente aceitável neste caso, pois numa cabine com poucas reflexões e reverberação reduzida, o baricentro de energia dos sons tende a se aproximar do ataque.

Os resultados obtidos para *balanço tonal* (*TB*) estão dentro dos valores recomendados (Cf. Figura 8.48, p. 332).

Todos os resultados obtidos são satisfatórios para uma cabine de controle de gravação.

8.2.7 Propostas encaminhadas e resultados esperados

- Providenciar a afinação dos rebatedores de teto conforme especificações do projeto quanto a ângulos e orientações em função da distância em relação ao palco (Cf. 8.2.3.1, Figura 8.4, p. 295) para proporcionar plenamente o reforço do som direto pelas reflexões auxiliares como projetado (Cf. 11.1.1.6, Figura 11.7, p. 364) permitindo maior precisão de escuta, mesmo ao fundo da platéia e contribuindo para melhorar o EDT do auditório.
- Fechamento e isolamento do forro do auditório atualmente composto por elementos perfurados a base de madeira, porém contendo brechas e elementos deteriorados. Devido aos custos limitados disponibilizados foi sugerido jogar uma manta de lã de rocha de 50mm, da maior densidade possível (em torno de 40Kg/m³), por cima do forro, acrescentando, por cima da lã de rocha, outros materiais economicamente viáveis de serem usados. Por baixo do forro, afixar placas de MDF (Cf. Figura 11.8, p. 365). O princípio básico é compor um *sanduíche* de materiais, com impedâncias variadas, o que atenua a transmissão, proporcionando um melhor isolamento. Para os materiais sobre a lã de rocha, foi somente especificado que deveria ter o máximo de massa possível, pois é somente a massa que representa um real de obstáculo aos graves. Com essas adequações espera-se uma melhoria na resposta dos graves no auditório (por estarem escapando pelas brechas do atual forro e pela pouca massa que o constitui) bem como um melhor isolamento do ambiente externo, o que é necessário para uma sala de performance musical;
- Aplicação de material absorvente atuando prioritariamente nas bandas acima de 2KHz reduzindo a resposta dos tempos de reverberação levemente acentuados ao redor dessa frequência. Foram sugeridos diversos materiais a serem fixados sobre as paredes revestidas de azulejos, que inicialmente foram feitas para serem revestidas conforme necessidades de acabamento do tratamento acústico, e sobre a superfície posterior de cada rebatedor de palco (Cf. Figura 11.9).

9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Se há perda de energia nos difusores por *reflexão com interferência de fase*, baseados em cavidades de diferentes profundidades ou saliências de diverso tamanhos (Cf. 4.6.1, p. 162 et seq.), os difusores concebidos nesta pesquisa têm articulações de superfície suaves e contínuas, evitando turbulências e ressonâncias (Cf. p. 165), portanto, minimizando as possibilidades de tais fenômenos. Porém, para comprovar de fato essa qualidade ainda seria necessário medir a resposta de um local não tratado, instalando em seguida as superfícies difusoras, mantendo um volume interno equivalente, e proceder a uma segunda medição.

Uma outra possibilidade seria realizar experimentos em uma câmara reverberante, medindo inicialmente a resposta dos materiais de revestimento das superfícies aplicados regularmente na superfície de medição, sem qualquer variação geométrica e, em seguida, medir a mesma superfície, porém com o material disposto conforme as *superfícies seriais*. Não havendo absorção de energia, os tempos de caimento deveriam, em média, permanecer na mesma ordem de valor.

Quanto ao âmbito de frequência operacional, a análise modal dos difusores seriais no item 7.7.2 (p. 275 et seq.) apresentou resultados positivos a partir de 30Hz, inclusive quebrando modos em torno de 57Hz (Cf. Figura 7.49, p. 261). A análise ainda revelou que a atuação das *superfícies seriais difusoras* aumenta com a frequência da onda incidente, havendo redução progressiva dos máximos e mínimos de pressão comparativamente à *sala de referência* numa mesma banda de frequência.

Impressões positivas de usuários da Sala Villa-Lobos apontam para melhorias obtidas no conforto acústico. Porém, para embasar devidamente essas opiniões é necessário uma realizar avaliação subjetiva estabelecida com o necessário rigor, numa etapa ulterior. Com os ajustes finais previstos espera-se melhores resultados para esta sala, sobretudo quanto ao parâmetro *calor*.

Para avaliar a relação das superfícies difusoras com os resultados de curto *EDT* e elevado *ST1* no *auditório*, é necessário realizar outros estudos e projetos de adequação, procedendo a medições e análises comparativas, entre projetos, antes e depois das adequações, procurando verificar a eventual ocorrência de correlação entre esses parâmetros. Contudo, tanto no *auditório* como na *cabine a clareza* $C_{80}(3)$ é alta (maior parte da energia nos primeiros 80ms), o

EDT é curto (os primeiros 10dB caem rapidamente) e o *fator de suporte (ST1)* é elevado (a energia a partir de 20ms é maior do que esperado em relação aos primeiros 10ms). Não seria totalmente errado especular se eventualmente estaria havendo alguma distribuição da energia inicial do som (entre 20 a 80ms) em decorrência da difusão produzida pelas superfícies seriais. Mas isso ainda não pode ser verificado.

A cada um dos *objetivos estabelecidos* nesta pesquisa, abaixo elencados, seguem os resultados obtidos:

- *obter elementos para melhoria do conforto acústico em audições e performances musicais em pequenas salas;*
 - avaliações dos usuários atestam resultados satisfatórios de melhorias no conforto acústico dos locais submetidos a tratamento de adequação;
- *obter melhoria da qualidade sonora de uma sala (minimizar modos normais, contribuição para uma melhor da reverberação, gerenciar primeiras reflexões, dar máxima abrangência à cada fonte sonora em todas as localizações em que possa se situar);*
 - a simulação efetuada confirma melhorias significativas quanto a este quesito, evidenciando minimização dos modos normais;
 - os desvios dos tempos de reverberação inferiores a 5% a partir de 125Hz na Cabine e de 500Hz no Auditório indicam que a energia em campo difuso está distribuída de forma equilibrada pelos pontos de escuta;
 - foi possível constatar abrangência de ação das *superfícies seriais difusoras* em todo o espaço simulado na análise modal; a distribuição equilibrada com pouco desvio dos tempos de reverberação em cada banda de frequência nas medições da Sala Villa-Lobos; portanto, resultados que apontam favoravelmente para uma melhor reverberação;

- *concepção de difusores sonoros com performance superior aos que comumente têm sido empregados em tratamento acústico, sobretudo quanto à produção de campo difuso sem perda de energia da onda incidente;*
 - os elementos constatados como causa de perda de energia, no caso as cavidades e saliências com articulações abruptas, foram suprimidos;
 - os resultados demonstram eficiência na uniformidade da distribuição da energia sonora, seja nas medições da Sala Villa-Lobos onde, além da resposta do *tempo de reverberação* em frequência ter desvios abaixo de 5% (acima de 50Hz no *auditório* e acima de 125Hz na *cabine*);
 - em relação ao RT_{60} esperado *grasso modo* (Cf. item 8.2.6.6.1, Figura 8.49, p.334) 1,28s (sala vazia), os resultados obtidos (1,17 a 1,31s – sala vazia) estão bem próximos desse valor (8,6% abaixo e 2,3% acima) o que é favorável ao fato de que as superfícies difusoras estejam cumprindo seu papel sem ocasionarem perda de energia da onda incidente;
 - o RT_{60} obtido é adequado à performance e audição musical;

Uma vez constatado que os processos de concepção e *design* de difusores foram efetivamente desenvolvidos a partir da manipulação de seqüências numéricas derivadas da técnica serial, obtendo novos difusores com performance satisfatória num amplo âmbito de frequências, sem indicações de perda de energia da onda incidente, respeitando as qualidades exigidas de uma sala para performance e audição musical, está atendida a hipótese desta tese.

Como desdobramentos deste trabalho, está um depósito de Patente junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), através da Agência de Inovação da Unicamp (INOVA). Um relatório de investigação da tecnologia desenvolvida foi realizado pela INOVA para o Programa de Investigação Tecnológica (PIT) (UNICAMP, USP, UNESP, IPEN, IPT, FINEP e FAPESP) mostra diversos setores de aplicação possíveis, dentre os quais temos estúdios de gravação, salas para prática musical, teatros, *home theaters* e cinemas.

As possibilidades de interação com audiovisual suscitam direções e balizas para trabalhos futuros, bem como colaborações com artistas plásticos e arquitetos para criar superfícies que, além de performance acústica, sejam também suporte para expressão plástica.

10. REFERÊNCIAS⁵⁹

AHNERT, Wolfgang; SCHMIDT, Wolfgang. **Fundamentals to perform acoustical measurements**: Appendix do EASERA – Electronic and acoustic system evaluation and response analysis. Foothill Ranch (CA, USA): Renkus-Heinz [s.d.] 53 p. <http://www.renkus-heinz.com/easera/EASERAAppendixUSPV.pdf> Acesso em: 08 mar. 2008.

ANDO, Yoichi. **Architectural acoustics**: blending sound sources, sound fields, and listeners. New York: Springer-Verlag, 1998. 252 p.

_____; KAGEYAMA, K. Subjective preference of sound with a single early reflection. **Acustica**, v. 37, n. 2, p. 111-117, März, 1977.

_____; KATO, K. Calculations on the sound reflection from periodically uneven surfaces of arbitrary profile. **Acustica**. v. 35, n. 5, p. 321-329, Aug., 1976.

_____; NOSON, Dennis (Eds.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1997. 433 p.

ANGUS, James A. S. Large area diffusers using modulated phase reflection gratings. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 98., 1995, Paris. **Preprint** 3954, 1995a.

_____. Using grating modulation to achieve wideband large area diffusers. **Applied Acoustics**, v. 60, n. 2, p. 143-165, June, 2000.

_____. Using modulated phase reflection gratings to achieve specific diffusion characteristics. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 99., 1995, New York. **Preprint** 4117, 1995b.

⁵⁹ Baseadas na norma NBR 6023, de 2002, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

_____. Wideband two dimensional diffusers using orthogonal modulated sequences. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 103., 1997, New York. **Preprint** 4640, 1997.

ARRUDA, Fábio R.; GUEDES, Renata; MÜLLER, Swen; BRANDÃO, Paulo C. R.; NABUCO, Marco; ZINDELUK, Moysés; ROCHA, Renato O. A Influência da direcionalidade de fontes sonoras na avaliação experimental da qualidade acústica de salas. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p. 312-317.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia para execução de serviços de medição de ruído aéreo e avaliação dos efeitos sobre o homem: NBR 7731.** Rio de Janeiro: ABNT, 1983. 11 p.

_____. **Níveis de ruído para conforto acústico: NBR 10152.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 4 p.

_____. **Projetos e instalações de salas de projeção cinematográfica: NB 1186.** Rio de Janeiro: ABNT, 1988b. 8 p.

_____. **Reverberação – Análise do tempo de reverberação em auditórios: NBR 11957 MB 2958.** Rio de Janeiro: ABNT, 1988a. 3 p.

_____. **Tratamento acústico em recintos fechados: NBR 12179.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 9 p.

BARRON, M. Bass sound in concert auditoria. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 97, n. 2, p. 1088-1098, Feb., 1995.

_____. Growth and decay of sound intensity in rooms according to some formulae of geometric acoustics theory. **J. Sound Vib.**, v. 27, n. 2, p. 183-196, 22March, 1973.

_____. The subjective effects of the first reflections in concert halls – The need for lateral reflections. **J. Sound Vib.** v. 15, n. 4, p. 475-494, 22April, 1971.

_____; LEE, L-J. Energy relations in concert auditoriums. I. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 84, n. 2, p. 618-628, Aug., 1988

_____; MARSHALL, A. H. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls. **J. Sound Vib.**, v. 77, n. 2, p. 211-232, July, 1981.

BERANEK, Leo L. **Acoustic measurements.** New York: John Wiley & Sons, 1949. 914 p.

_____. **Acoustics.** New York: Acoustical Society of America, 1954. 481 p.

- _____. **Acoustics**. 2. ed. New York: Acoustical Society of America, 1993. 491 p.
- _____. **Concert and opera halls: how they sound**. New York: Acoustical Society of America, 1996. 643 p.
- _____. **Music, acoustics & architecture**. New York: John Wiley & Sons, 1962. 585 p.
- _____. **Music, acoustics & architecture**. 2. ed. New York: Springer, 2004. 661 p.
- _____; SCHULTZ, T. J. Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays, **Acustica**, v. 15, n. 1, p. 307-316, 1965.
- BERANEK, Leo L; VÉR, István L. **Noise and vibration control engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1992. 804 p.
- BERTOLI, Stelamaris R. **Material didático da disciplina IC 765 Acústica e controle de ruído**. Campinas: Unicamp, 2000.
- BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 368 p.
- _____. Difusão sonora em salas: paradigmas do passado e estado da arte. In: SEMINÁRIO MUSICA CIENCIA E TECNOLOGIA: ACUSTICA MUSICAL, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** Disponível em: <http://gsd.ime.usp.br/acmus/publi/seminario2004.htm>. Acesso em: 30 dez. 2006.
- BLAUERT, Jens. **Spatial hearing** : the psychoacoustics of human sound localization. Ed. rev. Cambridge (EUA): MIT Press, 1997. 494 p.
- BOLT, R. H.; DOAK, P. E. A tentative criterion for the short-term transient response of auditoriums. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 22, n. 4, p. 507-509, July, 1950.
- BONELLO, Oscar J. Acoustical evaluation and control of normal room modes. **J. Acoust. Soc. Am.**, suppl.1, v. 66, n. 2, 1979. In: ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 98th meeting, 1979b, Salt Lake City, Utah, EUA.
- _____. A new computer aided method for the complete acoustical design of broadcasting and recording studios, In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING, 1979. **Anais...** v. 4, April, p. 326-329, 1979a.
- _____. A new criterion for the distribution of normal room modes. **Journal of the AES**. v. 29, n. 9, p. 597-606, September, 1981.
- BRITO, Luiz A. P. F. **Correções na determinação do nível de potência sonora**

obtido através da técnica da intensimetria. 2006. 181p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BROOK, Rollins; UZZLE, Ted. Acoustics of open plan rooms. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988b. cap. 8, p. 199-205.

_____; _____. Rooms for speech, music and Cinema. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988a. cap. 7, p. 155-197.

CAPRA, Andrea; BINELLI, Marco; MARMIROLI, Daniela; MARTIGNON, Paolo; FARINA, Ângelo. Correlation between subjective descriptors and objective parameters of theatres and auditoria acoustics simulated with binaural sound systems. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 13., 2006, Vienna, Austria. **Proceedings...**

CHION, Michel. **Guide des objets sonores** : Pierre Schaeffer et la recherche musicale. Paris : Institut National de l'Audiovisuel & Ed. Buchet/Chastel, 1983. 186p. (Collection Musique: Bibliothèque de la Recherche Musicale)

CONDAMINES, Roland. **Stéréophonie** : cours de relief sonore théorique et appliqué. Paris : Masson, 1978. 301 p.

COOPER, Jeff. **Building a recording studio.** 5. ed. Los Angeles (EUA): Synergy, 1996. 209 p.

COX, T. J.; AVIS, M. R.; XIAO, L. The potential for room acoustic active diffusers. **Revista de Acústica**, v. 23, 2002. RBA-06-003-IP ISBN 84-87985-07-6 (<http://www.ia.csic.es/sea/forum/forum.htm>)

COX, T. J.; D'ANTONIO, Peter. Absorption by surface diffusers. In: AUDITORIUM ACOUSTICS : HISTORICAL AND CONTEMPORARY DESIGN AND PERFORMANCE, [s/nº], 2002, London. **Proceedings...**

_____; _____. Schroeder diffusers: a review. **Building Acoustics**, v. 10, n. 1, 2003. p. 1-32.

_____; _____. **Acoustic absorbers and diffusers:** theory, design and application. London: Spon, 2004. 405 p.

CREMER, L.; MÜLLER, H. A.; SCHULTZ, T. J. **Principles and Applications of Room Acoustics.** London: Applied Science, 1982.

CROCKER, Malcom J. Introduction. In: CROCKER, Malcolm J. (Ed.) **Handbook of acoustics**. New York (EUA): John Wiley & Sons, 1998. p. 3-21.

D'ANTONIO, Peter; COX, Trevor J. Diffusor application in rooms. **Applied Acoustics**, v. 60, n. 2, p.113-142, June, 2000.

_____; KONNERT, John H. The acoustical properties of sound diffusing surfaces: the time, frequency and directivity energy response. In: AES CONVENTION, 79., 1985 New York. **Proceedings...** 18p. [2295 (B-6)]

_____; _____. The reflection phase grating diffusor: design theory and application. **J. Audio Eng. Soc.**, v. 32, n. 4, p.228-238, Apr., 1984a.

_____; _____. The RPG reflection phase grating acoustical diffusor: applications. In: AES CONVENTION, 76., New York, 1984b. **Proceedings...** 8 p. [2156 (H-7)]

_____; _____. The Schroeder quadratic-residue diffusor: design theory and application. In: AES CONVENTION, 74., 1983, New York. **Proceedings...** 26 p. [1999 (C-4)]

DAVIS, Don; DAVIS, Carolyn. **Sound system engineering**. 2. ed. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1987. 665 p.

DE MARCO, Conrado Silva. **Elementos de acústica arquitetônica**. São Paulo: Nobel, 1982. 129 p.

DICKREITER, Michael. **Tonmeister technology** : recording environments, sound sources and microphone techniques. Tradução: Stephen F. Temmer. New York: Temmer enterprises, 1989. 141 p.

DUARTE, Salvador. Readequação dos índices de isolamento acústico em complexo de salas de cinema utilizando tecnologia de painéis gypsum. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p. 330-335.

EVEREST, F. Alton; SHEA, Mike. Acoustical design of audio rooms. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988e. cap. 5, p. 93-118.

_____; _____. Acoustics of small rooms. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988b. cap. 3, p. 41-60.

_____; _____. Common factors in all audio rooms. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988c. cap. 4, p. 61-92.

_____; _____. Fundamentals of sound. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988f. cap. 1, p. 3-22.

_____; _____. **How build a small budget recording studio**. 2. ed. New York (EUA): TAB Books (division of McGraw-Hill), 1988a. 295 p.

_____; _____. Psychoacoustics. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988d. cap. 2, p. 23-40.

_____; _____. Recordings studios design. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988h. cap. 6, p. 119-154.

_____; _____. **Sound studio construction on a budget**. New York (EUA): McGraw-Hill, 1997. 298 p.

ENGEL, Zbigniew; KOSALA, Krzysztof. Acoustic properties of the selected churches in Poland, **Mechanics**, v. 24, n. 3, p. 173-181, 2005.

EYRING, Carl F. Reverberation time in "dead" rooms. **J. Acous. Soc. Am.**, v. 1, n. 2A, p. 217-241, January, 1930.

FAN, Pingzhi; DARNELL, Michael. **Sequence design for communications applications**. Somerset, England: Research Studies Press Ltd., 1996.

FARINA, Angelo. Acoustic quality of theaters: correlations between experimental measures and subjective evaluations. **Applied Acoustics**, v. 62, n. 8, p. 889-916, August, 2001.

_____. A new method for measuring the scattering coefficient and the diffusion coefficient of panels. **Acustica**, v. 86, n. 6, p. 928-942, nov./dez., 2000.

