



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de
espaços: métodos e desenvolvimentos**

Christian dos Santos

**Campinas
2011**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

Christian dos Santos

**Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de
espaços: métodos e desenvolvimentos**

Tese apresentada à comissão de
pós-graduação da Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo como parte dos
quesitos para obtenção do título
de Doutor na área de
concentração de Arquitetura e
Construção.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Stelamaris Rolla Bertoli

**Campinas
2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sa59i Santos, Christian dos
Influência do espalhamento acústico na percepção
auditiva de espaços: métodos e desenvolvimentos /
Christian dos Santos. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Simulação. 2. Espalhamento. 3. Acústica. I.
Bertoli, Stelamaris Rolla. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Acoustic scattering coefficient influence in the spaces auditive
perception: methods and developments

Palavras-chave em Inglês: Simulation, Scattering, Acoustic

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Lucila Chebel Labaki, Márcio Henrique de Avelar Gomes,
José Augusto Mannis, Gustavo da Silva Vieira de Melo

Data da defesa: 25/02/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de
espaços: métodos e desenvolvimentos**

Christian dos Santos

Tese de Doutorado aprovada pela banca examinadora construída por:



Prof.^a. Dr.^a Stelamaris Rolla Bertoli

Presidente e Orientadora FEC-UNICAMP



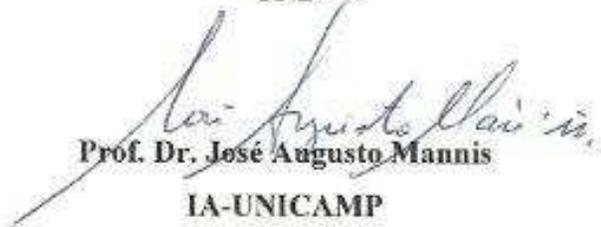
Prof.^a. Dr.^a Lucila Chebel Labaki

FEC-UNICAMP



Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

UNB



Prof. Dr. José Augusto Mannis

IA-UNICAMP



Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo

UFPA

Aos meus primeiros professores,

Valdomiro e Romilda.

A minha querida família,

Amanda e André.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todos os caminhos trilhados e por tudo que aprendi; à minha esposa Amanda por toda a ajuda, apoio e experiência nesta caminhada; ao meu filho André por se tornar o principal motivo de cada passo dado; aos meus pais, Valdomiro e Romilda, pelo exemplo e apoio dados durante este trabalho; ao meu irmão Danilo e minha cunhada Kelly por todo o apoio. Ao apoio da minha nova família, Pedro, Marlene, Kathy e Rafa. À Prof^a. Dr^a. Stelamaris Rolla Bertoli por mais uma orientação. À amiga Dra. Maria de Fátima Ferreira Neto pelas conversas qualitativas e material emprestado. À amiga Dra. Maria Lúcia Gondim da Rosa Oiticica pelo auxílio com os difusores em escala. Agradeço aos Srs. Obadias e Daniel pelo auxílio com os aparelhos do Laboratório de Conforto da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. Agradeço ao Prof. Dr. Marcio Avelar pelas conversas e esclarecimentos. Agradeço ao Prof. Dr. José Augusto Mannis pela ajuda com difusores e gravações anecóicas e ao Prof. Nelson Pinton pelos seus estudantes que atuaram como júri voluntário neste trabalho. Ao Prof. Esdras Rodrigues pela ajuda com seu aluno violinista para as gravações anecóicas. Aos professores Prof. Dr. José Maria Campos dos Santos e Prof. Dr. José Roberto de França Arruda da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp por permitirem as gravações na câmara anecóica. À amiga Fabiana Ramires pelo interesse em espalhamento e todos os trabalhos e dúvidas a respeito do tema. Agradeço aos meus tios Aparecida e Joel, e primos Júnior e Rose pela maravilhosa estadia em Hortolândia durante a realização deste trabalho. A todos os amigos e voluntários que fizeram este trabalho possível. À CAPES pela bolsa de estudo concedida. Ao Departamento de Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp pelas facilidades oferecidas. A todos que de uma forma ou de outra me apoiaram nesta caminhada.

RESUMO

SANTOS, Christian. *Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de espaços: métodos e desenvolvimento*. Campinas, 2011. 179 fls. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

A ambientação acústica de salas é um tópico muito importante nos espaços contemporâneos, principalmente quando considerada a tendência de utilização para várias finalidades. A adaptação do ambiente de acordo com o uso em questão é realizada a partir da alteração do direcionamento da energia sonora dentro deste ambiente. Esta redistribuição pode seguir certas linhas de acordo com o projeto ou da utilização do espaço como música, fala e palestras. Parâmetros que representam quantitativamente a percepção sonora de um ambiente podem ser obtidos pela resposta impulsiva deste ambiente. Estes parâmetros descrevem um certo “panorama acústico”, que demonstra as características da sala para a percepção auditiva. A partir das respostas impulsivas de um ambiente e com a técnica de auralização de sinais é possível obter um panorama acústico a partir de um sinal sem impressão espacial sonora. Esta simulação é possível utilizando-se, dentre outros parâmetros, o coeficiente de espalhamento das superfícies determinado a partir da norma ISO 17497:2004. O efeito do coeficiente de espalhamento obtido experimentalmente e utilizado em simulações computacionais para fins de auralização é o objeto de estudo deste trabalho. Para a avaliação deste efeito foram realizadas medições de coeficiente de espalhamento de superfícies utilizadas em modelo computacional e superfícies difusoras. Estes valores foram utilizados em simulações de salas para criar panoramas de estudo. Com a auralização de sinais com estes panoramas um teste de júri foi realizado, observando condições de alteração de localização do espalhamento e de quantidade de espalhamento em uma sala virtual projetada para música. Os efeitos destas alterações nos atributos de Clareza, Lateralização, Reverberância, Razão de Baixos e Brilho foram analisados em uma sala modelada para uma boa audição de música. Os coeficientes de espalhamento produzem uma percepção maior da Clareza quando os difusores estão próximos da fonte sonora ou do receptor. Quando analisado o aumento do valor do coeficiente de espalhamento em paredes laterais entre fonte e receptor, estes fatores não produziram um resultado definido. A reverberância é percebida quando colocadas superfícies difusoras nas paredes entre fonte e receptor e quando colocadas superfícies difusoras próximas ao receptor. O fator de Razão de Graves não produziu efeito perceptivo quando os difusores foram colocados próximos à fonte e ao receptor, mas observou-se uma certa percepção deste parâmetro quando se aumentou o valor do espalhamento para as laterais entre o receptor e a fonte sonora. A lateralização é mais percebida quando colocadas superfícies difusoras entre fonte e receptor, porém com o aumento do valor do espalhamento ela passa a ficar pouco percebida. A partir dos atributos analisados pode-se verificar que o coeficiente de espalhamento cria um aumento da energia das primeiras reflexões que são percebidas dependendo da posição e do parâmetro que se deseja reforçar. Quando o coeficiente de espalhamento nas paredes laterais entre ouvinte e fonte sonora foi aumentado, a auralização criou uma sensação reverberante maior, o que diminuiu a percepção de certos atributos subjetivos, como a Lateralização, a Clareza e a Reverberância.

Palavras-chave: Simulação, Espalhamento, Auralização.

ABSTRACT

SANTOS, Christian. *Acoustic scattering coefficient influence in the spaces auditive perception: method and development*. Campinas, 2011, 179 l. Doctorade Thesis – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

The Study of room acoustics characteristics is an important topic in the contemporary multiuse spaces. The acoustical perception can be changed with the redistribution of the acoustic energy. This redistribution can follow some necessity of the project or by the use. With the Impulsive Response measurement of a space is possible to quantify some acoustics parameters that are responsible for the acoustic perception in this space. These parameters can create a kind of “acoustic panorama” that shows the room characteristics for the acoustic subject perception. With these panoramas and the auralization technique is possible to simulate a room impression. For this simulation the scattering coefficient determined by ISO 17497:2004 is used. This work has the objective of analyze the effect of the scattering coefficient obtained experimentally in the subject perception using subjective parameters for room quality classification. For this effect evaluation some scattering coefficient determination was done for some surfaces. Some panoramas were changed according to the scattering coefficient measured and these panoramas were showed for the subjects to evaluate their response of these variations. The influence of the scattering coefficient in the subject perception was studied and the variations were measure using the room quality parameters. The subject’s answers showed some variations on the perception and the results showed influence at the parameters of Clarity, Lateralization, Reverberance, Bass Ratio and Brilliance. The scattering coefficient increase the sensation of Clarity with some of then putted near the source and near the listener. With the increase of the scattering coefficient at the side walls in the room the listeners lose the Clarity sensation. The reverberance is perceived when are scattering coefficients at the side walls between source and receiver and near the receiver. The Bass Ratio was unperceived when the scattering coefficient was placed near the source and the receiver, but it was perceived when the scattering coefficient was placed between the source and receiver on the side walls. The lateralization was perceived when the scattering coefficient was placed between the source and receiver on the side walls, but if there is an increase of these scattering coefficients a decrease of the lateralization perception is perceived. Based on the analyzed parameters the scattering coefficients increase the energy in the early part of the Impulsive Response it depends on the place and the perceived parameter that was verified. With the increase of the scattering coefficient on the side walls between the source and the receiver the auralization decrease the sensation of some parameters like Clarity, Lateralization and Reverberance.

Keywords: Simulation, Scattering, Auralization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Esquema da distribuição da energia de uma onda que atinge uma superfície.	28
Figura 2.2.	Reflexão sonora especular.	29
Figura 2.3.	Reflexão sonora difusa: a) visão macroscópica; b) visão microscópica.	30
Figura 2.4.	Casos de difração sonora: a) obstáculo menos que o comprimento de onda; b) obstáculo maior que o comprimento de onda; c) vista lateral de uma barreira.	31
Figura 2.5.	Construção de Huygens para uma onda refletida por uma superfície plana em uma fonte de incidência normal. a) Discretização de fontes na superfície; b) representação das frentes de onda formadas.	32
Figura 2.6.	Construção de Huygen para uma onda plana refletida por uma superfície cilíndrica: a) discretização de fontes na superfície; b)representação das frentes de onda formadas.	33
Figura 2.7.	Visualização da propagação sonora: a) propagação sonora visualizada para uma sala retangular; b) formato de leque ; c) formato elíptico.	34
Figura 2.8.	Visualização da propagação sonora: a) propagação sonora visualizada para uma sala retangular; b) formato de leque; c) formato elíptico. Com superfícies difusas.	35
Figura 2.9.	Propagação sonora visualizada no tempo para diferentes tipos de superfícies.	36
Figura 2.10.	Diagrama esquemático representativo do tempo de reverberação.	38
Figura 2.11.	Representação das respostas espaciais e temporais de tratamentos de superfícies dependendo de suas características.	41
Figura 2.12.	Representação da difusão de uma superfície difusora irregular.	42
Figura 2.13.	Arranjos experimentais para realização de determinação do coeficiente de difusão: (a) goniômetro em duas dimensões; (b) goniômetro em três dimensões.	43
Figura 2.14.	Comportamento da reflexão da energia de dois difusores com construções diferentes a partir da mesma direção da energia incidente: a) reflexão na direção longitudinal; b) reflexão em várias direções.	44

Figura 2.15.	Digrama esquemático das componentes da energia espalhada sobre uma superfície rugosa.	45
Figura 2.16.	Pulsos refletidos para diferentes orientações de amostra.	46
Figura 2.17.	Comparação entre uma resposta impulsiva para uma orientação (branco) e para a soma de respostas para várias orientações (preto).	46
Figura 2.18.	Posicionamento de aparato de medição para realização de medição para determinação do coeficiente de espalhamento.	48
Figura 2.19.	Diferentes valores de EDT para um mesmo valor de tempo de reverberação.	52
Figura 2.20.	Diferentes valores de Clareza: a) um valor baixo de clareza para um decaimento linear; b) um valor alto de clareza para um decaimento linear.	54
Figura 2.21.	Exemplos de diferentes ITDGs: a) ambiente com baixo intimismo; b) ambiente com alta intimidade.	55
Figura 3.1.	Diagrama esquemático para se obter uma resposta em frequência de um sistema a partir de uma excitação impulsiva, neste caso exemplificado pela planta de um auditório.	60
Figura 3.2.	Diagrama elétrico de medição de resposta em frequência com excitação por impulso.	61
Figura 3.3.	Diagrama elétrico de medição de resposta em frequência com excitação por MLS com pré-ênfase.	62
Figura 3.4.	Diagrama elétrico de medição de resposta impulsiva com excitação por varredura.	63
Figura 3.5.	Diagrama esquemático do método de traçado de raios com gráfico representativo da energia de cada reflexão que chega ao receptor.	65
Figura 3.6.	Problemas decorrentes do algoritmo do método de traçado de raios: a) problema das múltiplas detecções de uma mesma trajetória; b) problema de detecção inválida..	66
Figura 3.7.	Imagem de uma fonte segundo método de fontes virtuais.	68
Figura 3.8.	Ordem das reflexões do método de fontes virtuais.	69
Figura 3.9.	Esquema de reflexão do método de traçado de pirâmides quando o feixe original encontra uma superfície.	71
Figura 3.10.	a) Esquema de traçado de pirâmides; b) Representação espacial. Fonte: Camilo e	72