FEITEIRA, José Flávio; ZINDELUK, Moysés; MEDEIROS, José Bismark de; CARVALHO, Leonardo de Oliveira. Uso de modelos reduzidos e processamento de sinais para o projeto acústico de salas. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p. 306-311.

FERNANDES, João Cândido. Avaliação da inteligibilidade acústica em uma igreja pelos métodos subjetivo e analítico. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p. 300-305.

FIGUEIREDO, F. L.; IAZZETTA, F. Comparative study of measured acoustic parameters in concert halls in the city of São Paulo. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND

EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 2005, Rio de Janeiro. **Proceedings...**

_____; MASIERO B.; IAZZETTA, F. Análise de parâmetros acústicos subjetivos: critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música. In: REUNION ANUAL DE LA SOCIEDAD ARGENTINA PARA LAS CIENCIAS COGNITIVAS DE LA MÚSICA, 4, 2004, Tucumã, Argentina. **Anais...**

FISCHETTI, A.; JOUHANEAU, J. The Influence of first reflection distribution on the quality of concert halls. **Applied Acoustics**, v. 35, n. 3, p. 233-245, 1992.

FITZROY, D. Reverberation formula which seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 31, n. 7, p. 893-897, July. 1959.

FUJIWARA, K. Sound absorber for low frequency with the aid of random phase interference. **Proc. Autumn Meet. Acoust. Soc. Jpn**, p. 707-708 (1989) (in Japanese)

_____. Sound reflection and absorption of a QR-type Schroeder diffuser. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1995a. cap. 21, p. 211-217.

_____; MIYAJIMA, T. Absorption characteristics of a practically constructed Schroeder diffuser of quadratic-residue type. **Applied Acoustics**, v. 35, p. 149-152, 1992.

_____; _____. A study of the sound absorption of a quadratic-residue type diffuser. **Acustica**, v. 81, [s/nº], p. 370-378, 1995b.

_____; _____. Visualisation of the sound field around a Schroeder diffuser. **Applied Acoustics**, v. 60, n. 2, p. 225-236, 2000b.

FUJIWARA, K ; MORIYASU, N. The absorption coefficient of QRD in the low frequency range. **Proc. Autumn Meet. Acoust. Soc. Jpn**, p. 821-822. (1993b)(in Japanese)

_____; _____. A study on the absorption coefficient of a practically constructed Schroeder diffuser at normal incidence. **Proceedings Inter-noise 93**. V. III, p. 1703 (1993a)

_____; NAKAI, K.; TORIHARA, H. Visualization of the sound field around a Schroeder diffuser. **Applied Acoustics**, v. 60, n. 2, p. 225-235, June, 2000a.

GADE, A. C. Investigation of musicians room acoustic conditions in concert halls, Part I: Methods and Laboratory Experiments, **Acustica**, v. 69, n. 5, p. 193-203, Nov., 1989a.

_____. Investigation of musicians room acoustic conditions in concert halls, Part II: Field Experiments and synthesis of results , **Acustica**, v. 69, n. 5, p. 249-262, Nov., 1989b.

GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T., GIRÓN, S. Clarity and definition in Mudejar-gothic churches. **Building Acoustics**, v. 6, n. 1, p. 1-16, March, 1999.

GEN-HUA, Dai; ANDO, Y. Generalized analysis of sound scattering by diffusing walls. **Acustica**, v. 53, n. 6, p. 296-301, Okt., 1983.

GERGES, Samir N. Y. **Ruído** : fundamentos e controle. Florianópolis: S. N. Y. Gerges, 1992. 600 p.

GUIGUE, Didier; TRAJANO, Ernesto. Técnicas de filtragem espectral na Klavierstück n.11 de Stockhausen. João Pessoa: UFPB, 1999. Disponível em [http://www.cchla.ufpb.br/gmt/hp/pags_pessoais/didier/STO-KLAV11\(HTM\)/KI11DG.htm](http://www.cchla.ufpb.br/gmt/hp/pags_pessoais/didier/STO-KLAV11(HTM)/KI11DG.htm) Acesso em: 09 jan. 2007.

HAAN, C. H.; FRICKE, F. R. Surface diffusivity as a measure of the acoustic quality of concert halls. In: CONFERENCE OF THE AUSTRALIA AND NEW ZEALAND ARCHITECTURAL SCIENCE ASSOCIATION, 1993, Sydney. **Proceedings...**

HAAS, H. The Influence of a single echo on the audibility of speech. **Journal of AES**, v. 20, n. 2, p. 146-159, March, 1972.

HAAS, Helmut. **Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache**. 1949. ___ p. Dissertação (Doutorado) - Universität Göttingen, 1949. (translated into English by Dr. Ing. K.P.R. Ehrenberg, Building Research Station, Watford, Herts., England Library Communication no. 363, December, 1949)

HAAS, Helmut. Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache. **Acustica**, 1, p. 49-58, 1951, apud PISANI, Raffaele. Valutazione delle qualità acustiche delle sale per spettacolo. In: SPAGNOLO, Renato (Org.) **Manuale di acustica applicata**. Torino: UTET, 2001. cap. 7, item 7.3, p. 684-714.

HAMMOND, S. B. & GEHMLICH, D. K. **Engenharia elétrica**. Tradução de Ostend A. Cardim. São Paulo : McGraw Hill do Brasil, 1975. 550 p.

HARGREAVES, T. J., COX, T. J., LAM, Y.W., D'ANTONIO, P. Surface diffusion coefficients for room acoustics : free field measures. **J. Acoust. Soc. Am.**, v.108, n.4, 2000. p. 1710-1720.

HONEGGER, Marc. **Science de la musique**. Paris: Bordas, 1976. 4 v.

IANNIELLO, Carmine. Il suono negli ambienti chiusi. In: SPAGNOLO, Renato (Org.) **Manuale di acustica Applicata**. Torino: UTET, 2001. cap. 7, item 7.3, p. 652-683.

IAZZETTA, F.; FIGUEIREDO, F. L. ; MASIERO, B. S. Parâmetros Subjetivos em Salas Destinadas à Prática Musical. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ACÚSTICA, 4, 2004a, Guimarães, Portugal. **Anais...** p. 1-8. CD-ROM: id83.

_____; KON, F.; QUEIROZ, M. G.; SILVA, F. S. C.; GOMES, M. A.
AcMus: computational tools for measurement, analysis and simulation of room acoustics
In: EUROPEAN ACOUSTICS SYMPOSIUM, CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ACÚSTICA, 4, 2004, Guimarães, Portugal. **Proceedings...** 2004b. CD-ROM: id82.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics –** Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters: ISO 3382: 1997(E). Genève: ISO, 1997.

JONG, B. A. de; BERG, P. M. van den. Theoretical design of optimum planar sound diffusers. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 68, n. 4, p. 1154-1159, Oct., 1980.

JORDAN, A. K.; LANG, R. H. **Radio Science**, v. 14, p. 1077, 1979.

JORDAN, V. L. **Acoustical design of concert halls and theaters**. Applied Science: London, 1980.

KINSLER, Lawrence E.; FREY, Austin R. **Fundamentals of acoustics**. 3. ed. New York : John Wiley & Sons, 1982. 480 p.

KNUDSEN, Vern O.; HARRIS, Cyril M. **Acoustical design in architecture**. 2. ed. New York : Acoustical Society of America, 1978. 408 p.

KÜRER, R. Zur gewinnung von eizahlkriterien bei impulsmessungeg in der raumakustik. **Acustica**, v. 21, [s/nº], p. 370-372, 1969.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room acoustics**. London: Elsevier Science Publisher, 1973.

_____. **Room acoustics**. 4. ed. London: Elsevier Science Publisher, 2000.

_____. Sound absorption by pseudostochastic diffusers (Schroeder diffusers) **Applied Acoustics**, v. 42, p. 215-231, 1994.

LAM, Y. W. The dependence of diffusion parameters in a room acoustics prediction model on auditorium sizes and shapes. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 100, n. 4, pt. 1, p. 2193-2203, Oct., 1996.

LEEUWEN, F. J. van. (Nederlandse Radio-Unie, Hilversum) Amortissement des oscillations propres des petites salles par des resonateurs de Helmholtz. **Revue de l'U.E.R.** - Cahier A – Technique, n. 62, p.155-161, août, 1960.

- LEIPP, Emile. **Acoustique et musique**. 4. ed. rev. Paris : Masson, 1984. 376 p.
- _____. **La machine à écouter**: essai de psycho-acoustique. Paris : Masson, 1977. 260 p.
- LEWERS, T. H.; ANDERSON, J. S. Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London. **Journal of Sound and Vibration**, v. 92, n. 2, p. 285-297, 1984.
- LONG, Marshall. **Architectural acoustics**. Burlington, MA, EUA: 2006. 844 p.
- MALAFAIA, Soraia F.; TENENBAUM, Roberto A. Estudo psicoacústico dos parâmetros utilizados para caracterizar a qualidade acústica de salas de concerto. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p. 318-323.
- MANNIS, José A. Análise comparativa dos difusores de Schroeder com a organização serial na técnica de composição com 12 notas de Schoenberg : proposta de métodos para design de difusores acústicos. In: SEMINÁRIO DE MUSICA, CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 1., 2004, São Paulo. **Anais...**
- _____. **L'électroacoustique dans la musique d'aujourd'hui**. 1987. 189p. Dissertação (Mestrado em Música) - Université de Paris VIII, Paris, 1987.
- _____. Intérprete do som: Bases interdisciplinares da performance eletroacústica: Tomada e projeção do som. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 1., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** p.10 ISBN:85-89029-01-8 (acompanha CD-ROM com texto completo)
- MANNIS, J. A.; MANZOLLI, J. Introdução aos difusores de Schroeder e análise comparativa com a organização serial na técnica de composição com 12 notas de Schoenberg. **Acústica e vibrações**, n. 37, p. 15-27, Dez., 2006.
- MASIERO, B. S. **Estudo e implementação de métodos de mediação e resposta impulsiva em salas de pequeno porte**. Relatório técnico, Fapesp, 2004. Disponível em http://gsd.ime.usp.br/acmus/publi/relat_medicao.pdf Acesso em: 30 dez. 2006.
- _____; IAZZETTA, F. Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva. In: SEMINÁRIO MUSICA CIENCIA E TECNOLOGIA: ACUSTICA MUSICAL, 1, 2004, São Paulo. **Anais...** Disponível em: <http://gsd.ime.usp.br/acmus/publi/seminario2004.htm> Acesso em: 30 dez. 2006.
- MARSHALL, A. H.; GOTTLÖB, D.; ALRUTZ, H. Acoustical conditions preferred for ensemble. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 64, n. 5, p. 1437-1422, 1978.

MASUDA, K.; FUJIWARA, K. Sound reflection from periodical uneven surfaces. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1995. p. 191-201.

MECHEL, F. P. The wide-angle diffuser – a wide angle absorber? **Acustica**, v. 81, [s/n°], p. 379-401, 1995.

MERCIER, Denis. **Le livre des techniques du son**. Paris : Ed. Fréquences, 1987. 2v.

MEYER, Jürgen. **Akustik und musikalische aufführungspraxis**. Frankfurt: Verlag das musikinstrument, 1980. 259 p.

MILES, R. N. Sound field in a rectangular enclosure with diffusely reflecting boundaries. **Journal of Sound and Vibration**, v. 92, n. 2, p. 203-226, 1984.

MILLINGTON, G. A modified formula for reverberation. **J. Acous. Soc. Am.**, v. 4, n. 1A, p. 69-82, July, 1932.

MOMMERTZ, Eckart. Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. **Applied Acoustics**, v. 60, n. 2, June, 2000. p.201-203.

MORSE, P. M. **Vibration and sound**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1948. 468 p.

_____; BOLT, R. H. Sound waves in rooms. **Reviews of Modern Physics**, vol.16, n.2, p. 85, April, 1944.

NICKSON, A. F. B.; MUNCEY, R. W.; DUBOUT, P. The acceptability of artificial echoes with reverberant speech and music. **Acustica**, vol. 4. P. 515-518. Oldenberg, Deutschland, 1954 *apud* LONG, Marshall. Architectural acoustics. Burlington, MA, EUA: 2006. p. 751-752. NIEUWLAND, J. M. van; WEBER, C. Eingenmodes in nonrectangular reverberation rooms. **Noise Control Engineering**, v. 13, n. 3, p. 112-121, November-December, 1979.

OKANO, T.; HIDAHA, T.; BERANEK, L. Relations between the apparent source width (ASW) of the sound field in a concert hall and its sound pressure level at low frequencies (GL) and its interaural cross-correlation coefficient (IACC). In: MEETING OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 128., 1994, Austin, Texas. **Anais...**

OLSON, Harry F. **Acoustical engineering**. New York: Dover, 1967. 718 p.

_____. **Music, physics and engineering**. New York : D. Van Nostrand Company, 1957. 460 p.

ONITSUKA, Hirofumi; KAWAKAMI, Fukushi. Numerical study of energy dissipation in QR-diffusers. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1997. cap. 20, p. 203-209.

_____; _____. Numerical study on the energy dissipation of diffusers. **Proc. Autumn Meet. Acoust. Soc. Jpn**, p. 813-814, 1993. (in Japanese)

_____; _____. Numerical study on the energy dissipation of diffusers. **Tec. Rep. Archit. Acoust. Soc. Jpn**, AA94-20, 1994. (in Japanese)

PETZOLD, Ernst. **Elementare Raumakustik**. Berlin : Bauwelt-verlag, 1927. 129 p.

PIRN, Rein. Some objective and subjective aspects of three acoustically variable halls. **Applied Acoustics**, v. 35, n. 3, p. 221-231, 1992.

PISANI, Raffaele. Valutazione delle qualità austiche delle sale per spettacolo. In: SPAGNOLO, Renato (Org.) **Manuale di acustica applicata**. Torino: UTET, 2001. cap. 7, item 7.3, p. 684-714.

PRADO, L. Cintra do. **Acústica arquitetônica**. São Paulo: USP, 1962. 128 p.

QUEIROZ, M. Some Optimization models for listening room design. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO E MÚSICA, 9., 2003, Campinas, SP. **Anais...** p. 149-154.

RAYLEIGH, J. W. S. **The theory of sound**. 2. ed. rev. e aum. New York: Dover Publications, 1945. 2 v.

REICHART, von W.; ALIM, O. Abdel; SCHMIDT, W. Definition und messgrundlage eines objektiven masses zur unbrauchbarer durchsichtigkeit bei musikdarbietung. **Acustica**, v. 32, [s/nº], 1975. p. 130.

ROSSING, Thomas D. **The Science of sound**. 2. ed. New York: Addison Wesley, 1990. 686 p.

SABINE, Paul E.; RAMER, L. G. Absorption-frequency characteristics of plywood panels. **J. Acous. Soc. Am.**, v. 20, n. 3, p. 267-270, May, 1948.

SCHAEFFER, Pierre. **Traité des objets musicaux: essai interdisciplines**. Paris : Seuil, 1966. 711 p.

SCHOENBERG, Arnold. **Style and idea**. New York : Philosophical Library, 1950. vii, 224 p.

_____. **Stile e idea**. Tradução: Maria Giovanna Moretti e Luigi Pestalozza. Milano : Rusconi e Paolazzi, 1960. xlvii. 237 p.

SCHROEDER, Manfred R. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls : more lateral sound diffusion. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 65, n. 4, p. 958-963, Apr. 1979.

_____. New method of measuring reverberation time. **J. Audio Eng. Soc.**, v. 37, n. 3, p. 409-412, Mar. 1965.

_____. **Number theory in science and communication:** with applications in cryptography, physics, digital information, computing, and self-similarity. 3. ed. New York: Springer-Verlag, 1997. (Spring series in Information Sciences, v. 7) 363p. (1. ed. em alemão, Berlin : Springer, 1984a)

_____. Progress in architectural acoustics and artificial reverberation: concert hall acoustics and number theory. **J. Audio Eng. Soc.**, v. 32, n. 4, p.194-198, Apr. 1984b.

_____; GOTTLÖB, D.; SIEBRASSE, K. F. Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometrical and acoustic parameters. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 56, n. 4, p. 1195-1201, October 1974.

SEARS, Francis; ZEMANSKY, Mark W.; YOUNG, Hugh D. **Física:** mecânica dos fluidos, calor, movimento ondulatório. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. v. 2.

SEPMAYER, L. W. Computed frequency and angular distribution of the normal modes of vibration in rectangular rooms. **J. Audio Eng. Soc.**, v. 37, n. 3, p. 413-423, Mar., 1965.

SETTE, W. H. A New reverberation time formula, **J. Acous. Soc. Am.**, v. 4, n. 3, p. 193-210, January, 1932.

SMITH, PETERS, R. J., OWEN, S. **Acoustics and noise control.** 2. ed. London: Longman, 1996. 330 p.

SPAGNOLO, Renato (Org.) **Manuale di acustica applicata.** Torino: UTET, 2001. 928 p.

STRUBE, Hans W Diffraction by a planar, locally reacting, scattering surface. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 67, n. 2, p. 460-469, Feb., 1980b.

_____. Scattering of a plane wave by a Schroeder diffusor : a mode-matching approach. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 67, n. 2, p. 453-459, Feb., 1980a.

TAKAHASHI, D. A design method for optimum acoustic diffusers. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics:** conference proceedings from MCHA 1995. London: Academic Press, 1997.

_____. Theoretical investigation for sound absorption of QRD. **Tec. Rep. Archit. Acoust. Soc. Jpn**, AA94-3 (1994b) (in Japanese).

TENEMBAUM, Roberto A.; VASCOLCELLOS, Lenine. Sobre a influência do teto móvel na qualidade acústica da sala São Paulo. In: SEMINÁRIO MUSICA CIENCIA E TECNOLOGIA: ACUSTICA MUSICAL, 1, 2004, São Paulo. **Anais...** Disponível em: <http://gsd.ime.usp.br/acmus/publi/seminario2004.htm> Acesso em: 30 dez. 2006.

UEDA, L. K.; FIGUEIREDO, F. L.; IAZZETTA, F.; KON, F. A user-friendly graphical system for room acoustics measurement and analysis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO MUSICAL, 10, 2005, Belo Horizonte. **Anais...**

_____; KON, F.; IAZZETTA, F. An open-source platform for musical room acoustics research. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 2005, Rio de Janeiro. **Proceedings...**

VALADARES, Victor M. Avaliação simplificada de desempenho acústico de salas utilizadas para concertos em Belo Horizonte. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p. 487-492.

VORLÄNDER, Michael; MOMMERTZ, Eckart. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. **Applied Acoustics**, v. 60, n. 2, p.187-199, June, 2000.

XENAKIS, Iannis. **Musiques formelles** : nouveaux principes formels de composition musicale. Paris : Richard-Masse, c1963. 232 p. Disponível em <http://www.iannis-xenakis.org/MF.htm> Acesso em: 06 jan. 2007.

WALKER, R.; BAIRD, M.D.M. **Modular acoustic diffuser** : the development and performance of a modular acoustic diffuser. Research and Development Report, BBC RD 1995/1. BBC Research & Development Department : Surrey, 1995.

WATTERHOUSE, Richard V., COOK, Richard K. Interference Patterns in Reverberant Sound Fields. II **J. Audio Eng. Soc.**, v. 37, n. 3, p. 424-428, Mar., 1965.