	Tenenbaum (2006).	
Figura 3.11.	Limitação do método de traçado de pirâmides, onde o feixe produzido por F_{12} é representado como único e sem reflexão da parede 4.	72
Figura 3.12.	Diagrama da técnica de transição de energia.	73
Figura 3.13.	Discretização de um volume segundo método dos elementos finitos.	74
Figura 3.14.	Convolução do sinal da fonte $s(t)$ com o filtro resposta impulsiva $f(t)$ para obter o sinal de recepção $g(t)$. Adaptado de: Vorländer (2008).	78
Figura 3.15.	Fenômeno de <i>aliasing</i> de um sinal.	79
Figura 3.16.	Esquema de realização de uma convolução entre dois sinais.	81
Figura 3.17.	Técnicas de reprodução de sinal para Auralização. Adaptado de: Everest, (2001).	84
Figura 4.1.	Câmara reverberante em escala com equipamentos de medição.	89
Figura 4.2.	Reprodutores sonoros utilizados nos ensaios.	90
Figura 4.3.	Amostra para ensaio de determinação do coeficiente de espalhamento.	91
Figura 4.4.	Preparação de amostra quadrada para realização de ensaio de determinação de coeficiente de espalhamento. a) Forma incorreta; b) forma correta. Adaptado de: Cox e D'Antonio (2004).	92
Figura 4.5.	a) Representação esquemática do distanciamento mínimo entre amostra e paredes da câmara; b) representação de profundidade estrutural da amostra.	93
Figura 4.6.	Planta esquemática da câmara reverberante em escala mostrando o posicionamento de fonte e microfone.	94
Figura 4.7.	Exemplo de teatro modelado segundo programa computacional E.A.S.E.	95
Figura 4.8.	a) Foto do auditório da ADUNICAMP; b) modelo computacional do auditório simulado no E.A.S.E.	96
Figura 4.9.	Posicionamento do violinista: a) posicionamento do microfone de gravação em relação ao violinista dentro da câmara anecóica da FEM-Unicamp. b) Gráfico de diretividade do violino em relação ao violinista.	99
Figura 4.10.	Sinais gravados em câmara anecóica com diferentes técnicas de execução: a) tocado pausadamente e suave; b) tocado com mais velocidade e ataque; c) tocado em <i>pizzicato</i> .	100
Figura 4.11.	Plantas de alocação dos difusores na sala de trabalho: a) Condição 1 – Placas com difusores QRD colocadas nas paredes próximas e atrás da fonte sonora. b)	101

	Condição 2 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes próximas e atrás do receptor. c) Condição 3 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes laterais da sala. d) Condição 4 – Placas com difusores QRD 2D colocadas nas paredes laterais da sala.	
Figura 4.12.	Exemplo de função de transferência relacionada à cabeça HRTF. a) Respostas impulsivas referentes a cada ouvido. b) Balão representativo da função de transferência relacionada à cabeça.	103
Figura 4.13	Comparativo da resposta em frequência dos fones de ouvido utilizados em audiômetros (TDH 50p) e o utilizado no sistema para auralização e triagem auditiva (HD 515).	105
Figura 4.14.	Locais onde foram realizados os testes de júri: a) sala 3 do laboratório de conforto ambiental FEC; b) estúdio de ensaio do Instituto de Artes da Unicamp; c) sala de ensaios do Instituto de Artes da Unicamp; d) posição do ouvinte durante o teste.	106
Figura 4.15.	Exemplo de questionário comparativo elaborado por Rioux (2000). a) Teste comparativo tipo ABX com graduação de proximidade de extremos. b) Teste pareado entre duas amostras.	107
Figura 4.16.	Exemplo de questionário comparativo elaborado por Lokki e Pulkki (2002).	107
Figura 4.17.	Questão elaborada para verificação dos limites de percepção do ouvinte.	108
Figura 4.18.	Questão elaborada para teste de verificação subjetiva de valores auralizados com alteração do coeficiente de espalhamento.	108
Figura 5.1.	Resultados da diferença calculada de medições de Nível de Pressão sonora interna e externamente à câmara em escala 1:5.	112
Figura 5.2.	Tempo de reverberação medido para câmara em escala 1:5 vazia.	107
Figura 5.3.	Aspecto final da câmara reverberante em escala com equipamentos para medição do coeficiente de espalhamento.	113
Figura 5.4.	Amostra de semi-esferas utilizada para medição de coeficiente de espalhamento.	114
Figura 5.5.	Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento para amostras medidas e obtidas em publicação de Jeon <i>et al</i> (2004).	115
Figura 5.6.	a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora. b) Foto do material medido dentro da câmara.	116

Figura 5.7.	a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora. b) Foto do material medido dentro da câmara.	117
Figura 5.8.	a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora. b) Esquema de montagem dos difusores QRDs na mesa de ensaios.	118
Figura 5.9.	a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora. b) Esquema de montagem dos difusores QRDs transversos na mesa de ensaios.	118
Figura 5.10.	a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora. b) Esquema de montagem do material QRD 2D na mesa de ensaios.	119
Figura 5.11.	Modelo computacional do auditório da ADUNICAMP criado com as características acústicas das superfícies indicadas.	120
Figura 5.12.	Pontos de microfones e fontes da medição realizada no auditório da ADUNICAMP.	121
Figura 5.13.	Comparativo entre valores de Tempos de Reverberação calculados pelo programa EASE e medidos no auditório da ADUNICAMP.	122
Figura 5.14.	Comparativo entre valores de EDT calculados pelo programa EASE e medidos no auditório da ADUNICAMP.	123
Figura 5.15.	Comparativo entre valores de C80 calculados pelo programa EASE e medidos no auditório da ADUNICAMP.	124
Figura 5.16.	Comparativo entre valores de D50 calculados pelo programa EASE e medidos no auditório da ADUNICAMP.	125
Figura 5.17.	Modelo computacional do auditório da ADUNICAMP criado com a platéia detalhada.	127
Figura 5.18.	Comparativo entre valores de Tempos de Reverberação calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.	127
Figura 5.19.	Comparativo entre valores de EDT calculados pelo programa E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.	128
Figura 5.20.	Comparativo entre valores de C80 calculados pelo programa E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.	129
Figura 5.21.	Comparativo entre valores de D50 calculados pelo programa E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.	129
Figura 5.22.	Percentual de escolha de sinal anecóico convoluído com sinal medido e sinal	131

	anecóico convoluído com sinal criado por programa de modelagem acústica.	
Figura 5.23.	Sala de trabalho projetada com as dimensões calculadas para uma boa audibilidade para música: a) modelo no programa computacional E.A.S.E. b) Diagrama de Bold, Beranek e Newman para as proporções da sala, marcadas com um círculo vermelho.	132
Figura 5.24.	Gráfico comparativo dos Níveis de Pressão Sonora do ruído de fundo máximo medido nos locais de realização dos testes e valores limites permitidos de acordo com a OSHA 1910-95-App E.	133
Figura 5.25.	Respostas Impulsivas obtidas pelo programa E.A.S.E. para as condições propostas: a) condição 1; b) condição 2; c) condição 3; d) condição 4.	135
Figura 5.26.	Distribuição dos valores de clareza comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) na condição 4.	138
Figura 5.27.	Distribuição dos valores de lateralização comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) na condição 4.	140
Figura 5.28.	Distribuição dos valores de reverberância comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) na condição 4.	142
Figura 5.29.	Distribuição dos valores de Razão de Baixos comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) no condição 4.	144
Figura 5.30.	Distribuição dos valores de reverberância comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) no condição 4.	146
Figura A.1.	a) Estrutura metálica da câmara reverberante em escala; b) visão frontal da câmara com mesa giratória dentro; c) vista geral do conjunto.	162
Figura A.2.	Resposta de excitação a impacto das placas que formam a câmara reverberante em escala.	163
Figura A.3.	Detalhe do acoplamento da fonte de vibração (furadeira) na estrutura de apoio.	164
Figura A.4.	Resultados da medição de vibração realizada com fonte fixada na estrutura de apoio: As curvas pontilhadas representam a medição feita após os coxins, dentro da câmara; as curvas contínuas representam as medições feitas na estrutura antes do coxim de desacoplamento.	165
Figura A.5.	Resultados da diferença calculada de medições de Nível de Pressão sonora interna e externamente à cabine em escala para as frequências de interesse do	166