WEBERN, Anton. **Chemin vers la nouvelle musique**. Tradução do alemão : Anne Servant, Didier Alluard, Cyril Huvé. Paris : Jean-Claude Lattès, 1980. 170 p. (Collection Musiques et musiciens, dir. Odile Cail)

WU, T., COX, T. J.; LAM, Y. W. From a profiled diffuser to an optimised absorber. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 108, n. 2, p. 643-650, August, 2000.

_____; _____. A profiled structure with improved low frequency absorption. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 110, n. 6, p. 3064-3070, December, 2001.

YEHIA, Hani Camille; SILVA, Juliana Paulino da. Estudo quantitativo da variação da função de transferência em salas acústicas. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p. 324-329.

YILI, Y; SILVA, F. S. C.; IAZZETTA, F. ; KON, F. Estimadores de Qualidade para Pequenas Salas Destinadas a Atividades Musicais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO E MÚSICA, 9., 2003, Campinas, SP. **Anais...** p. 163-170.

11. ANEXOS

11.1 ANEXO 1: SALA VILLA-LOBOS (UNIRIO)

11.1.1 Auditório

11.1.1.1 Altura dos rebatedores de palco

Os rebatedores de palco com altura próxima aos rebatedores de teto.

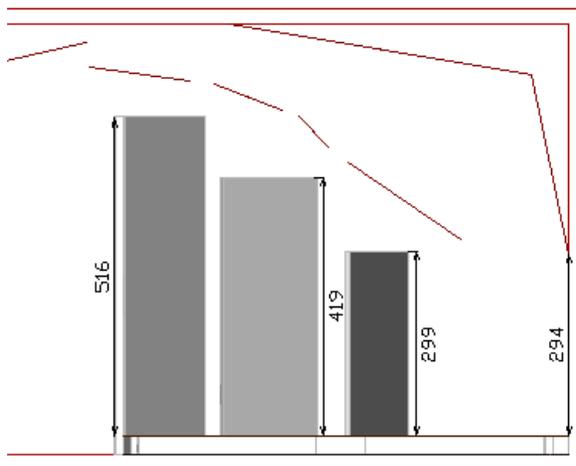


Figura 11.1 – Alturas dos rebatedores de palco.

11.1.1.2 Paredes laterais da platéia

As superfícies laterais da platéia devem ser confeccionadas alternando matérias (madeira, gesso e cerâmica ou azulejos). Foi buscado dar o máximo de angulação possível a essas superfícies, evitando paralelismo, ajudando as reflexões das fonte no palco chegarem à platéia, tudo isso sem invadir a zona reservada às poltronas da platéia.

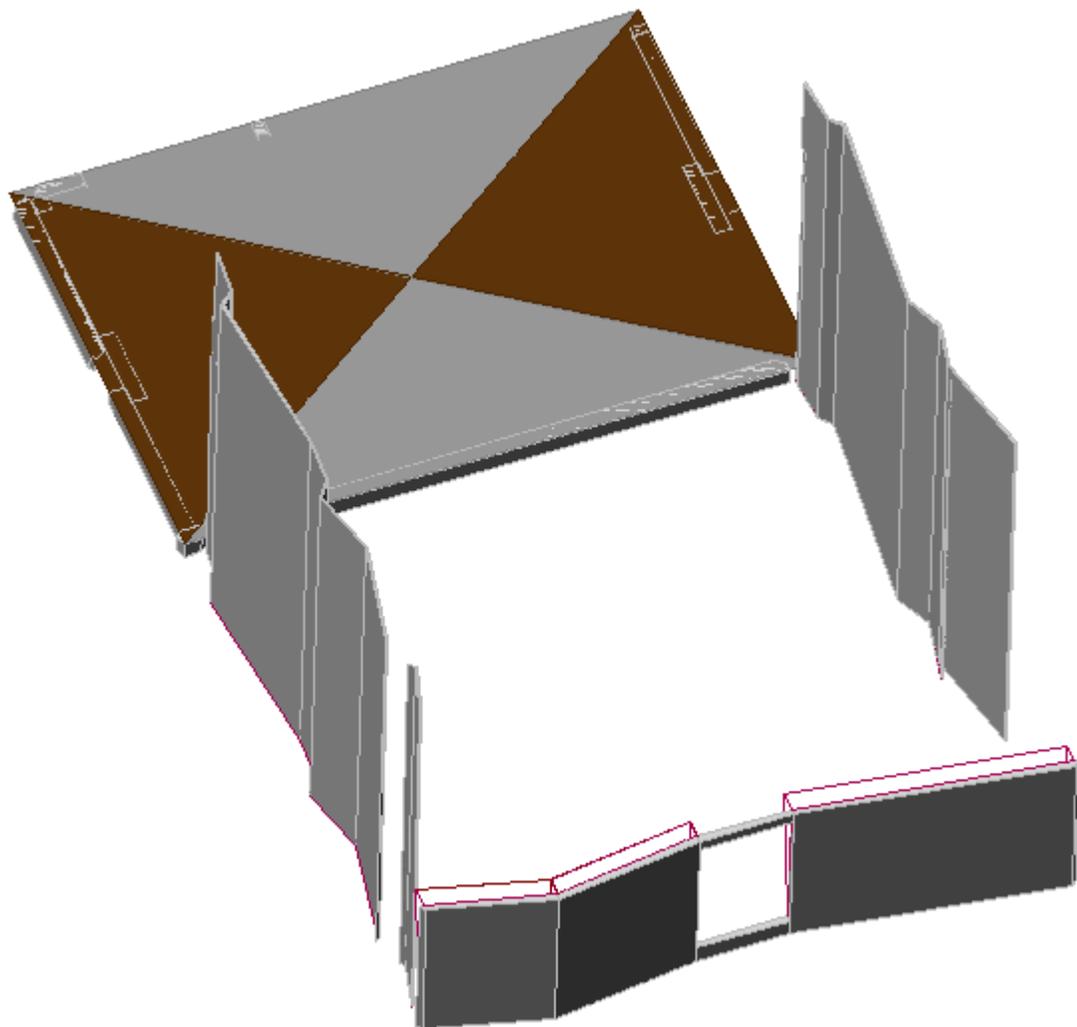


Figura 11.2 – Superfícies laterais da platéia em relação ao palco e ao fundo da sala em perspectiva.

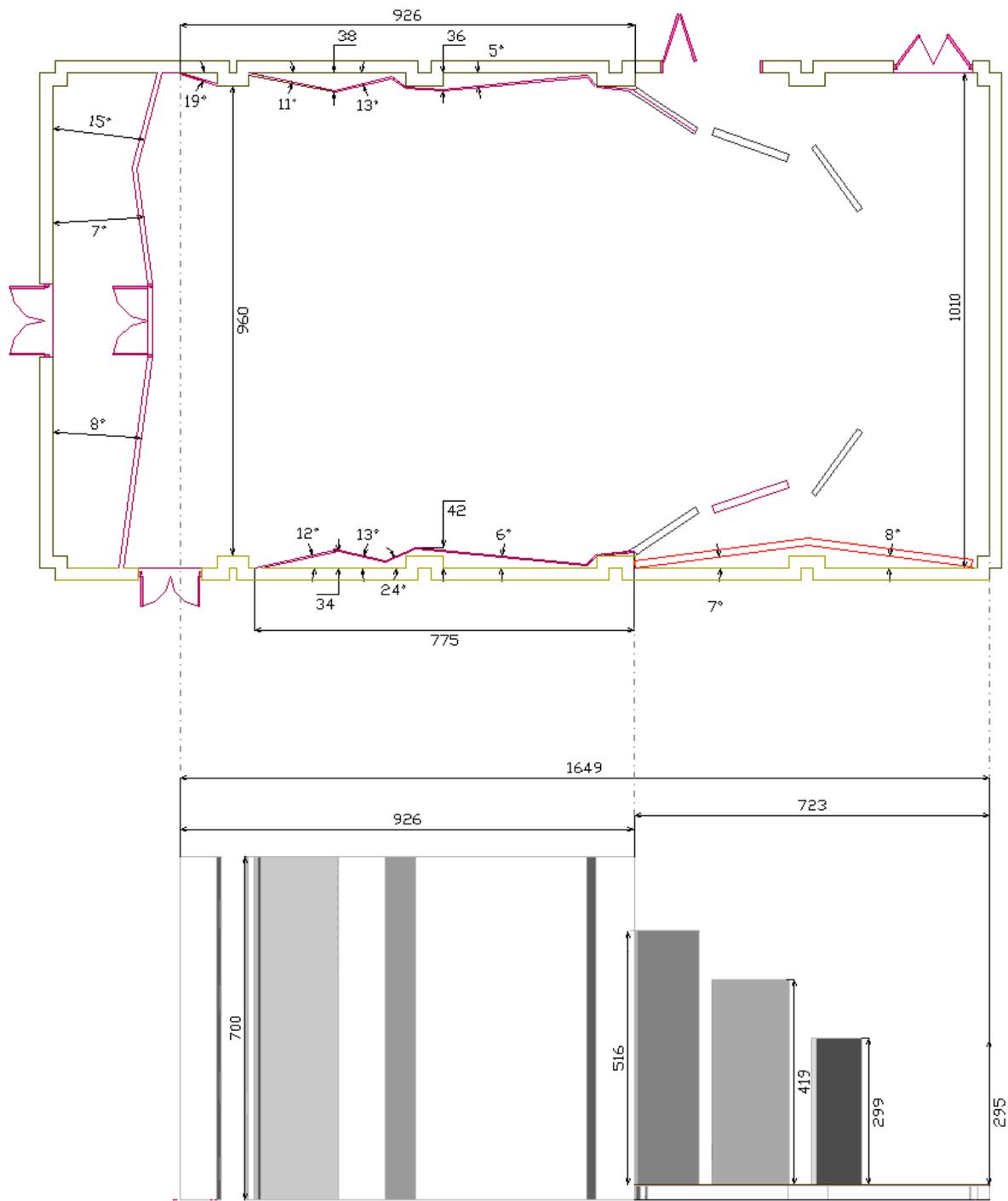


Figura 11.3 – Vista superior e vista lateral das superfícies laterais da platéia, em contexto com o palco, rebatedores de palco e superfície ao fundo no nível do piso e na entrada platéia. Detalhamento de medidas e ângulos.

11.1.1.3 Superfície anterior: entrada do público

A partir do pátio, após a primeira porta de entrada do *auditório*, uma parede e uma segunda porta asseguram um isolamento adequado em relação ao ambiente externo impedindo que ruídos entrem indevidamente na sala a cada vez que alguém entrar ou sair.

As inclinações dessa parede são tais que dirigem as ondas sonoras incidentes às paredes laterais e ao piso.

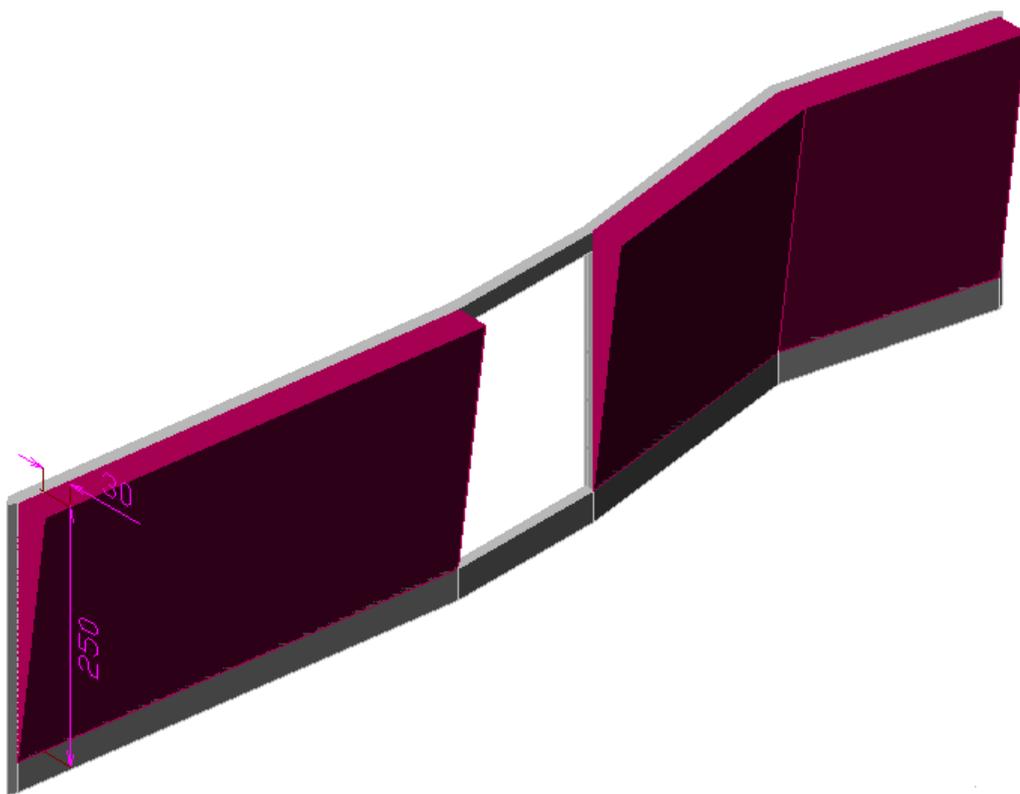


Figura 11.4 – Superfície de gesso ao fundo do auditório: segunda porta de entrada do público e inclinações projetando o som às laterais e ao piso.

11.1.1.4 Rebatedores de teto

11 + 2 rebatedores de teto precisamente instalados e com angulação definida.

Foi autorizada fragmentação de cada elemento para facilitar a fatura e a fixação das peças. Porém foi solicitado que os ângulos, as alturas e as distâncias em relação ao palco permanecessem para proporcionar as devidas reflexões do palco à platéia.

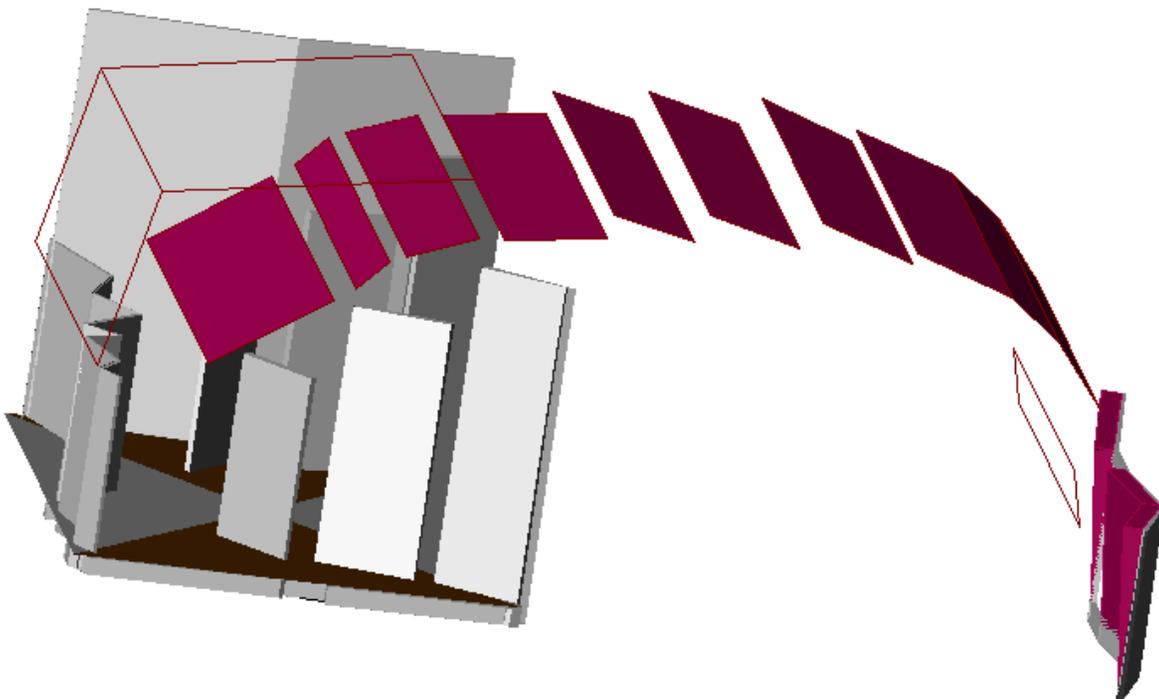


Figura 11.5 – Rebatedores de teto vistos em perspectiva.

11.1.1.5 Vista geral da sala

Pode-se observar na figura abaixo o conjunto dos elementos planejados para o Auditório da Sala Villa-Lobos, com exceção da parede externa da Cabine de Controle de Gravação, que será mostrada no projeto da planta da mesma, pois está integrada ao mesmo desenho.

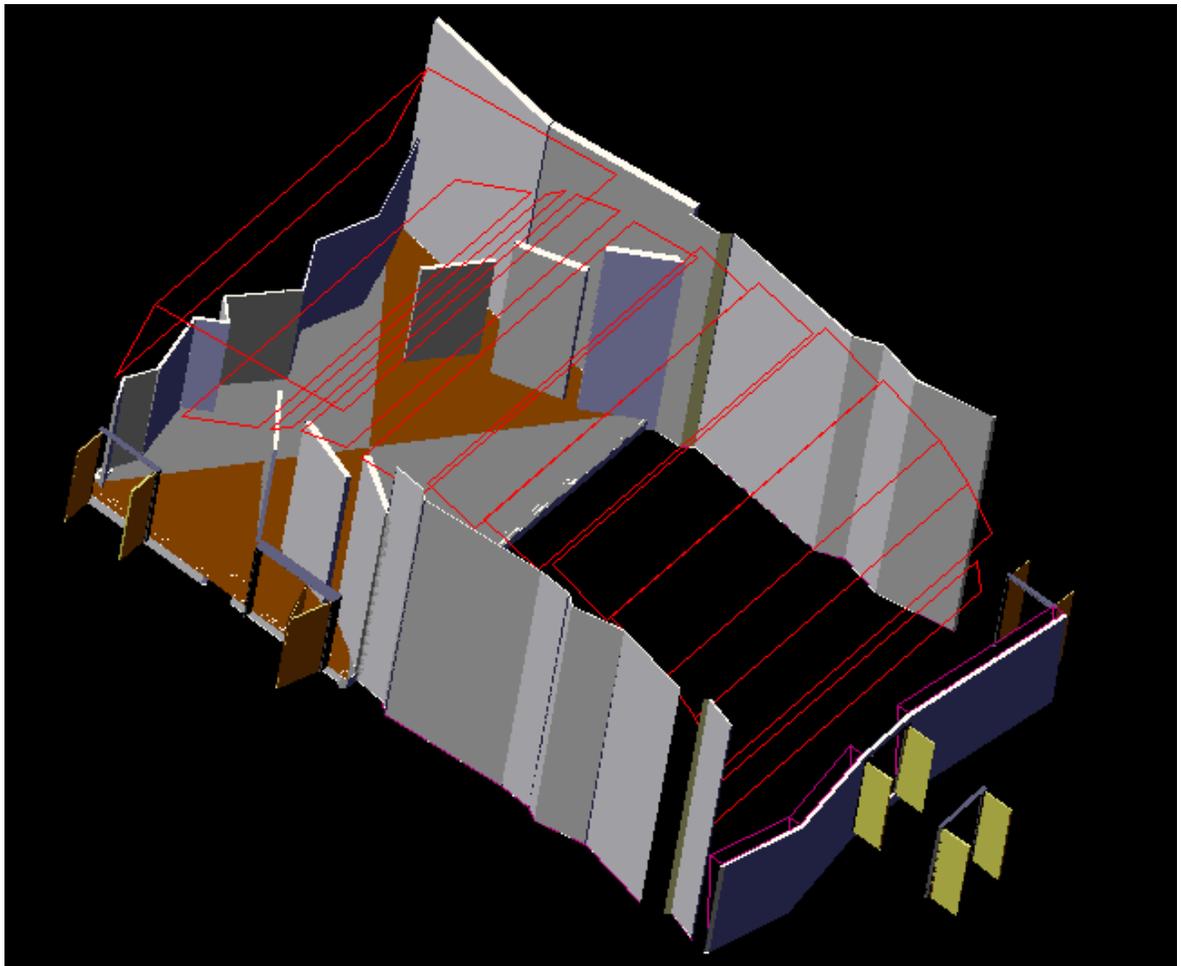


Figura 11.6 – Vista geral da sala em *vol d'oiseau*.

11.1.1.6 Estudo de reflexões especulares

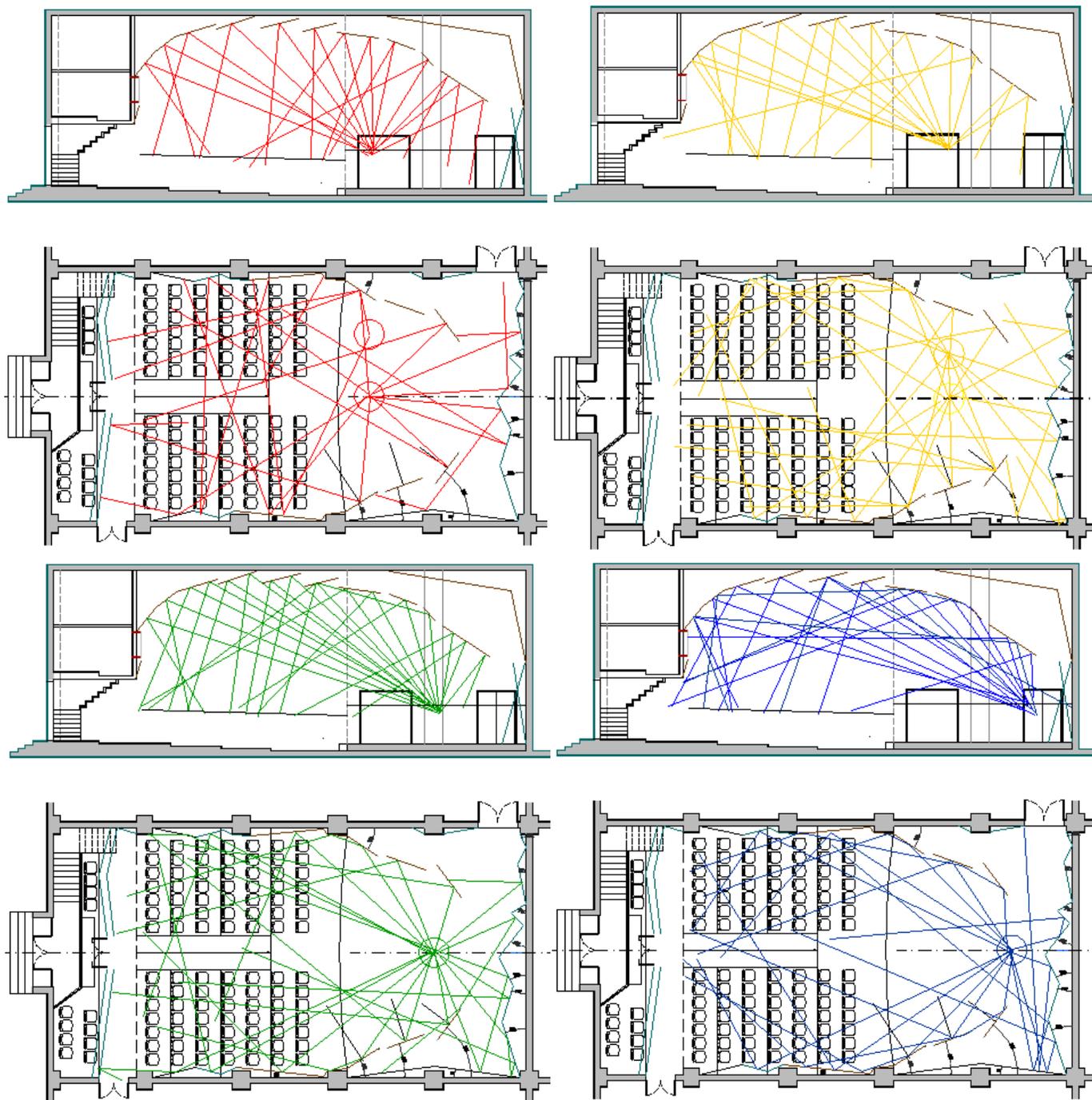


Figura 11.7 – Reflexões especulares na parede serial ao fundo no palco e nos rebatedores de teto e laterais. Vistas superior e lateral. A maioria dos posicionamentos possíveis dos músicos no palco permite reflexões nos rebatedores abrangendo eficientemente toda a platéia.

11.1.2 Ilustrações de propostas encaminhadas e resultados esperados

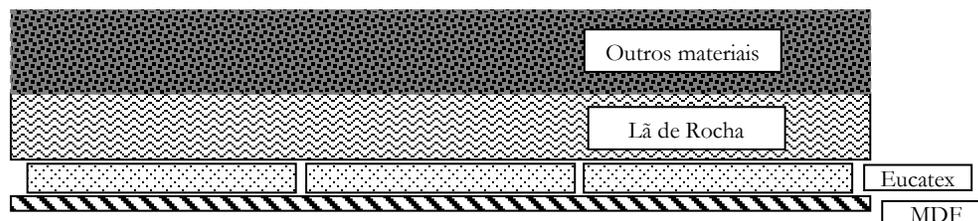


Figura 11.8 – Proposta de isolamento alternativo do forro do auditório em função de restrições orçamentárias.

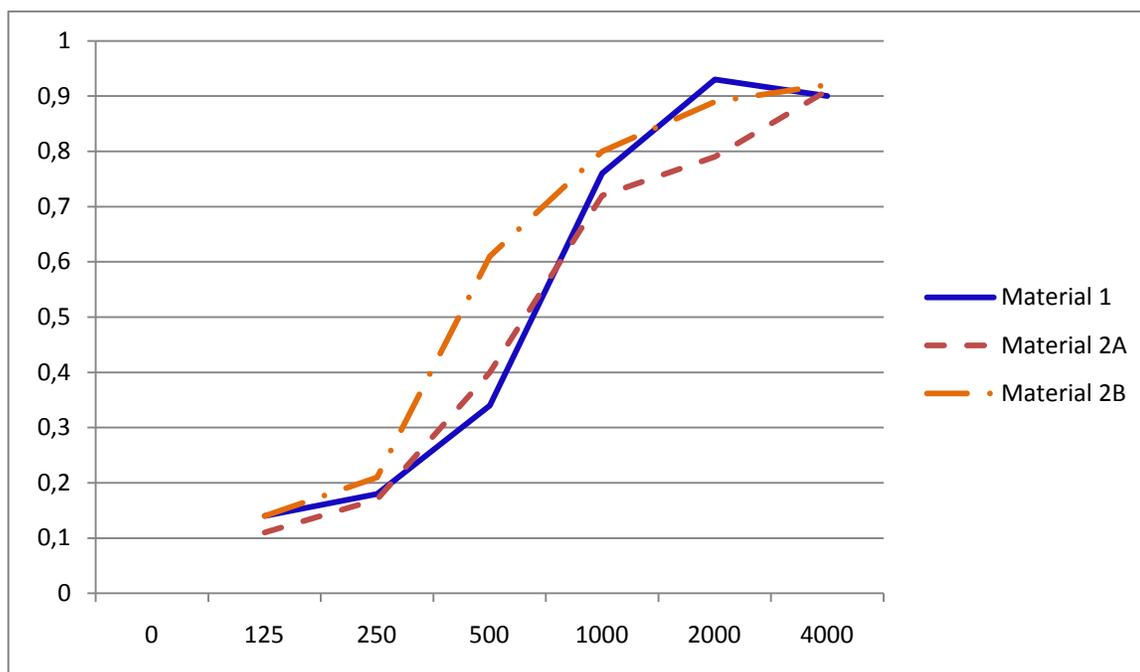


Figura 11.9 – Características de dois materiais de revestimento recomendados para atenuação na banda de frequência de 2KHz.

11.2 ANEXO 2: LAMI/ECA/USP

11.2.1 Superfícies laterais de madeira

Nas laterais, superfícies de madeira espessa (mínimo 38 mm) sobre a parede atualmente revestida de placas de madeirite fino (Figura 11.10, Figura 11.11, Figura 11.12, Figura 11.13, Figura 11.14). A superfície (C) da Figura 11.10 eleva-se a somente 2,30 metros (Figura 11.11), pois, conforme Figura 11.21 (B), a superfície plana da parte superior da parede lateral, sobre a janela e onde há a saída de ar natural, terá diante de si o teto que desce em inclinação até a porta de acesso ao auditório.

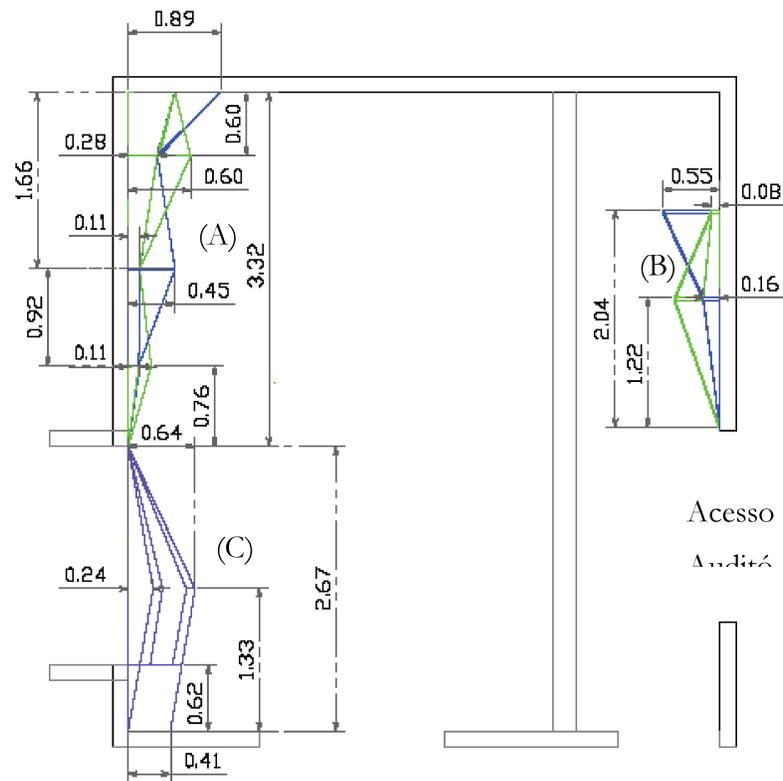


Figura 11.10 - Coordenadas em vista superior para instalação das superfícies de madeira nas laterais. (A) e (B) alinhadas face a face e (C) em oposição à porta de acesso ao auditório.

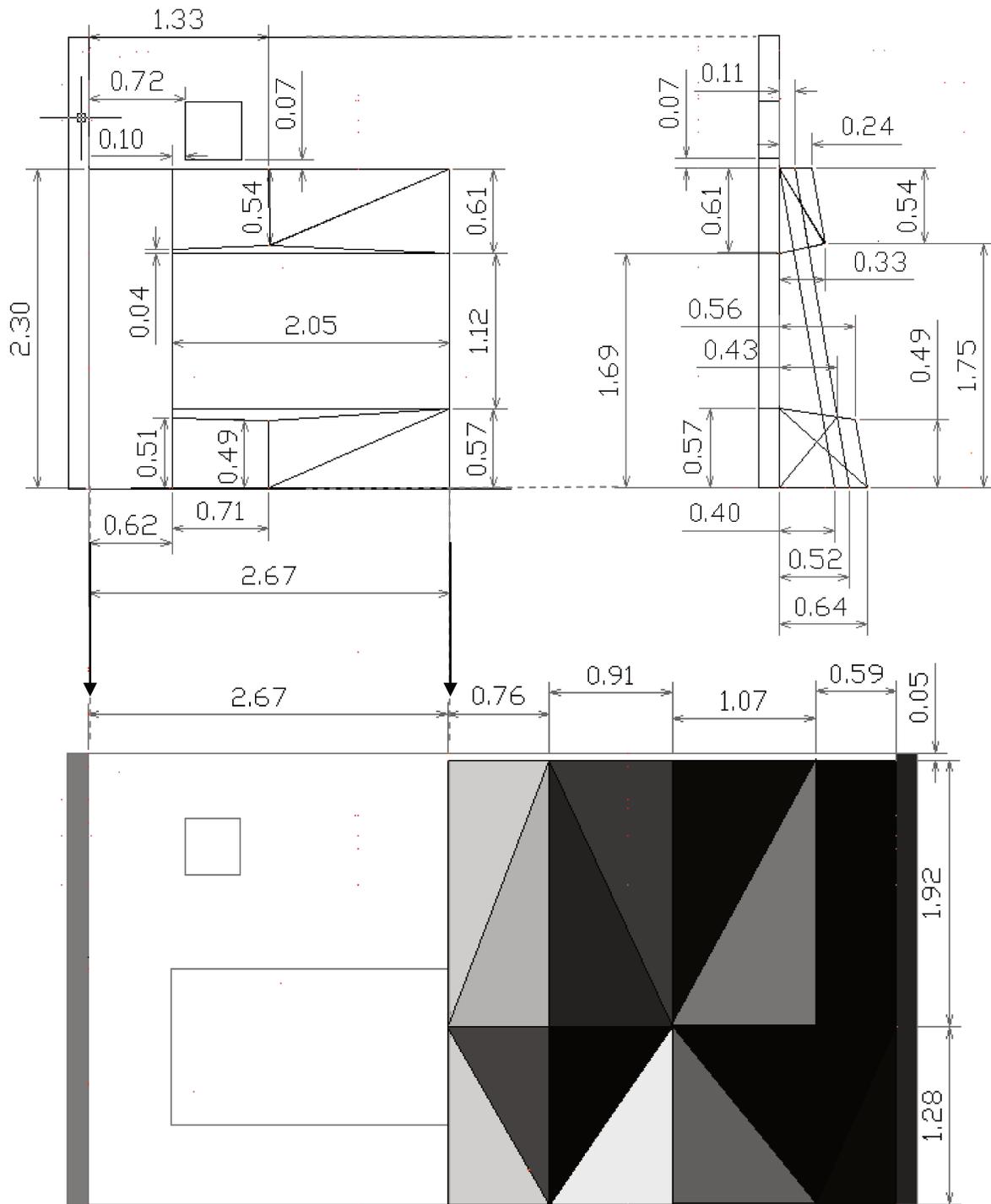


Figura 11.11 – Coordenadas em vistas frontal e lateral para instalação da superfície de madeira ao redor da janela de vidro externa, em face da porta de acesso ao auditório.

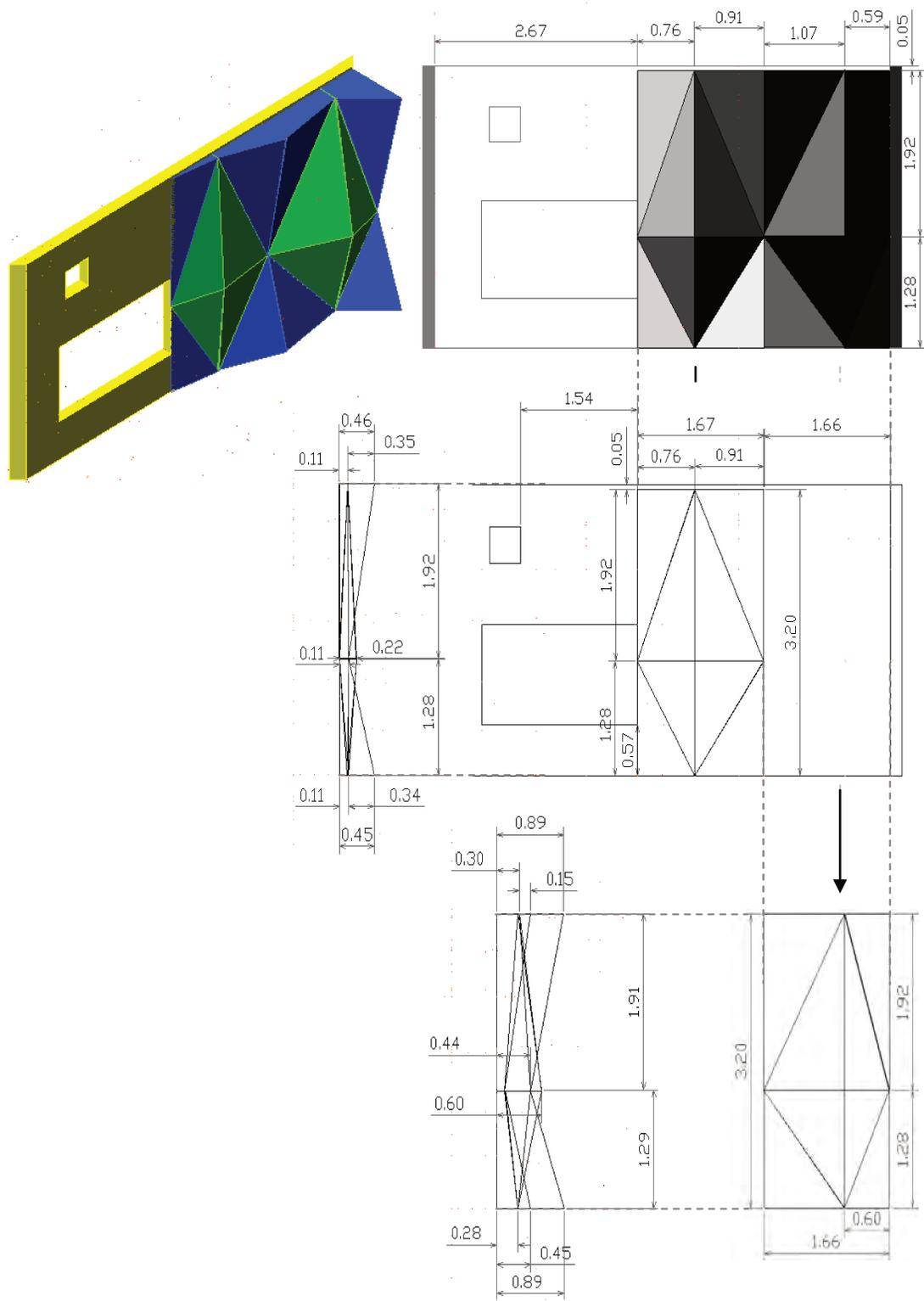


Figura 11.12 – Coordenadas em vistas frontal e lateral da superfície de madeira à esquerda e ao fundo da sala de captação de som, constituída de dois blocos.



Figura 11.13 – Conjunto formado pelas duas superfícies de madeira instaladas lado a lado sobre a parede lateral esquerda da Sala de Gravação.