	modelo em escala 1:5.	
Figura A.6.	Corte a <i>laser</i> de material para a construção de dodecaedro para medições em escala: (a) material em corte; (b) material cortado; (c) corte e vinco do material para a montagem do dodecaedro; (d) fixação com fita de alumínio adesivada para montagem.	167
Figura A.7.	Esquema de interligação elétrica dos <i>tweeters</i> utilizados no dodecaedro.	168
Figura A.8.	Qualificação do campo sonoro utilizado para determinação da diretividade da fonte sonora segundo a ISO 3746.	169
Figura A.9.	Diretividade do dodecaedro para bandas de frequência de medição e níveis de pressão sonora no eixo y.	170
Figura A.10.	Reprodutores sonoros utilizados nos ensaios.	171
Figura A.11.	Equalizador gráfico utilizado para separar os sinais dos reprodutores e equalizar o sinal de saída.	171
Figura A.12.	a) Gráfico comparativo dos resultados da determinação do coeficiente de absorção sonora com difusores, sem difusores e valores de catálogo do material medido. b) Foto do material medido dentro da câmara.	173
Figura A.13.	a) Tijolo sintonizado (ressoador) produzido; b) arranjo para ensaio de absorção em câmara em escala.	173
Figura A.14.	Comparativo de determinação do coeficiente de absorção sonora de tijolo sintonizado em tamanho real e em escala 1:5.	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Correlação entre os atributos subjetivos e seus parâmetros objetivos	51
Tabela 5.1	Resultados determinados de STI e %ALC obtidos pelo software de medição DIRAC e pelo software de modelagem E A S E.	126
Tabela 5.2	Valores de médias e desvio padrão para cada parâmetro analisado e para cada amostra apresentada	148

LISTA DE ABREVIATURAS

$\bar{\alpha}$	média do coeficiente de absorção das superfícies internas;
α_i	coeficiente de absorção da i-ésima superfície interna;
α	coeficiente de absorção sonora;
a	coeficiente de absorção sonora especular;
ADUNICAMP	Associação de Docentes da Universidade Estadual de Campinas;
ASHA	<i>American Speech-Language-Hearing Association</i> ;
Br	Brilho;
C_{80}	Parâmetro determinado pela relação entre a energia nos primeiros 80 ms que chegam ao ouvinte e a energia que chega após os 80 ms;
CAD	Computer-aided Design;
c	velocidade de propagação sonora (m/s);
c_1	velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_1 (m/s);
c_2	velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_2 (m/s);
c_3	velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_3 (m/s);
c_4	velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_4 (m/s);
D_{50}	Definição: parâmetro determinado pela relação entre a energia nos primeiros 50 ms que chegam ao ouvinte e a energia total da resposta impulsiva;

dB	decibel;
DIRAC	<i>Dual Input Room Acoustics Calculator</i> ;
E.A.S.E.	<i>Enhanced Acoustic Simulator for Engineers</i> ;
EDT	<i>Early Decay Time</i> ;
EDT ₅₀₀	<i>Early Decay Time</i> para a frequência de 500 Hz;
EDT ₁₀₀₀	<i>Early Decay Time</i> para a frequência de 1000 Hz;
EDT ₂₀₀₀	<i>Early Decay Time</i> para a frequência de 2000 Hz;
EDT ₄₀₀₀	<i>Early Decay Time</i> para a frequência de 4000 Hz;
FEC	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp;
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica;
HRTF	<i>Head Related Transfer Function</i> ;
Hz	Hertz;
IACC	Coefficiente de Correlação Cruzada Inter-Aural;
ITDG	<i>Initial Time Delay Gap</i> ;
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> ;
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> ;
LACAF	Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada;
LF	<i>Lateral Fraction</i> ;
MLS	<i>Maximum Length Sequence</i> ;
m_1	Coefficiente de atenuação de energia do ar para determinação de T ₁ ;
m_2	Coefficiente de atenuação de energia do ar para determinação de T ₂ ;
m_3	Coefficiente de atenuação de energia do ar para determinação de T ₃ ;
m_4	Coefficiente de atenuação de energia do ar para determinação de T ₄ ;
$p^2(t)$	Função do decaimento de pressão sonora da sala;
p_L	Pressão sonora instantânea lateral medida no espaço;
p_e	Pressão sonora medida no ouvido esquerdo;
p_d	Pressão sonora medida no ouvido direito;
RB	Razão de Baixos;
S	Área superficial;

s	Coeficiente de espalhamento;
TR	Tempo de Reverberação;
T_1	Tempo de reverberação obtido sem a amostra, mas com a mesa rotatória parada (s);
T_2	Tempo de reverberação obtido com a amostra e mesa parada (s);
T_3	Tempo de reverberação obtido sem a amostra, mas com a mesa rotatória girando (s);
T_4	Tempo de reverberação obtido com a amostra e mesa rotatória girando (s);
TR ₁₂₅	Tempo de Reverberação na frequência de 125 Hz;
TR ₂₅₀	Tempo de Reverberação na frequência de 250 Hz;
TR ₅₀₀	Tempo de Reverberação na frequência de 500 Hz;
TR ₁₀₀₀	Tempo de Reverberação na frequência de 1000 Hz;
V	Volume da sala ou ambiente;
$\langle s^2(t) \rangle$	Média das respostas de todas as possíveis curvas de decaimento;
$r^2(t-\tau)$	Respostas impulsivas para a banda do sinal de excitação considerando todos os sistemas interligados em série com o ambiente;
N_b	Banda de frequência do decaimento;
r_e	Raio da esfera considerada como receptor;
l_{max}	Comprimento do raio detectado;
N	Número de raios;
t	Tempo de viagem do raio;
n_{im}	Número total de imagens obtidas;
i_0	Ordem das reflexões.

SUMÁRIO

Agradecimentos	5
Resumo	6
Abstract	7
Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	15
Lista de Abreviaturas	16
Sumário	19
1 Introdução	21
1.1 Objetivos	25
1.2 Organização	26
2 Características acústicas dos espaços internos	27
2.1 Superfícies internas	27
2.2 Reflexões nas superfícies	28
2.3 Tempo de reverberação	37
2.4 Coeficiente de difusão e de espalhamento	40
2.4.1 <i>Coeficiente de difusão</i>	42
2.4.2 <i>Coeficiente de espalhamento</i>	44
2.5 Parâmetros referentes a qualidade acústica de salas	50
2.5.1 <i>Reverberância e tempo de decaimento inicial.</i>	51
2.5.2 <i>Clareza e definição.</i>	53
2.5.3 <i>Intimidade e tempo de atraso inicial</i>	55
2.5.4 <i>Envolvimento ou lateralização</i>	56
2.5.5 <i>Calor e brilho</i>	57
3 Resposta impulsiva, modelagem numérica e auralização.	59
3.1 Resposta impulsiva	59
3.2 Modelagem numérica de salas	64
3.2.1 <i>Método do traçado de raios</i>	65
3.2.2 <i>Método de fontes virtuais</i>	68
3.2.3 <i>Método do traçado de pirâmides</i>	65
3.2.4 <i>Uso da transição de energia</i>	73
3.2.4 <i>Solução numérica da equação de onda</i>	74
3.2.5 <i>Métodos estatísticos</i>	76
3.2.6 <i>Métodos híbridos</i>	76

3.3 Auralização	77
3.3.1 Sinal inicial ou de entrada	78
3.3.2 Processamento do sinal, convolução e filtragem	81
3.3.3 Reprodução do sinal	83
3.3.4 Percepção subjetiva do Sinal	85
4 Materiais e métodos	87
4.1 Câmara reverberante em escala e equipamentos de medição	88
4.2 Medições do coeficiente de espalhamento	91
4.3 Simulações computacionais	94
4.4 Auralização e apresentação ao júri	97
5 Resultados e discussão	111
5.1 Câmara reverberante	112
5.2 Medições preliminares do coeficiente de espalhamento	114
5.3 Determinação do coeficiente de espalhamento de superfícies utilizadas em modelos computacionais	116
5.4 Validação do modelo computacional.	119
5.5 Teste de percepção auditiva dos panoramas acústicos	132
6 Conclusões	149
Referências	153
Apêndice A - Construção e validação da câmara reverberante em escala	161
Apêndice B - Cálculos estatísticos	177
Apêndice C - Termo de esclarecimento	179

1 Introdução

O estudo das características acústicas de espaços internos teve sua importância evidenciada a partir da necessidade de se projetarem salas multiuso voltadas para teatro, música, palestras etc, com o objetivo de se obter uma boa audibilidade. As características acústicas das superfícies internas determinam o comportamento do espaço aos sons gerados em seu interior.

As superfícies podem refletir o som e esta reflexão pode ser utilizada para uma melhor distribuição da energia sonora dentro de um ambiente (BRÜEL&KJAER, 1978). Esta distribuição pode ter como objetivo o alcance de áreas com deficiência no nível de pressão sonora emitido pela fonte sonora ou melhorar certos atributos correlatos à sensação subjetiva responsável por uma boa audibilidade como clareza, reverberância, brilho etc. (METHA *et al.*, 1999).

Assim como as características de absorção da energia acústica incidente, as superfícies possuem coeficientes que representam a quantidade e qualidade da energia refletida (D'ANTONIO e COX, 2000). Estes coeficientes são empregados na predição do comportamento acústico e projeto acústico de salas, sendo responsáveis por caracterizar acusticamente os materiais das superfícies destes espaços. Um destes coeficientes, representativo da energia refletida, é conhecido como coeficiente de difusão (BISTAFA, 2005).

O comportamento da difusão da energia refletida pode ser representado pelo coeficiente de difusão, como uma distribuição angular e quantitativa da energia refletida, já o coeficiente de espalhamento como a parcela de energia que é distribuída fora da região especular (D'ANTONIO e COX, 2000).

Com o advento de técnicas numéricas e uso de processamento computacional na predição das características acústicas de espaços internos, certos programas de modelagem demonstraram a eficácia do uso de coeficientes que representassem não apenas a absorção, mas a redistribuição da energia sonora após as reflexões nas superfícies (BORK, 2004). A técnica utilizada para a predição acústica das características dos espaços, nestes programas, baseia-se normalmente em métodos híbridos de traçado de raios acústicos e de cálculo de imagens de fontes sonoras. Devido

a esta técnica, o coeficiente de espalhamento mostra-se bem mais representativo da característica de difusão de uma superfície nos programas de modelagem (GOMES et al., 2004).

O coeficiente de espalhamento representa a capacidade de uma superfície de redirecionar, fora da zona de reflexão especular, a energia acústica que incide nesta superfície. O coeficiente de espalhamento de uma superfície pode ser determinado por um método descrito na norma internacional ISO 17497:2004 – *Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberant room*. Esta norma foi originada a partir dos estudos realizados por Vorländer e Mommertz (2000).

A representação das características acústicas dos espaços internos é a resposta deste espaço a um determinado impulso sonoro, ou também chamada de resposta impulsiva de um ambiente (MÜLLER e MASSARANI, 2001). Esta resposta impulsiva pode ser obtida por medição realizada no espaço ou calculada computacionalmente através de programas de modelagem. Alguns parâmetros são necessários como entrada nos programas de modelagem, tais como as características geométricas e acústicas das superfícies internas. Dentre as características acústicas das superfícies estão os coeficientes de absorção e de espalhamento das superfícies.

A resposta impulsiva contém as impressões acústicas que influenciam os sons reproduzidos num certo ambiente. Estas impressões podem ser inseridas em sinais gravados a partir da convolução matemática deste sinal com a resposta impulsiva da sala. Este processo de reproduzir um panorama acústico real através de modelagem computacional é chamado de auralização (KLEINER *et al.*, 1993).

As impressões acústicas dos espaços podem ser correlacionadas às reflexões que ocorrem na propagação da energia sonora. Estas reflexões são representadas por atributos acústicos que quantificam a influência da distribuição de energia na percepção subjetiva (BISTAFA, 2005).

Na acústica de salas é comum o uso de atributos acústicos que expressam a sensação subjetiva da audição, tomando como base comparativos com outros sentidos. Uma análise destes atributos foi realizada por Figueiredo *et al.* (2004). Neste trabalho, dentre os atributos subjetivos estudados, foram apontados como mais relevantes: a vivacidade (*liveness*), calor (*warmth*), brilho

(*brilliance*), nível de som direto e reverberante (*Loudness of direct/reverberant sound*), intimidade (*intimacy*), clareza ou definição (*clarity or definition*) e impressão espacial (*spacial impression*). Estes atributos exprimem sensações auditivas, considerando a resposta da sala a um estímulo sonoro, e podem ser correlacionados com valores obtidos a partir da resposta impulsiva da sala em questão.

Caracterizam-se como “panoramas acústicos” os resultados do processo de criar uma impressão de um espaço em um sinal anecóico a partir de uma resposta impulsiva correspondente às características deste espaço. Os panoramas acústicos criados a partir do processo de auralização podem simular certas situações e estas serem apresentadas para que os ouvintes tenham a mesma sensação auditiva que teriam em condições reais às situações apresentadas (KLEINER *et al.*, 1993). Com o uso de fones de ouvido e de programas de computador pode-se realizar a simulação de certas condições e estas podem ser expostas à percepção humana (HAMEED *et al.*, 2004). Estas simulações podem ser utilizadas para verificação da impressão espacial de panoramas acústicos de espaços modelados e pode-se analisar a influência destas alterações na percepção auditiva (FARINA e TRONCHIN, 2001).

A influência do coeficiente de espalhamento na percepção subjetiva foi inicialmente estudado por Torres *et al.* (2000). Em seu estudo, os atributos de espacialidade e de coloração foram considerados, porém foi adotado um mesmo valor de coeficiente de espalhamento para todas as frequências de interesse, dentro de um programa de simulação para um determinado panorama acústico. Variações perceptíveis na coloração e espacialidade foram observadas no resultado do julgamento realizado por ouvintes, a partir de variações do coeficiente de espalhamento. Entretanto, os coeficientes utilizados não representaram os coeficientes medidos em ensaios normalizados. Ensaios de determinação do coeficiente de espalhamento realizados para superfícies em condições reais mostram uma variação dos valores do coeficiente de espalhamento de acordo com a frequência.