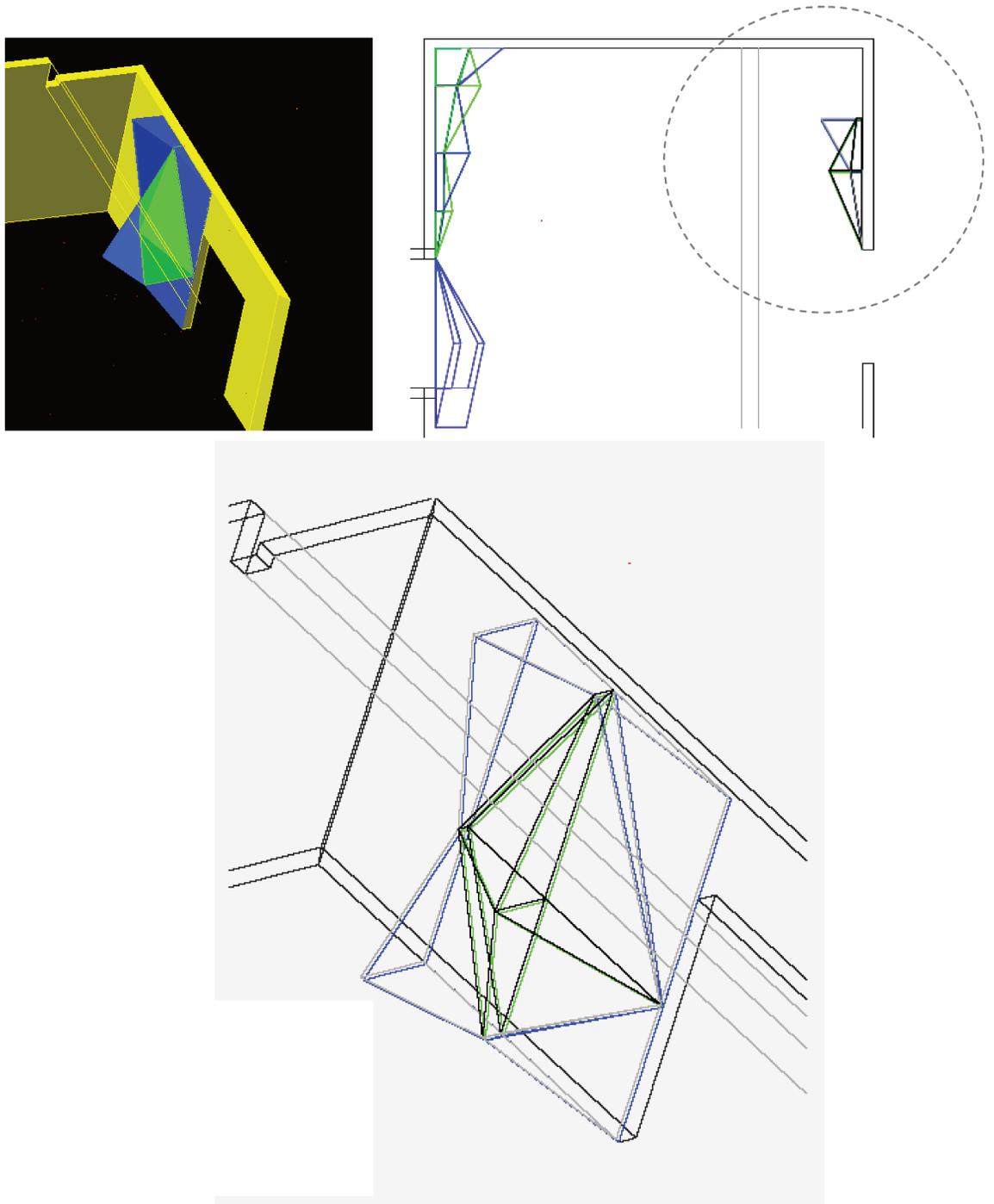


Figura 11.14 – Vistas superior e diagonal da superfície de madeira à direita e ao fundo da Sala de Gravação, constituída de um único bloco.

11.2.2 Teto de gesso

Teto de gesso com placas retangulares e triangulares, formando plano irregular e inclinado em duas direções, conforme alturas dos cantos (A) 3,15 m; (B) 2,65 m; (C) 2,30 m; (D) 2,30 m na *Figura 11.15*.

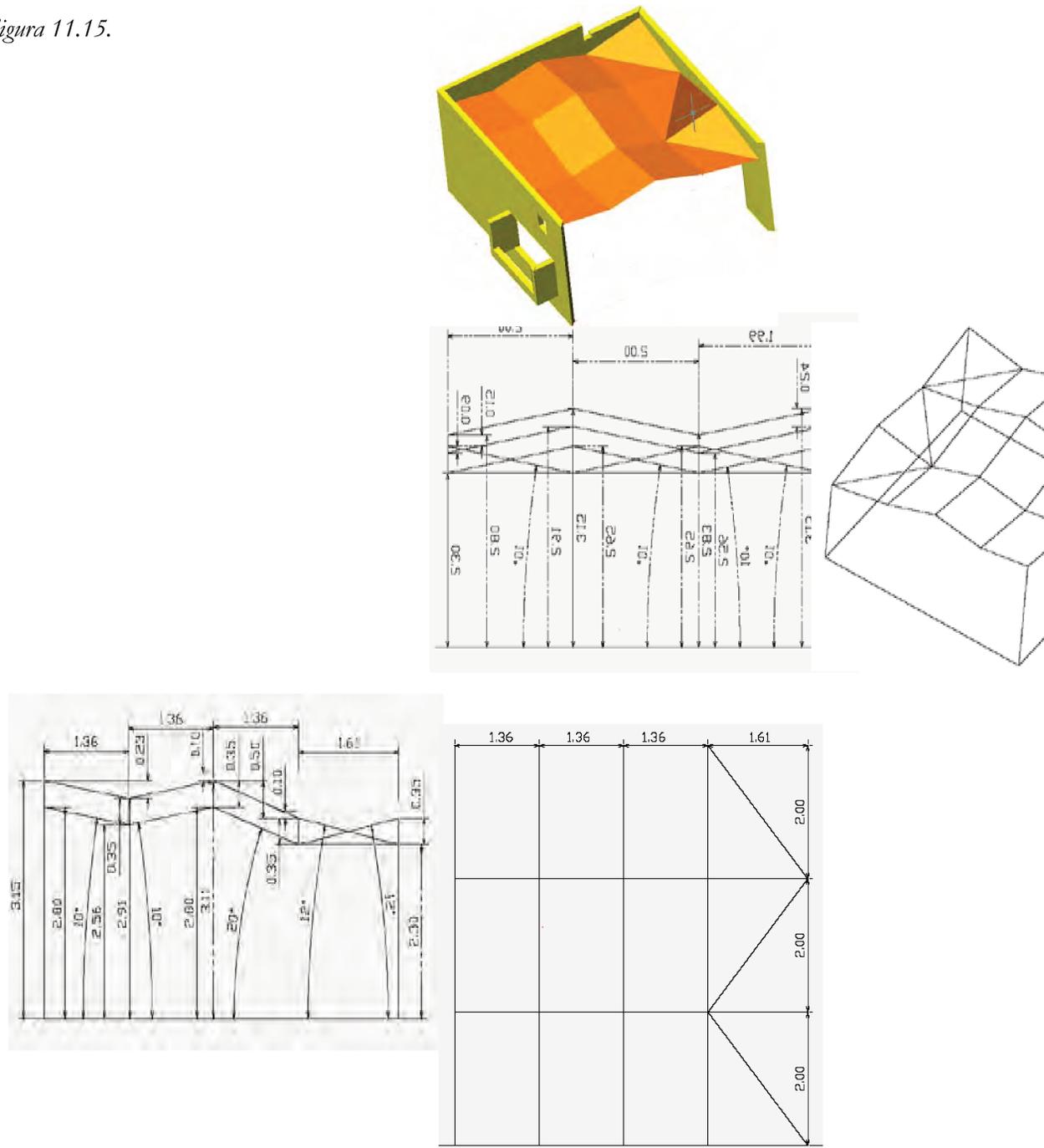


Figura 11.15 – Teto de gesso: coordenadas para instalação.

Estrutura metálica (Figura 11.16) suportando as placas de gesso duplo acartonado, penduradas com tirantes tendo, ao meio, amortecedores evitando a transmissão de ruídos.

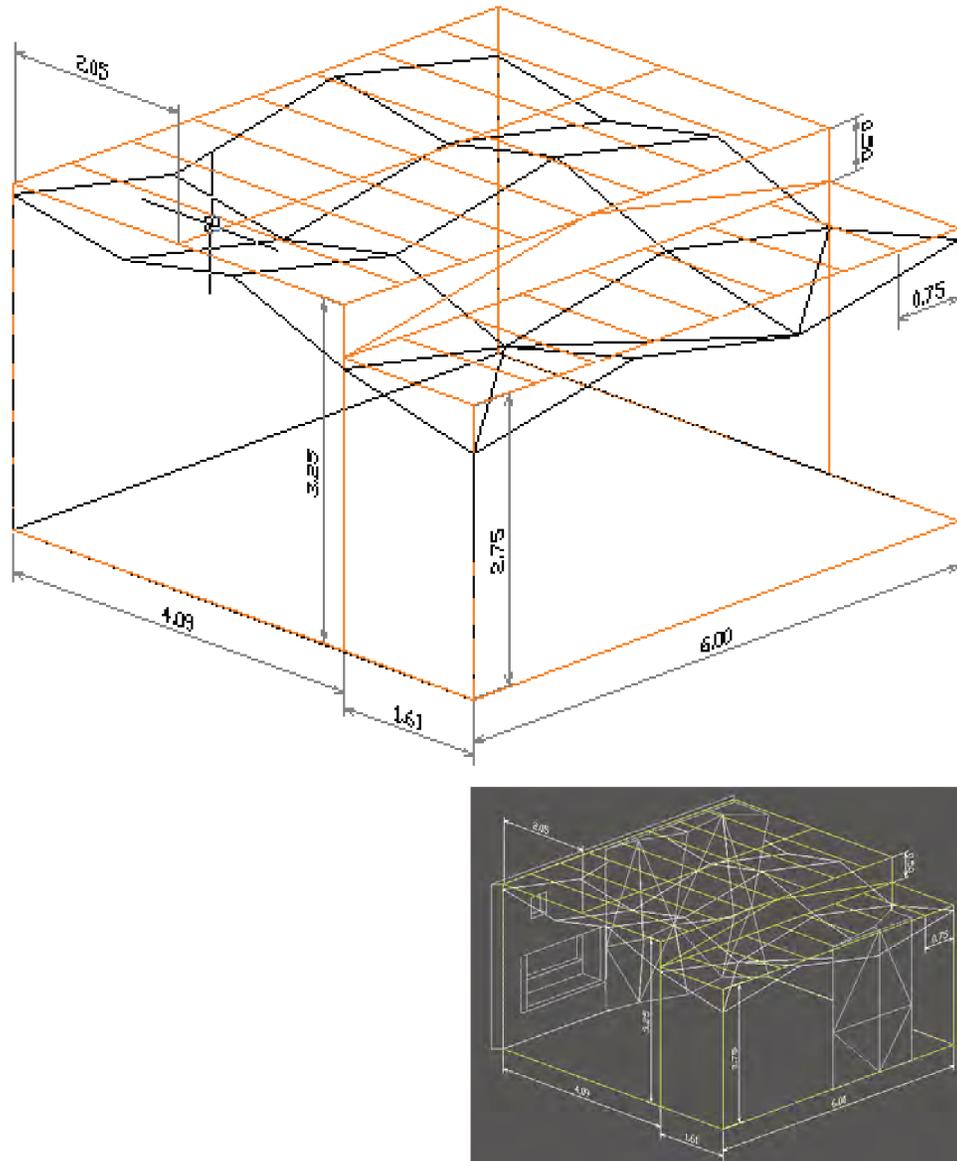


Figura 11.16 – Estrutura metálica onde serão penduradas as placas de gesso através de tirantes com amortecedor.

11.2.3 Superfícies combinadas

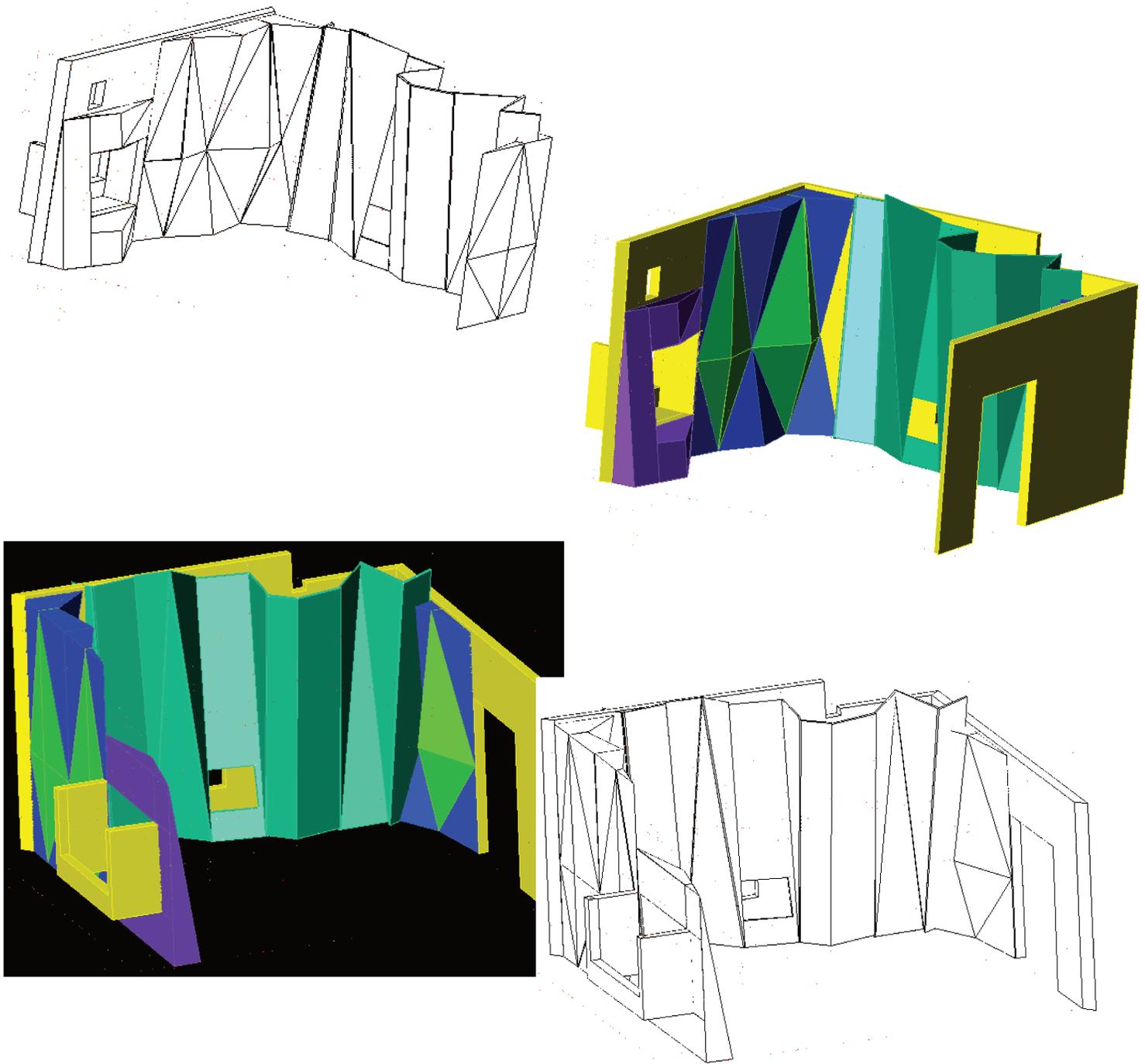


Figura 11.17 – Conjunto das superfícies de madeira e a superfície serial de gesso ao fundo.

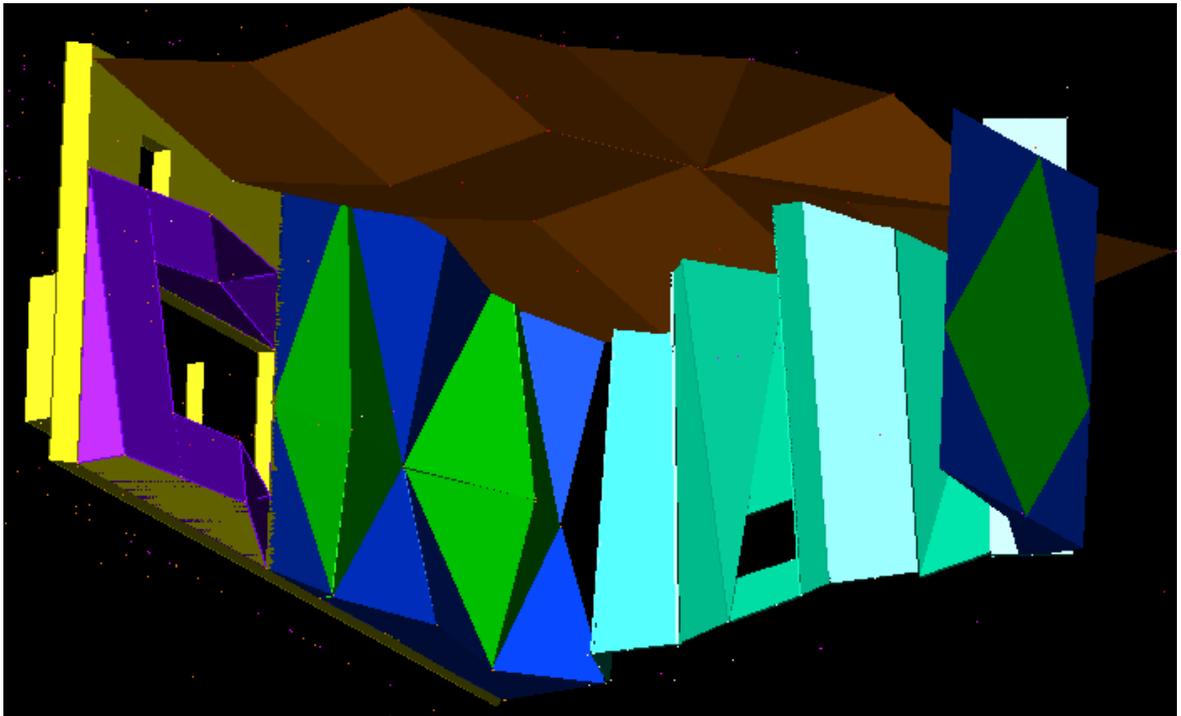
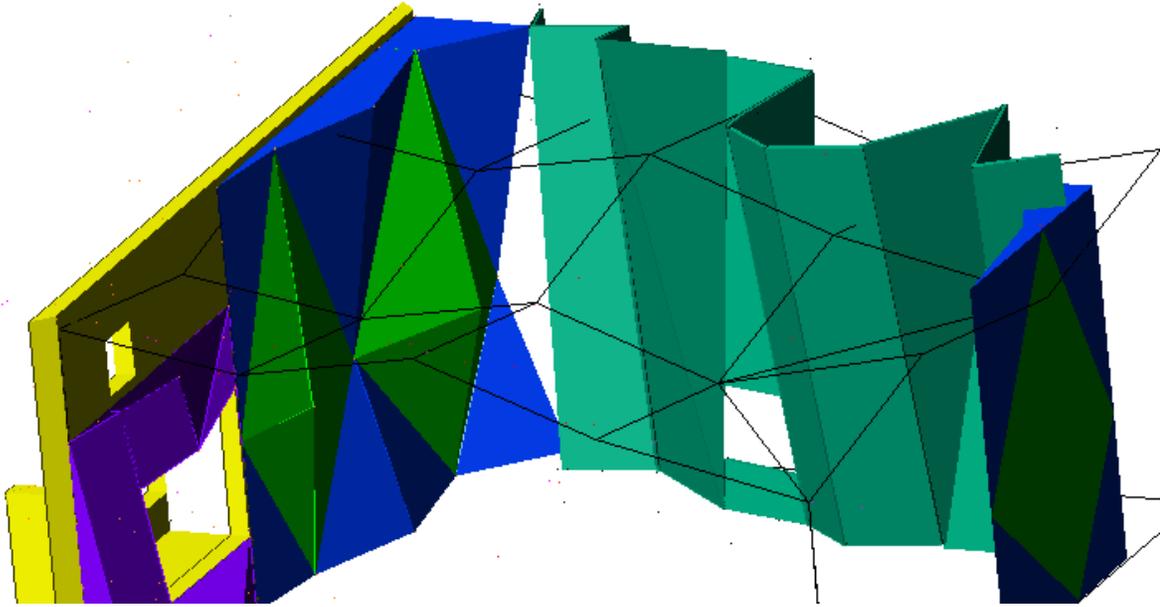


Figura 11.18 – Desenho vazado do teto em *vol d'oiseau* e vista por baixo do teto com o conjunto de paredes projetadas.