Rindel e Christensen (2003) realizaram algumas auralizações utilizando valores de coeficiente de espalhamento estimados para certos materiais, porém com um mesmo coeficiente de espalhamento para toda a faixa de frequência de análise. O resultado obtido foi que as primeiras reflexões das respostas impulsivas não sofriam muita influência, não obtendo uma

diferença significativa na auralização. Zeng *et al.* (2006) buscaram um novo método para estimar o coeficiente de espalhamento conseguindo valores mais próximos a valores medidos nos espaços reais, porém os valores do coeficiente de espalhamento foram estimados para médias frequências.

Os coeficientes de espalhamento, medidos segundo a norma ISO 17497:2004, são utilizados para a representação da redistribuição de energia das superfícies em programas de modelagem acústica. A influência destes coeficientes de espalhamento obtidos experimentalmente nos atributos utilizados para expressar subjetivamente a qualidade dos espaços, até então, não foi avaliada. A influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de espaços é o principal objeto de estudo deste trabalho.

Observando que os coeficientes de espalhamento obtidos experimentalmente alteram as características e respostas impulsivas de um espaço modelado, e que as impressões subjetivas destas alterações ainda não foram estudadas, o presente trabalho tem como objetivo estudar a influência destes coeficientes de espalhamento, obtidos experimentalmente, nas impressões espaciais criadas por programas de modelagem, tomando como descritores destas alterações os atributos subjetivos de qualidade do espaço modelado através de técnicas de auralização. O modelo espacial criado foi avaliado por um júri que expressou sua percepção a estas alterações. As sensações auditivas relatadas pelo júri foram baseadas nos atributos subjetivos utilizados para a qualificação de salas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar a influência do coeficiente de espalhamento obtido experimentalmente na percepção de atributos subjetivos utilizados para qualificação de salas. Como objetivos específicos tem-se:

1– **Construir uma câmara reverberante em escala reduzida** para determinação experimental do coeficiente de espalhamento de superfícies;

2– **Validar a metodologia de modelagem computacional** comparando valores obtidos por medições realizadas em local definido com valores obtidos pela modelagem computacional.

3– **Validar subjetivamente a metodologia de modelagem computacional** por comparação entre as respostas impulsivas medidas com respostas impulsivas obtidas pela modelagem computacional.

4– **Obter panoramas acústicos** a partir da alteração de parâmetros de espalhamento das superfícies de modelo computacional, de acordo com valores de coeficiente de espalhamento obtidos experimentalmente.

5– **Obter a resposta subjetiva do júri aos panoramas acústicos** para avaliação das variações causadas pelo coeficiente de espalhamento experimental.

1.2 Organização

Este trabalho está organizado em seis capítulos, onde o primeiro capítulo trata-se de uma introdução à importância do coeficiente de espalhamento no modelamento computacional dos espaços e sua influência nas respostas impulsivas obtidas de programas de modelagem. Aborda-se também, a importância destas respostas para a auralização de sinais e a resposta da percepção destes sinais auralizados.

O segundo capítulo contém as bases teóricas das características acústicas dos espaços internos com o desenvolvimento do capítulo voltado para os coeficientes de espalhamento e atributos subjetivos utilizados para qualificação de salas.

O terceiro capítulo contém bases teóricas para compreensão dos processamentos de sinais e algoritmos utilizados por programas de modelagem que serão utilizados para a realização do presente trabalho.

O quarto capítulo trata da metodologia necessária para a realização deste trabalho incluindo método de determinação do coeficiente de espalhamento e metodologia para modelagem computacional, obtenção de panoramas acústicos, apresentação dos panoramas ao júri e obtenção das respostas de sinais convoluídos com estes panoramas.

O quinto capítulo refere-se aos resultados obtidos e discussões de análises destes resultados.

O sexto capítulo contém as conclusões do trabalho realizado e trabalhos futuros.

2 Características acústicas dos espaços internos

O estudo das características acústicas dos espaços internos é um tópico de crescente importância na busca de uma boa audibilidade. Segundo Metha *et al.* (1999), a boa audibilidade é dependente de um estudo e de uma concepção que prioriza o propósito a que se destina um espaço.

De acordo com a finalidade do uso do ambiente, seja para fala, música, reprodução ou gravação de mídia, as características acústicas do ambiente em questão são de principal importância para uma boa audição. Um exemplo clássico é o de locais com grandes dimensões e com superfícies de baixo coeficiente de absorção para uso em música sacra. Esta configuração cria uma sensação de grandiosidade e de continuidade no som produzido. Em outro extremo, numa sala de locução o objetivo é captar as nuances da voz falada, neste caso as superfícies são altamente absorventes para que não se detectem as reflexões no ambiente e o volume do ambiente é normalmente pequeno (METHA *et al.* 1999).

Este capítulo aborda o comportamento do som em ambientes fechados, as características das superfícies difusas e os coeficientes representativos do fenômeno de difusão.

2.1 Superfícies internas

Quando uma onda de energia sonora atinge uma superfície parte desta energia é dissipada pela superfície, parte é transmitida por ela e parte é refletida, como pode ser observado na Figura 2.1.

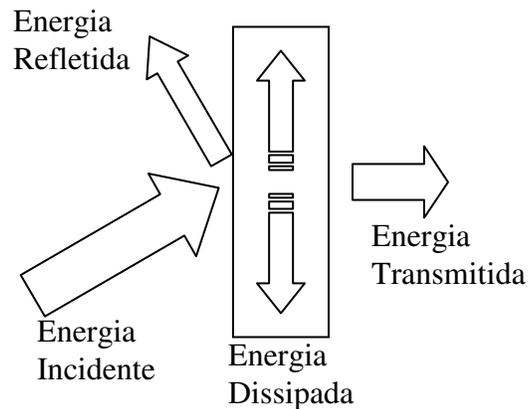


Figura 2.1. Esquema da distribuição da energia de uma onda que atinge uma superfície.

A parcela de energia absorvida por um material pode ser representada pelo coeficiente de absorção sonora que é definido como a razão entre a energia absorvida e a energia incidente na superfície do material. A energia absorvida pode ser considerada, no caso de superfícies internas, como a energia que não é refletida pela superfície. A razão entre a energia transmitida e a energia que incide na superfície do material é representado pelo coeficiente de transmissão; este coeficiente é a base para determinar o grau de isolamento de um material (BRÜEL&KJAER, 1978). A reflexão da energia pela superfície pode ocorrer na direção especular ou fora desta direção. Neste trabalho o foco será na análise dos fenômenos relativos à reflexão.

2.2 Reflexões nas superfícies

Quando uma onda sonora incide sobre uma superfície e parte da energia é refletida com o mesmo ângulo de incidência em relação à normal desta superfície tem-se uma reflexão especular (METHA *et al.*, 1999). A reflexão especular pode ser comparada à reflexão da luz por um espelho como mostrado na Figura 2.2. Este tipo de reflexão ocorre com superfícies que

apresentam um baixo grau de rugosidade para o som incidente. O baixo grau de rugosidade é proporcional ao comprimento de onda do som incidente.

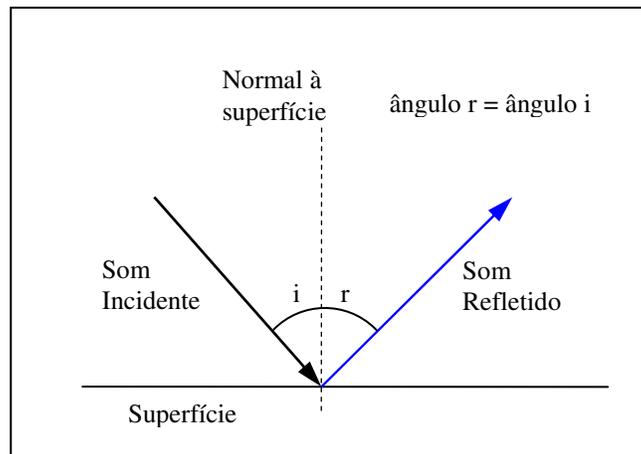


Figura 2.2. Reflexão sonora especular.

A reflexão difusa acontece quando a onda sonora incidente é visualizada pela superfície como um feixe incidente, refletindo em várias direções distintas (METHA *et al.*, 1999). Uma superfície que caracteriza este tipo de reflexão, normalmente, bem irregular e causa o fenômeno de espalhamento da energia, ou reflexão difusa da energia, como visto na Figura 2.3.

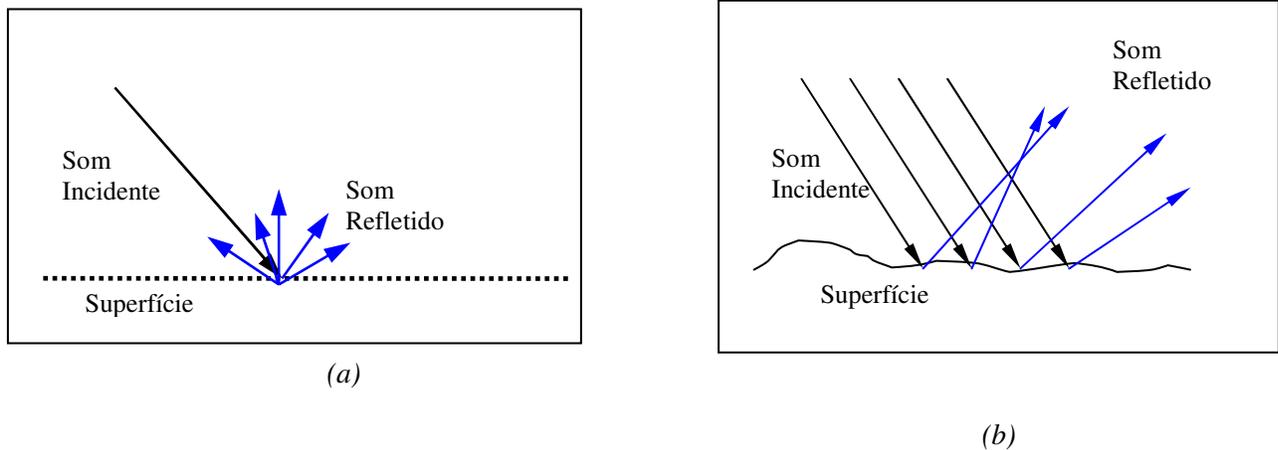


Figura 2.3. Reflexão sonora difusa: a) visão macroscópica; b) visão microscópica.

A propagação de uma onda sonora dentro de um ambiente fechado está sujeita a obstáculos existentes nestes ambientes, ao passar por estes obstáculos as ondas sonoras sofrem mudança de sua direção dependendo das dimensões destes obstáculos e do comprimento de onda. Este fenômeno de redirecionamento da propagação sonora é conhecido como difração sonora (EVEREST, 2001).

Quando o comprimento de onda é maior que a barreira encontrada a onda sonora não sofre interferência na propagação. Quando o comprimento de onda é menor que a barreira as ondas sonoras sofrem interferência desta barreira em sua propagação. Na zona de sombra formada atrás da barreira, parte da energia sonora se propaga em menor quantidade e fora do caminho de propagação descrito em uma linha reta que se inicia na fonte sonora e termina na borda da barreira (EVEREST, 2001). Estes fenômenos estão representados na Figura 2.4.

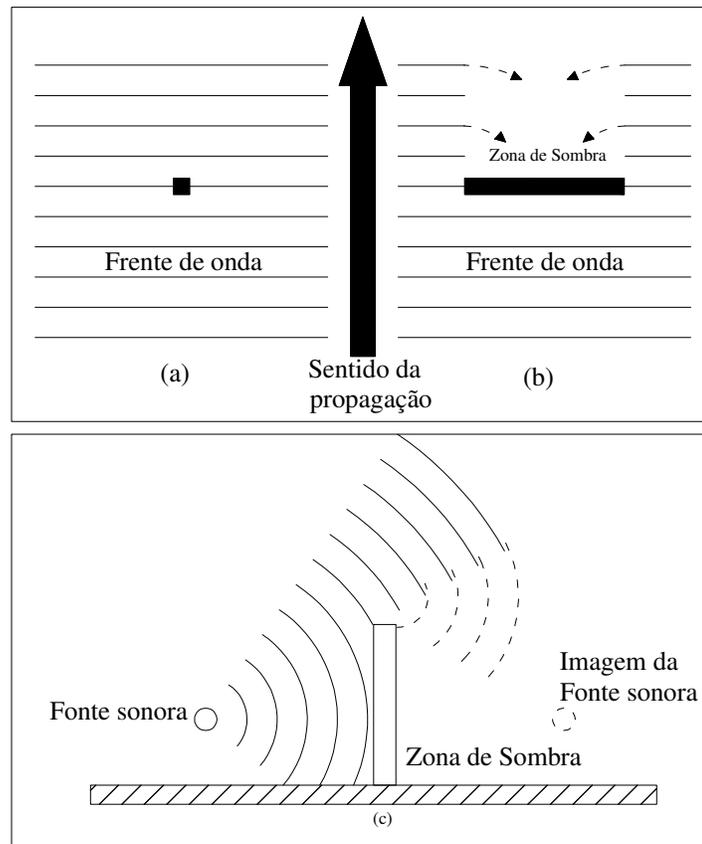


Figura 2.4. Casos de difração sonora: a) obstáculo menor que o comprimento de onda; b) obstáculo maior que o comprimento de onda; c) vista lateral de uma barreira. Fonte: Everest (2001)

O som ouvido numa sala é a combinação de sons diretos, reflexões vindas das superfícies da sala e interferência de elementos existentes dentro da sala. A alteração desta combinação modifica também o modo pelo qual percebe-se o som, como descrito por D'Antonio e Cox (2000).

Para compreensão do sistema de reflexão das superfícies, de acordo com D'Antonio e Cox (2000), podem ser utilizados os efeitos da difração física descritos por Huygens. A construção de Huygens é descrita como uma superfície plana composta por diversas fontes secundárias que representam as ondas refletidas. Estas fontes secundárias criam uma propagação semi-esférica e concêntrica que causam interferências que modelam o padrão das ondas

refletidas. Linhas desenhadas descrevem as frentes de onda de propagação sonora. Este sistema pode ser visualizado na Figura 2.5.

O sistema de Huygens representa a reflexão das ondas incidentes na direção especular. Para este caso, a frente de onda refletida não interfere na onda incidente.