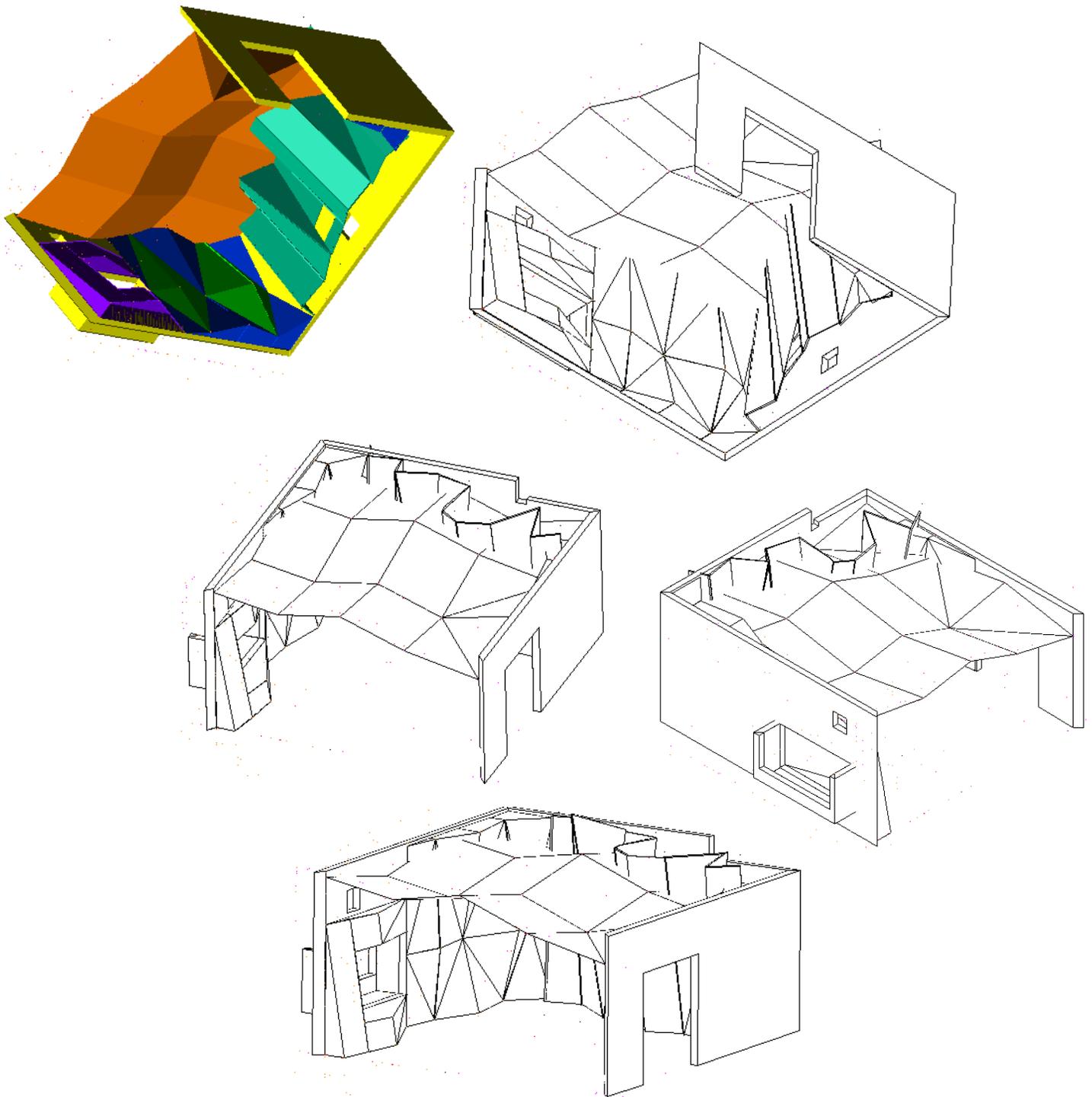


Figura 11.19 – Várias vistas em 3D das paredes e do teto projetados.

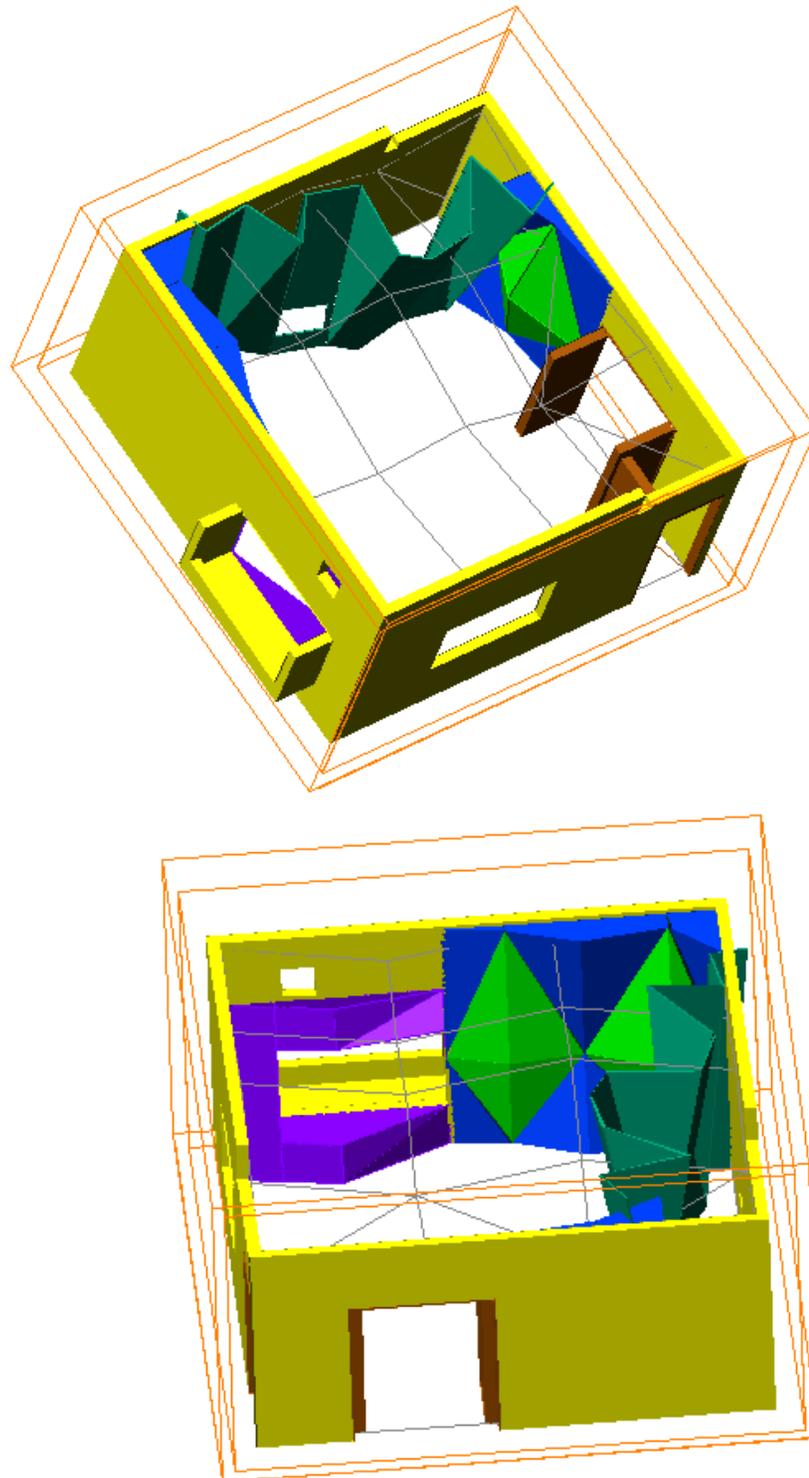


Figura 11.20 – Paredes e teto vazado mostrando todas as paredes atuais e traçado correspondente à caixa de alvenaria envolvendo a *sala de tomada de som*.

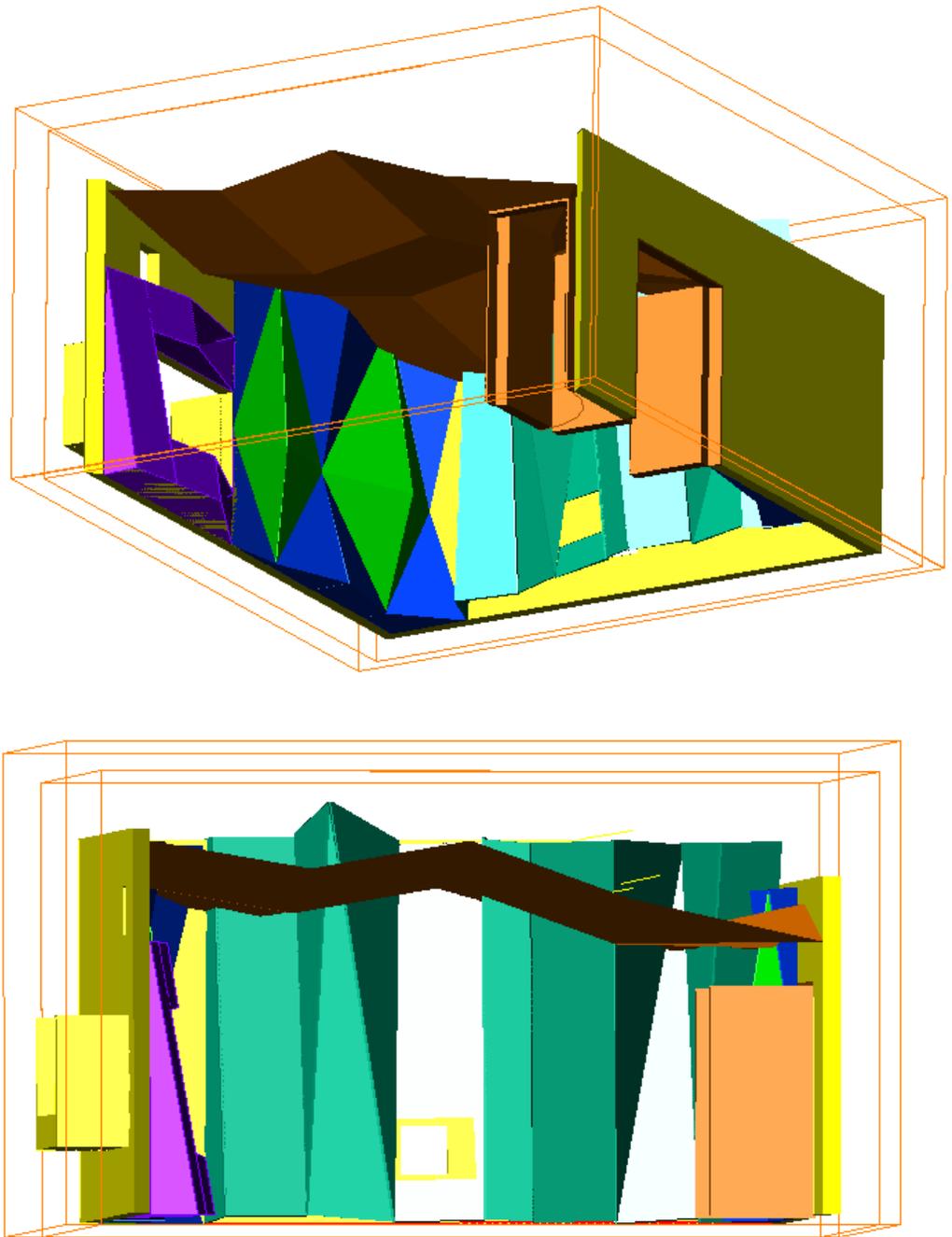


Figura 11.21 – Vista inferior em diagonal e vista da *cabine de controle de gravação* do conjunto de elementos projetados.

11.3 ANEXO 3: MEDIÇÕES PRELIMINARES LAMI/ECA/USP

11.3.1.1 Medições

Medições preliminares foram efetuadas no Laboratório de Acústica Musica e Informática – LAMI/USP em 20/08/2000, com equipamento e equipe do Laboratório de Conforto Ambiental e Física da FEC/Unicamp, dirigido pela Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli.

Foi utilizado um *Investigator Bruel & Kjaer* acoplado a amplificador e caixa acústica omnidirecional do mesmo fabricante e compatíveis entre si. O detalhamento de todo o processo de medição, planejado com a colaboração do Dr. Peter Barry do IPT/USP, encontra-se no ANEXO 2. Salientamos que foram contempladas várias exigências da Norma ISO 3382: 1997(E) referente à *Medição de reverberação de salas com referência a outros parâmetros acústicos*.

Denominação dos Grupos de Medições	Posição da fonte	Posições ordinárias (com)	Posições em supostos ventres (nos)	Posições sob o rebaixamento do teto (reb)
A	FS1	20 pontos	-	-
B	FS1	-	7 pontos	-
C	FS1	-	-	5 pontos
-	-	-	-	-
E	FS2	20 pontos	-	-
F	FS2	-	7 pontos	-
G	FS2	-	-	5 pontos
-	-	-	-	-
I	FS3	20 pontos	-	-
J	FS3	-	7 pontos	-
K	FS3	-	-	5 pontos

Tabela 11-1 – Relação dos pontos de medições da *sala de captação de som* do Estúdio do LAMI/ECA/USP.

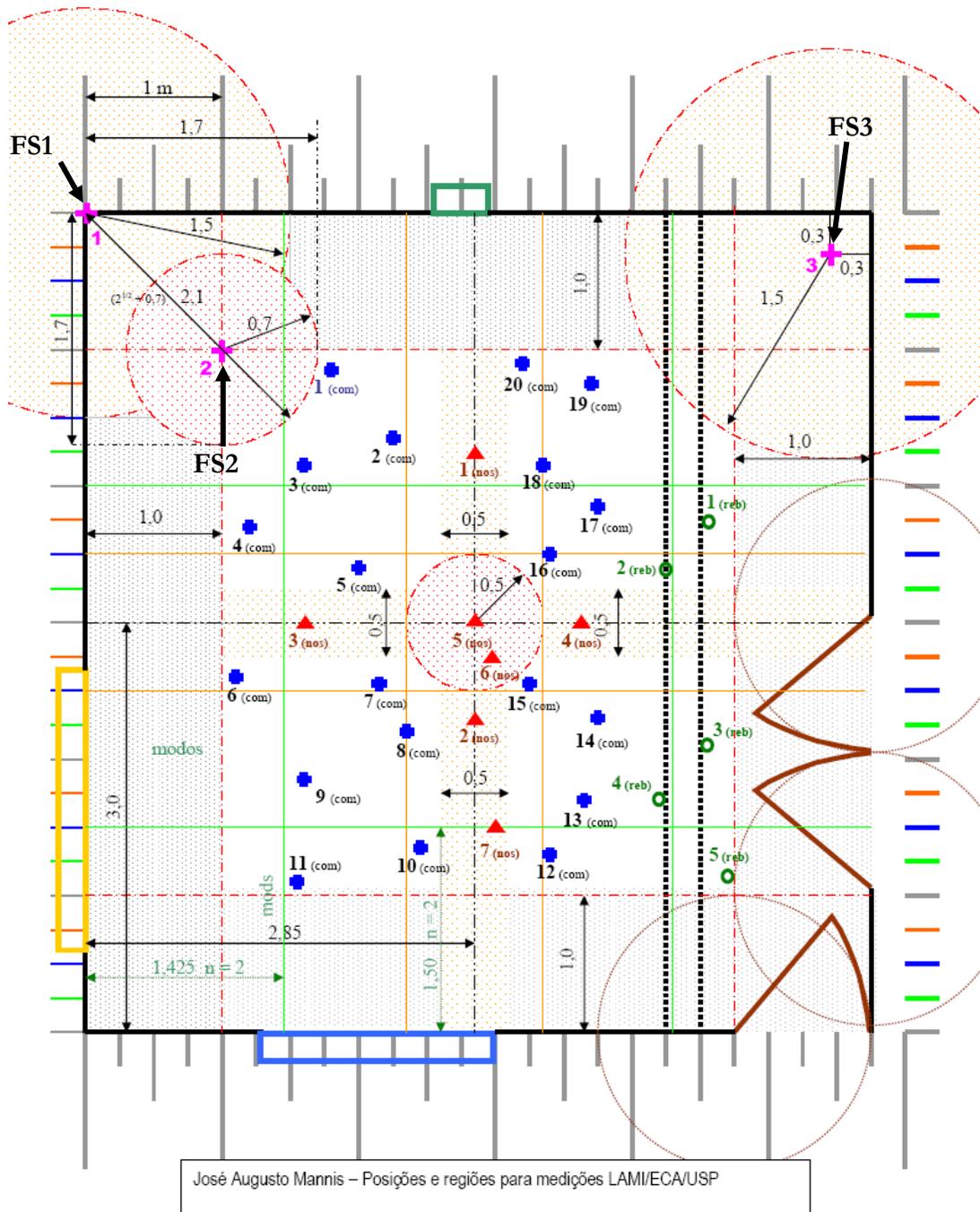


Figura 11.22 – Medições acústicas da *sala de captação de som* do Estúdio do LAMI/ECA/USP: pontos de posicionamento da Fonte Sonora FS1, FS2 e FS3 e do Microfone
 ● de 1 a 20 (com), ▲ de 1 a 7 (nos), ● de 1 a 5 (reb).

Para contemplar a Norma ISO 3382, à qual tivemos acesso recentemente, foram descartadas medições que não se adequaram rigorosamente às exigências. Desta forma, os grupos de medições denominados *A*, *B*, *C*, *I* e *K*, foram descartados, pois a fonte sonora omnidirecional se encontrava a menos de 1m de alguma superfície reflexiva. Permaneceram os grupos *E*, *F* e *G*, sendo que do grupo *E* foram descartados os pontos de posicionamento do microfone 1, 3 e 4 por estarem a menos de 1,5m da fonte sonora. O grupo de posições *E* compreendeu pontos ordinários, *F*, pontos em prováveis ventres de pressão e *G*, pontos sob o rebaixamento do teto.

11.3.1.2 Resultados obtidos

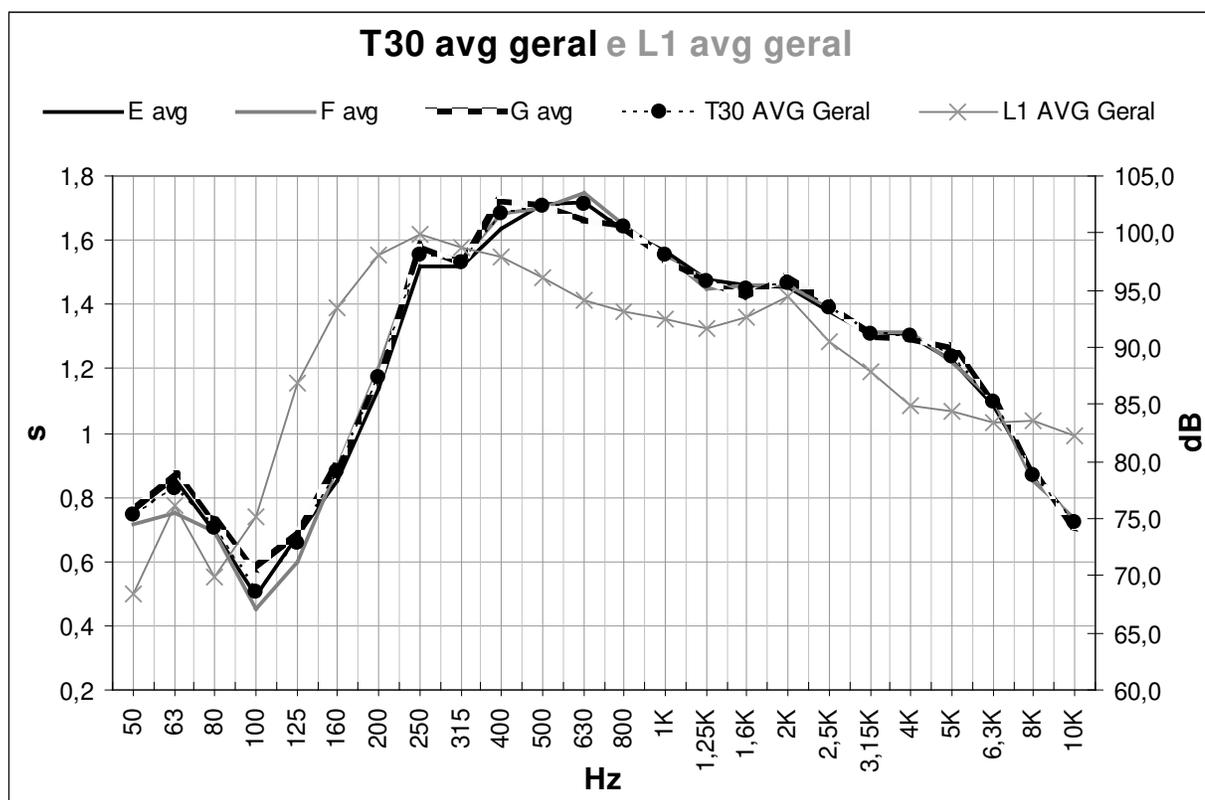


Figura 11.23 – Tempo de reverberação médio geral, Tempos de reverberação médios nas posições *E*, *F* e *G* e Nível de pressão sonora geral por 1/3 de oitava.

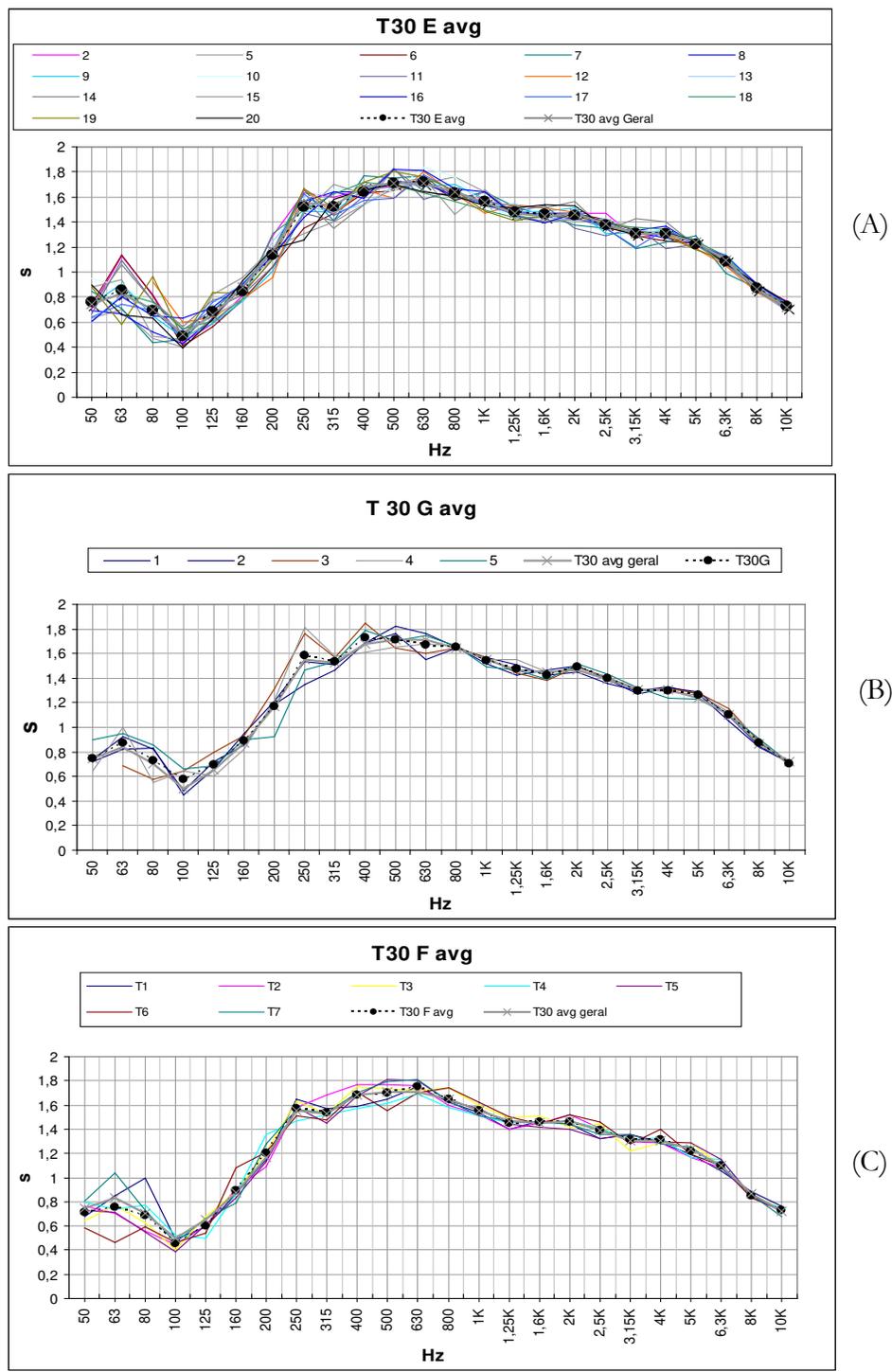


Figura 11.24 – Tempo de reverberação por 1/3 de oitava nos pontos E, F e G.

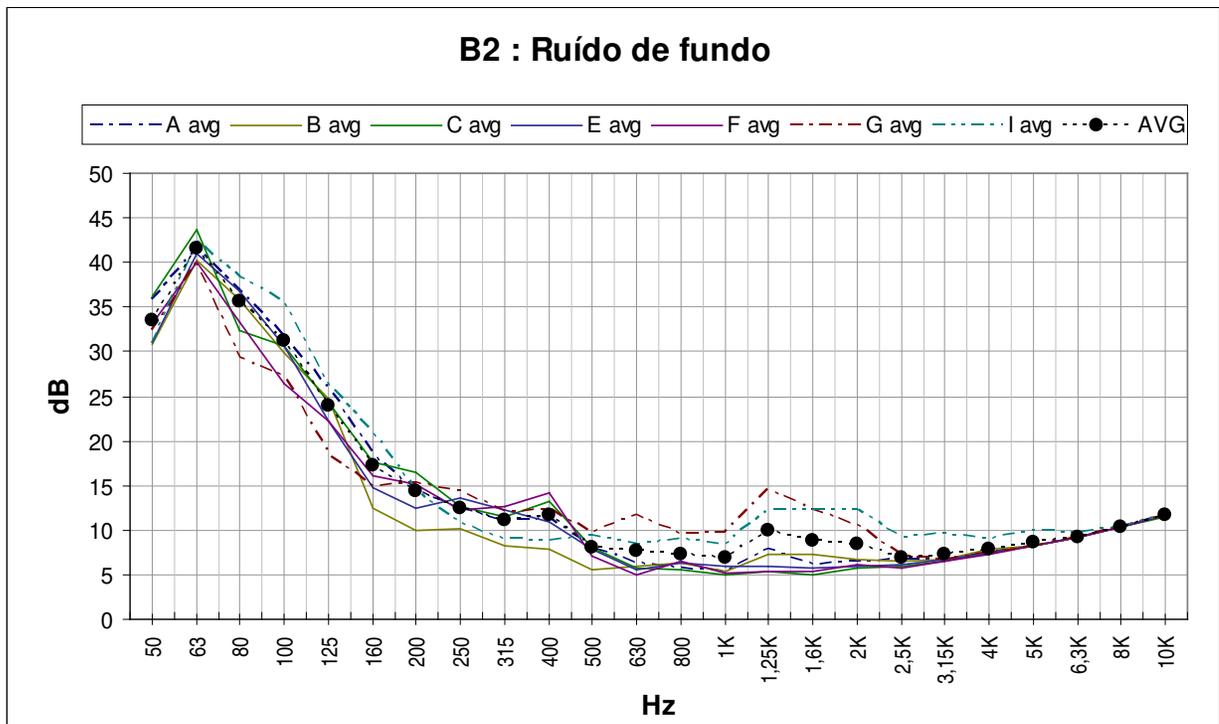


Figura 11.25 – Ruído de fundo no local logo antes do inicio das medições.

11.3.1.3 Análise dos dados e constatação dos problemas a serem resolvidos

Nível sonoro $L1$ por 1/3 de oitava com perdas significativas abaixo de 250Hz (Figura 11.23). Contudo, não se pode tirar conclusões sobre esses resultados do nível sonoro sem conhecer o diagrama da resposta em freqüência da fonte omnidirecional em campo livre, pois esta poderia eventualmente ter deficiências nos graves. Apesar disso, observamos que as perdas são acentuadas, constatando-se certa coerência entre os resultados obtidos de T_{30} quanto de $L1$, ambos com perdas progressivas nas bandas graves.

Proeminência na banda de freqüência de 2KHz tanto em $L1$ quanto no RT (Figura 11.23, Figura 11.24).

Deficiência de *tempo de reverberação* das bandas de 50 e 315Hz em relação às bandas de 400 a 4KHz.

O revestimento interno da sala é feito inteiramente com placas de Madeirite de 14mm de espessura. Nas laterais, a placa é seguida de uma camada de 12cm de lã de vidro de baixa densidade diretamente em contato com outra placa de Madeirite idêntica (sendo então um *sandwiche* de Madeirite com lã de vidro de baixa densidade), tendo em seguida uma camada de ar de 30cm antes de chegar à alvenaria. No teto, a placa de Madeirite aparente no interior do estúdio é seguida de uma camada de lã de vidro de baixa densidade e uma camada de ar, ambas fazendo 20 ou 30cm, tendo em seguida uma nova placa de Madeirite idêntica. Após isso, uma camada de ar de aproximadamente 30cm, chegando, então, à alvenaria.

Conforme visto no *item 3.4.3.1.1 Freqüência de ressonância em sistemas de membrana absorvedores de energia sonora (p. 139)* onde Bertoli (2000, Aula 3, p. 5), Kuttruff (2000 p.154-158), e Paul Sabine e Ramer (1948, p. 267) confirmam que as membranas são absorvedores eficientes em baixas freqüências, seja com ar por trás, material absorvente solto ou material absorvente fixado. Segundo Beranek (1962, p. 436-438; 1996, p. 432-435), o emprego de madeira pouco espessa, com menos de 1,5 in (3,8 cm) seguida de camada de ar, é a causa mais comum de perda de baixos nas salas modernas. Uma placa de madeira com aproximadamente 1 cm de espessura seguida de 7 a 10cm de camada de ar, pode absorver, em 125Hz, um quarto da energia da onda incidente a cada reflexão.

Segundo Bate e Pillow (1947, apud KINSLER, 1982, p. 319-320), o número médio de reflexões por segundo numa sala é dados por:

$$N = \frac{cS}{4V} \quad \text{Eq. 11-1}$$

Considerando a velocidade do som a 20°C 342,9m/s, as dimensões médias do espaço de gravação do Estúdio do LAMI como 5,70 x 6,00 x 3,14m, tendo assim $V=107\text{m}^3$ e $S=142\text{m}^2$, o Número de reflexões por segundo é 113.

Segundo informações recebidas, a espessura do Madeirite empregado no LAMI é de aproximadamente 14mm, ou seja, bem menos do que o mínimo especificado por Beranek logo acima. Por trás do Madeirite há ou camada de ar, ou lã de vidro de baixa densidade. Com isso temos um sistema de Membranas caracterizado para absorção dos graves. Supondo que a densidade do Madeirite 14 mm seja entre 7 e 11Kg/m² e considerando as distâncias de ar por trás entre 20 e 30cm, temos, aplicando a *Eq. 3-45 (p. 139)*, freqüências de ressonância abaixo de 50Hz.

Considerando a curva característica de uma membrana como sugerido por Kuttruff (2000) representada na *Figura 3.44* (p. 141), bem como os resultados obtidos por P. E. Sabine e Ramer (1948) (*Figura 3.42, Figura 3.43, p. 140*) a absorção pode chegar a uma oitava e meia acima da frequência de ressonância. Havendo, então, 113 reflexões por segundo nas placas de Madeirite, e a cada reflexão absorção de energia, há condições para que os sistemas formados de membranas estejam absorvendo grande parte da energia nas baixas frequências.

Observando a *Figura 11.26* vemos que os desvios das médias de cada região medida (E , F e G : $T_{30\ E\ Average}$, $T_{30\ F\ Average}$ e $T_{30\ G\ Average}$) em relação à média geral final ($T_{30\ Average\ Geral}$), apresentam oposições mais ou menos periódicas e se alternam de forma simétrica. Isso nos chama a atenção para eventuais influências de vibrações modais da sala, pois devido à mudança das posições do microfone, da região (com) para (reb), constatam-se nos dados diferenças (simétricas) nos tempos de caimento em uma mesma banda de frequência de uma região a outra.

Picos de desvio do $T_{30\ E\ Average}$, $T_{30\ F\ Average}$ e $T_{30\ G\ Average}$ em relação ao $T_{30\ Average\ Geral}$ observados na *Figura 11.26*:

- 63 – 125 – 315 – (500) – 1K – 8KHz (T_E)
- 200 – 630 – 1,6K – (6,3K)Hz (T_F)
- 63 – 100 – 250 – 400 – 1,25K – 2K – 5K – 8KHz (T_G)

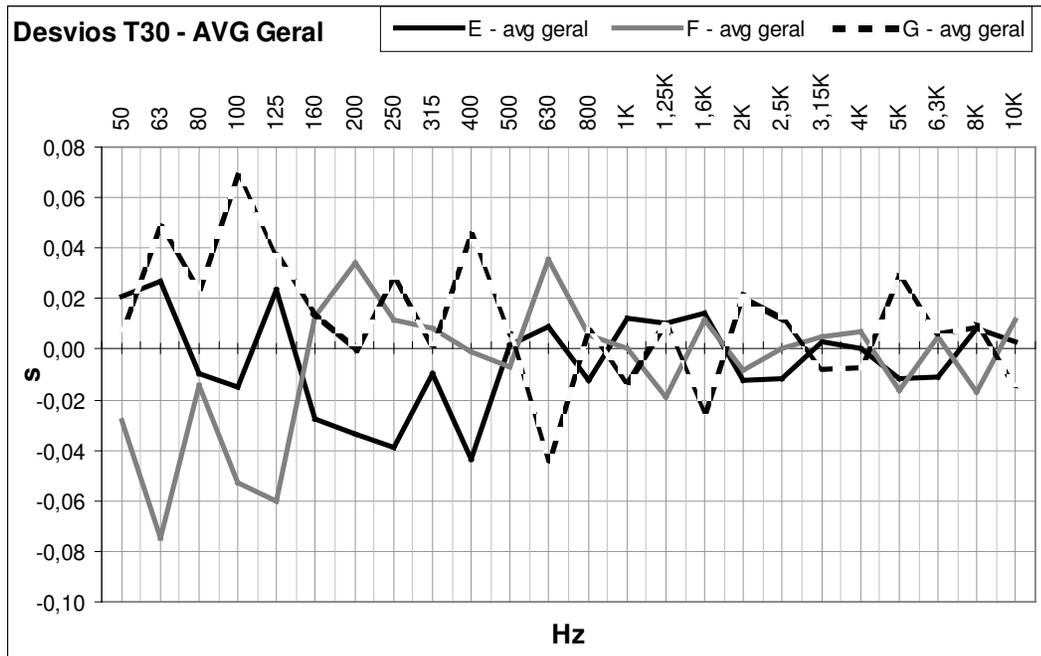


Figura 11.26 - Desvios do *tempo de reverberação médio* da cada grupo de posições (*E*, *F* e *G*) em relação ao *tempo de reverberação médio geral*. Como cada grupo possuía posições distintas, isso permitiu a observação de variações em função da mudança de posição dos microfones em locais de prováveis ventre de onda (com) – *E*; de prováveis ventres (nos) – *F*; e sob o rebaixamento (reb) – *G*.

De acordo com Davis (1987), nos casos de medições de *tempo de reverberação* numa pequena sala, o sinal captado pode ter mais a influência dos *modos normais* do que de uma suposta reverberação propriamente dita⁶⁰.

“To quote Ted Schultz (formerly of Bolt, Beranek and Newman): ‘In a large room, if one has a sound source whose power output is known, one can determine the total amount of absorption in the room by measuring the average pressure throughout the room. This total absorption can be used to calculate the reverberation time from the Sabine formula. This method fails badly in a small room, however, where a large part of spectrum of interest lies in a frequency range where the resonant modes of the room do not overlap but may be isolated... In this case the microphone, instead of responding to a random sound field (as required for the validity of the theory on which these methods depend), will delineate a transfer function of the room... It does not provide a valid measurement of the reverberation time in the room.’ ” (DAVIS, 1987, p. 211)

Recorrendo às proporções de Bolt, Beranek e Newman (*item 3.2.13.2, p. 100*) bem como ao *critério de Bonello (item 3.2.13.1, p. 97)* pode-se avaliar a potencial qualidade da sala pelas proporções que esta apresenta.

Dadas as dimensões equivalentes do LAMI acima expostas, obtém-se os resultados mostrados nas *Figura 11.27, Figura 11.28* .

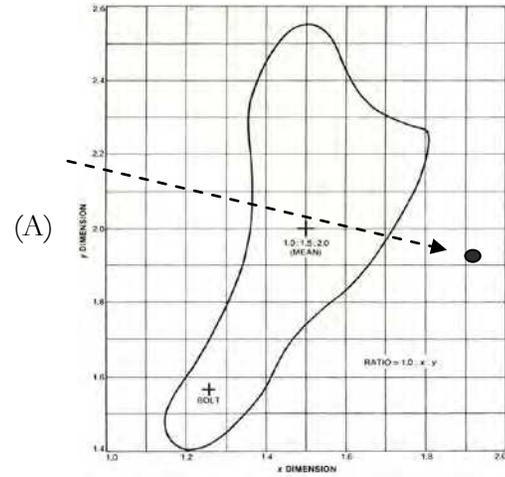
⁶⁰ Por isso o cálculo de coeficientes de absorção a partir de medições numa pequena, deduzindo-os através da fórmula de Sabine, não terá garantia de precisão, pois os *modos normais* da sala poderiam estar agindo durante a medição, influenciando o caimento da reverberação.

11.3.1.3.1 Proporções de Bolt, Beranek e Newman

$$L \times W \times H = 5,70 \times 6,00 \times 3,14$$

$$z/z : x/z : y/z$$

$$(1 : 1,82 : 1,91)$$



$$L \times W \times H = 4,90 \times 6,00 \times 3,14$$

$$z/z : x/z : y/z$$

$$(1 : 1,56 : 1,91)$$

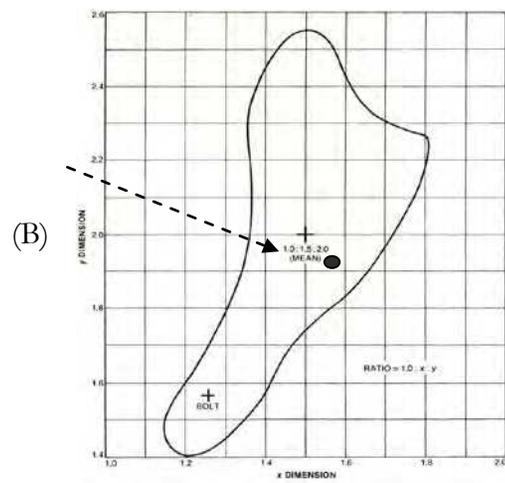
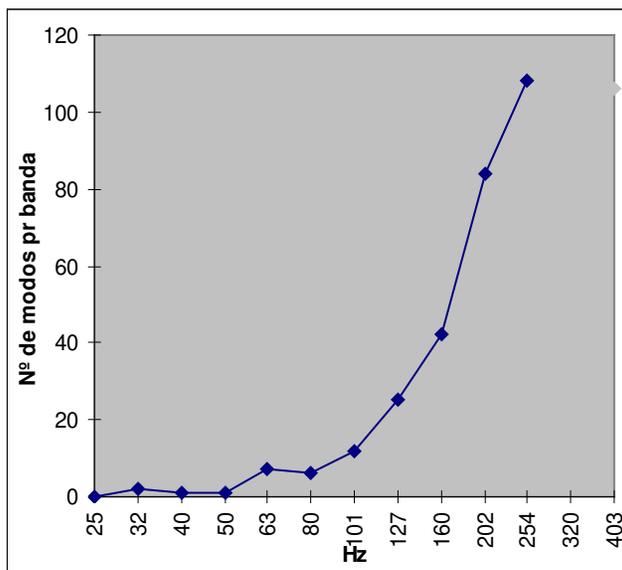


Figura 11.27 – Estúdio do LAMI. Resultados de análise pelo *diagrama de Bolt, Beranek e Newman*: (A) não adequadas; (B) adequadas.

11.3.1.3.2 Critério de Bonello

$$L \times W \times H = 5,70 \times 6,00 \times 3,14$$

(A)



$$L \times W \times H = 4,90 \times 6,00 \times 3,14$$

(B)

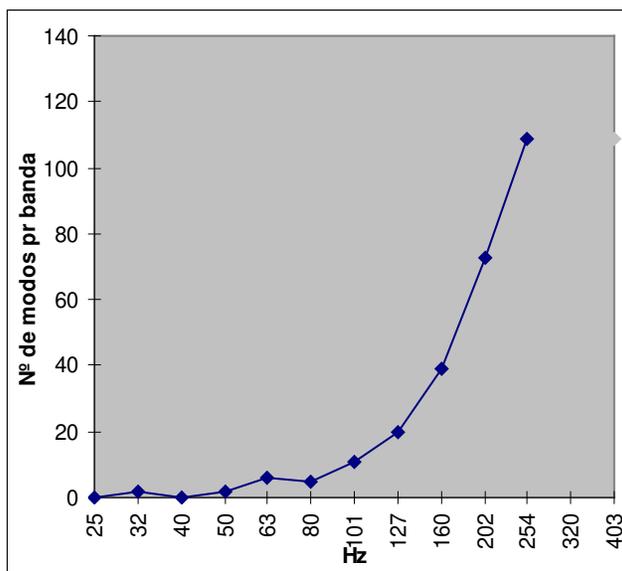


Figura 11.28 – Estúdio do LAMI. Análise pelo *critério de Bonello* das dimensões equivalentes: (A) 5,7 x 6,0 x 3,14 m. ⁶¹ (B) 4,9 x 6,0 x 3,14m. As frequências de 63Hz e de 32Hz em proeminência, indicam irregularidade na acumulação de *modos normais* e são as mesmas frequências que se destacaram na planilha de cálculo de parciais dados.

⁶¹ $L \times W \times H$: a altura H resultante 3,14m é a altura equivalente considerando a média ponderada do pé direito de 3,25m numa extensão $L_A = 4,09m$ e o pé direito de 2,85m numa extensão $L_B = 1,61m$ ($L_A + L_B = L = 5,7m$)

Devido unicamente às dimensões da sala, observa-se um acúmulo de *modos normais* em torno de 60Hz e 30Hz.

O reforço em 60Hz significa que há uma preponderância de estacionárias com percurso da onda numa distância de aproximadamente 2,8 metros ($\lambda/2$), atraso de ± 8 ms em realimentação como um *flutter echo/comb filter* (Cf. item 3.4.3.4, p. 142), o que musicalmente implica em um favorecimento (por reforço de fase) de alturas no espectro de *Si bemol 1/4 de tom acima* (60, 120, 180, 240Hz etc.) (Figura 11.29) e em uma atenuação (por cancelamento de fase) do espectro de harmônicos ímpares de *Si bemol 1/4 de tom* oitava abaixo do anterior (30, 90, 150, 210Hz etc.) (Cf. Figura 11.30). A influência do reforço em 30Hz será exatamente uma oitava abaixo (Cf. Figura 11.31 e Figura 11.32). As notas comuns⁶² entre ambos os espectros de reforço serão duplamente acentuadas, como 120, 180, 240Hz, ou seja, todo o espectro de reforço de 60Hz. A resposta do *tempo de reverberação* nessas bandas de frequência torna-se, em relação às bandas de frequências vizinhas, proporcionalmente irregular, prejudicando a execução musical por falta de homogeneidade na resposta da sala e eventuais colorações indesejadas.

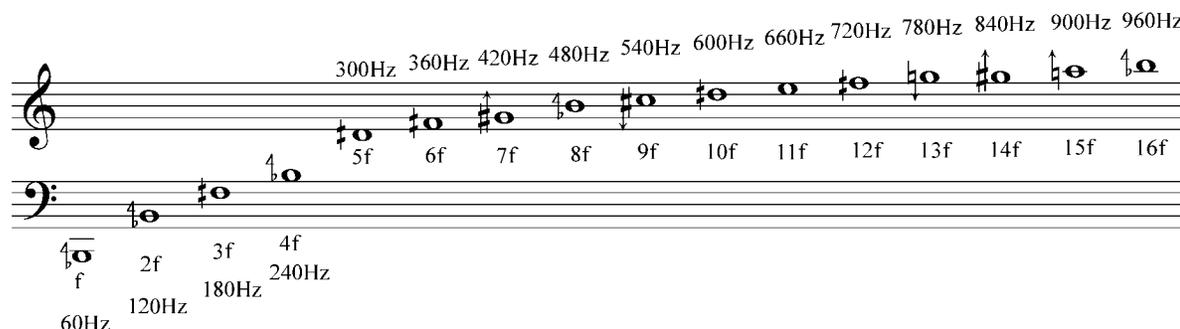


Figura 11.29 – Alturas reforçadas pelo *modo axial* de 60Hz.



Figura 11.30 - Alturas inibidas pelo *modo axial* de 60Hz.

⁶² Não há notas comuns entre ambos os espectros de inibição.

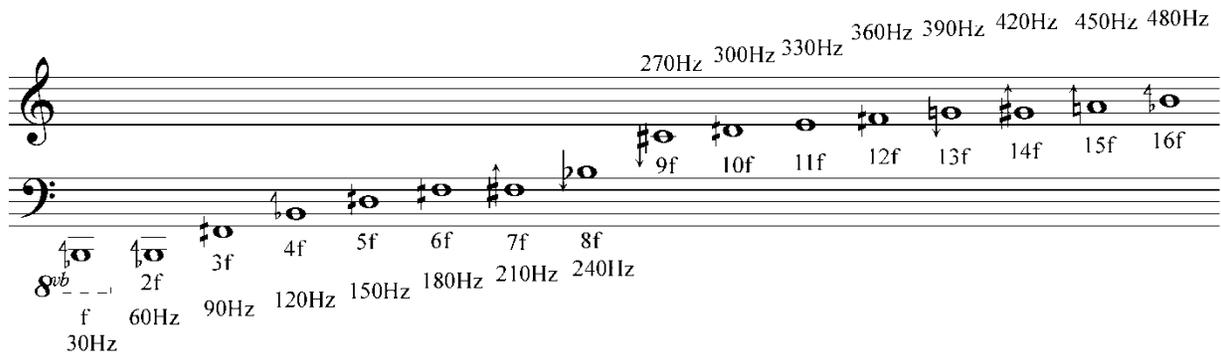


Figura 11.31 – Alturas reforçadas pelo *modo axial* de 30Hz.

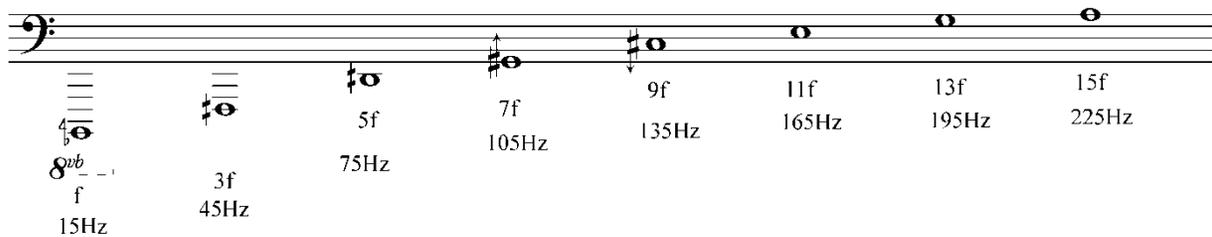


Figura 11.32 – Alturas inibidas pelo *modo axial* de 30Hz.

Em todas as análises, destacam-se as freqüências de 30 e 60Hz como proeminências resultantes de *modos normais* da sala.

Tratamos assim de problemas referentes ao *nível sonoro*, sobretudo perdas significativas abaixo de 250Hz; ao *tempo de reverberação*, com desequilíbrio entre graves deficientes *versus* médios e agudos (400 a 4KHz); à *absorção* de freqüências baixas por *membranas* constituídas de placas de madeirite pouco espessas revestindo a totalidade do espaço interno; e à ação negativa dos *modos normais* da sala.

11.3.2 Condições do local, calibrações e procedimentos técnicos durante o processo de medição

29/08/00				Calibração Investigator	
	hora	T	Umid. Real.	last	initial
início	10:50	20,2 °C	63%	0,01dB	- 0,01dB
	12:00			0,01dB	0,00dB
término	17:15	21,2 °C	60%	0,05dB	0,05dB

Amplificador	ch L (dB)	ch R (dB)	Clipping limiter	Gain +23dB	Link A-B	Ph. Rev. B
	-10	-10	in	off	in	in

Investigator	
Range	30,9 - 120,9dB
Job:	New
Standard:	ISO
Task:	Airbone
Bandwith:	1/3 oct
Frequency	
Start:	50Hz
Stop:	10KHz
Escape Time:	12s
Build-up Time:	04s
Auto store:	On
Backgr. Coord.:	On
Partition:	A
Label:	-
Aux 1:	Generators
Aux 2:	off
Digital:	off
Avg. Time [m:s]	00:40
Generator:	Internal
Noise:	Pink
Level [re. 1V]:	- 3dB
Nº of decays:	03
Decay Time:	03s
Input:	Microphone
Serial Nº:	2160912
Pol. Voltage:	0V
S. I. corr.:	Random

11.3.3 *Detalhamento das bandas de 1/3 de oitava empregadas*

	Hz
1	50
2	63
3	80
4	100
5	125
6	160
7	200
8	250
9	315
10	400
11	500
12	630
13	800
14	1K
15	1,25K
16	1,6K
17	2K
18	2,5K
19	3,15K
20	4K
21	5K
22	6,3K
23	8K
24	10K

11.3.4 Altura da fonte e do microfone

Fonte	
Pos. 1	solo
Pos. 2	$h = 1,30\text{m}$
Pos. 3	$h = 1,30\text{m}$

Microfone	
Todas as pos.	$h = 1,22\text{m}$

11.3.5 Detalhamento da planificação das medidas

Partition	Posição Fonte	Posições			Function	id	pos.	obs.
		Comuns (com)	Nós (nos)	Rebaixo (reb)				
A	1	X			L1	1 a 3	7, 13, 16	
A	1	X		X	B2	1 a 4	1, 11, 3, 16	
A	1	X			T2	1 a 20	1 a 20	
B	1		X		L1	1 a 3	1, 5, 4	
B	1		X		B2	1 a 2	5, 7	
B	1		X		T2	1 a 7	1 a 7	
C	1			X	L1	1 a 2	1, 3	
C	1			X	B2	1 a 2	1, 3	
C	1			X	T2	1 a 5	1 a 5	
E	2	X			L1	1 a 3	7, 13, 16	
E	2	X			B2	1	16	
E	2	X			T2	1 a 20	1 a 20	
F	2		X		L1	1 a 3	1, 5, 4	
F	2		X		B2	1	5	
F	2		X		T2	1 a 7	1 a 7	
G	2			X	L1	1 a 2	1, 3	
G	2			X	B2	1 a 2	1, 3	Vazamento grupo de câmara no auditório
G	2			X	T2	1 a 5	1 a 5	
I	3	X			L1	1 a 3	7, 13, 16	
I	3	X		X	B2	1	16	Vazamento grupo de câmara no auditório
I	3	X			T2	1 a 15	1 a 15	
K	3			X	T2	1	3	

11.3.6 Regiões e posições da fonte sonora esférica B&K

Para avaliar a reação da sala em função da posição da captação sonora e da excitação acústica, foram definidas 3 regiões de captação e 3 posições da fonte, no caso o alto-falante omnidirecional acoplado ao *Investigator* (Bruel & Kjaer).

11.3.6.1 Regiões

- Comum [**com**]: pontos de captação na área central, fugindo dos ventres de pressão pontos de 1 a 20 representados pela cor azul no plano de medidas
- Nos [**nos**]: pontos de captação sobre os ventres de pressão e ligeiramente afastados.pontos de 1 a 7 representados pela cor vermelha no plano de medidas
- Rebaixo [**reb**]: pontos de captação sob o rebaixamento do teto à direita.pontos de 1 a 5 representados pela cor verde no plano de medidas

11.3.6.2 Posições da fonte

- 1: no canto inferior esquerdo ao fundo ($Q = 8$)
- 2: no mesmo canto, porém a aproximadamente 1m das paredes e a 1,30m do piso.
- 3: no canto direito ao fundo (sob o rebaixamento) a 30cm das paredes e a 1,30m do piso.

11.3.6.3 Ordenação das partições avaliadas no *Investigator*

Partição	Posição fonte	Região de captação
A	1	com
B	1	nos
C	1	reb
E	2	com
F	2	nos
G	2	reb
I	3	com
K	3	reb

11.3.7 Abreviaturas empregadas no sistema do equipamento de medição

[L1]

Nível de pressão sonora equivalente por banda em 1/3 oitava

$$L_{eq_i} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_i^2(t)}{p_0^2} dt$$

$T = \text{average time} = 40\text{s}$, conforme *set up* do equipamento.

$i = 1$ a 24 (bandas em 1/3 oitava)

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\text{Pa}$ (pressão sonora de referência)

$p_i(t)$ = pressão instantânea em função do tempo

[RT60] ou [T2] ou [T30] ou [T20]

Tempo de reverberação por banda em 1/3 oitava

11.3.8 Condições das medições

Condições do local:

- Temperatura: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (exigido: $\pm 1^{\circ}\text{C}$)
- Umidade Relativa: $\pm 3\%$ (exigido: $\pm 5\%$)
- Local desocupado

Equipamento:

- Fonte sonora omnidirecional
(exigido: o mais omnidirecional possível)
- Microfone omnidirecional (exigido: omnidirecional)

Disposição do Microfone:

- $h = 1,22\text{m}$ do solo (exigido: $1,20\text{m}$ – altura dos ouvidos de uma pessoa sentada)
- $d_{\min} = 1,0\text{m}$ distância mínima de qualquer superfície reflexiva (exigido: $1,0\text{m}$)

Disposição da fonte sonora:

- $h = 1,30\text{m}$ do solo. (recomendado: $1,50\text{m}$)

Distância Mínima entre a fonte sonora e microfone:

- $d_{\min\ sm} = 1,50\text{m}$ (exigido: $1,50\text{m}$) Número de medições em cada posição do microfone:
- 3 medições (exigido: min. 3 medições)

Número de posições:

- 29 posições (exigido: min. 18 posições)

Relação da potência da fonte sonora em relação ao ruído de fundo:

- Fonte sonora: $30,9 - 120,9\text{dB}$
- Ruído de fundo: $5,3 - 43,7\text{dB}$
(exigido: min. 45dB sinal/ruído)

Sinal de excitação:

- Ruídos por bandas de frequência interrompidos.

Manutenção do sinal para excitação:

- $t = 4\text{s}$ (exigido: min. $RT_{60\text{AVG}}/2 = 0,8\text{s}$)

Bandas de frequência de análise:

- 1/3 de oitava
(50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1K, 1,25K, 1,6K, 2K, 2,5K, 3,15K, 4K, 5K, 6,3K, 8K, 10KHz)
(exigido: 1/3 oitava 100–5KHz ou 1/1 oitava 125-4KHz)

Antes das medições o equipamento foi calibrado no local.

Digitally signed by Prof. Dr. José Augusto Mannis
DN: cn=Prof. Dr. José Augusto Mannis, o=Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, ou=Depto. de Música, Instituto de Artes, email=jamannis@uol.com.br, c=BR
Date: 2011.08.28 21:22:14 -03'00'