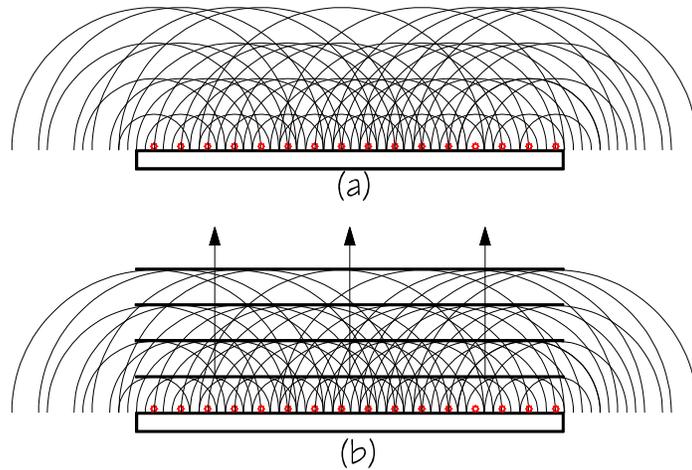


Figura 2.5. Construção de Huygens para uma onda refletida por uma superfície plana em uma fonte de incidência normal. a) Discretização de fontes na superfície. b) representação das frentes de onda formadas. Adaptado de: Cox e D'Antonio (2004).

Quando alterado o formato da superfície altera-se o formato de propagação das ondas refletidas no sistema de Huygen, um formato de semicilindro pode ser visto na Figura 2.6.

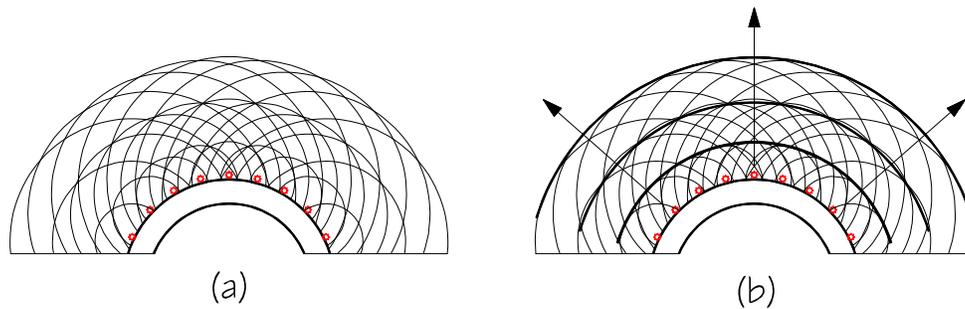


Figura 2.6. Construção de Huygens para uma onda plana refletida por uma superfície cilíndrica. a) Discretização de fontes na superfície; b) representação das frentes de onda formadas. Adaptado de: Cox e D'Antonio (2004).

A propagação sonora de difusores semicilíndricos gera uma dispersão espacial; esta dispersão redireciona as frentes de onda para outras direções de acordo com a superfície.

Este é o princípio básico de redirecionamento de energia dos difusores acústicos. Os difusores acústicos são elementos utilizados para criar uma alteração na geometria interna de um ambiente (D'ANTONIO e COX, 2000).

Yokota *et al.* (2002) estudaram a propagação sonora de certas formas geométricas de salas com o método da diferença finita no domínio do tempo. Este método permite uma visualização da propagação sonora a partir das condições de contorno. A Figura 2.7 mostra a propagação sonora em ambientes de diferentes formas geométricas. Esta Figura é composta pela situação de propagação das frentes de onda para determinado instante, tomando como referência o instante da excitação inicial. Os círculos escuros representam as fontes sonoras e os círculos claros representam os receptores.

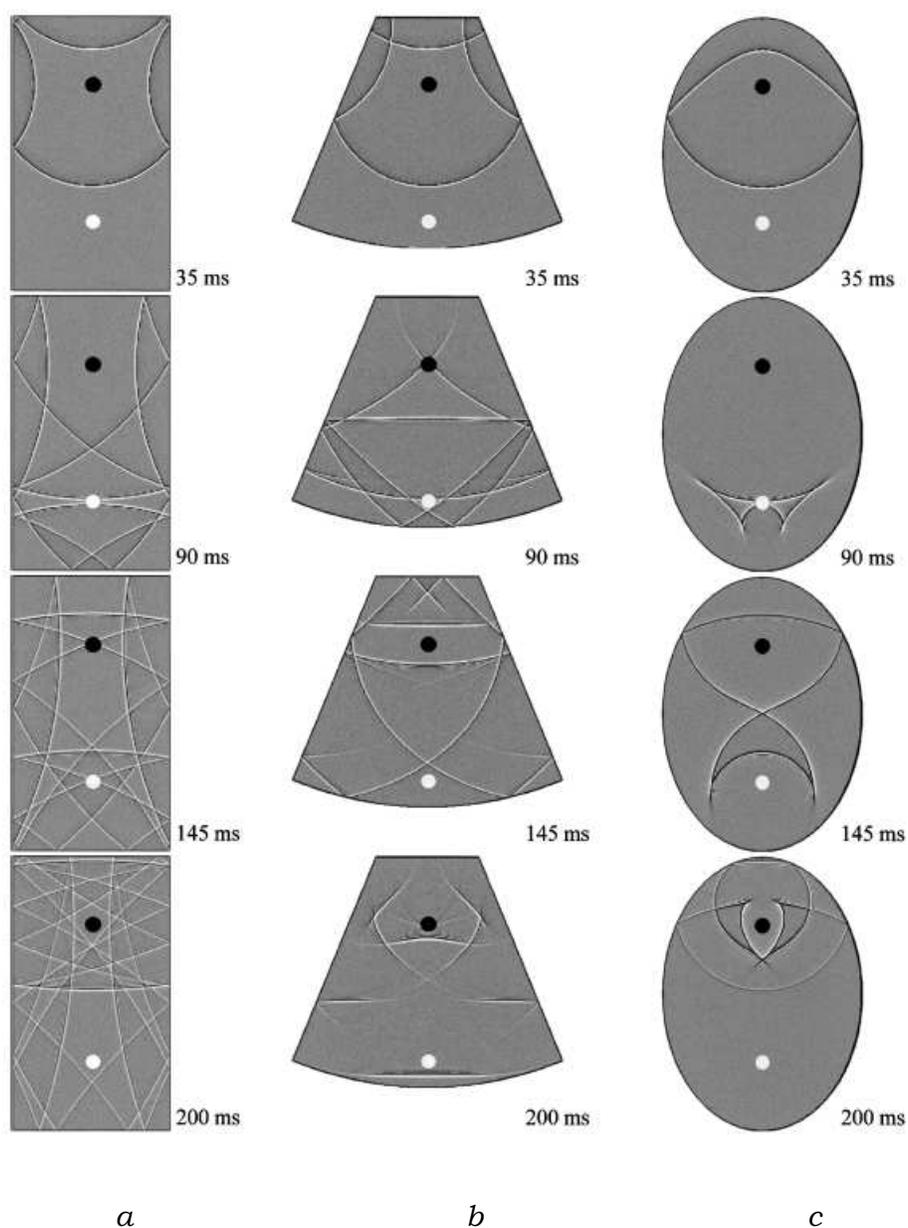


Figura 2.7. Visualização da propagação sonora: a) propagação sonora visualizada para uma sala retangular; b) formato de leque; c) formato elíptico. Fonte: Yokota, et al. (2002).

Com a colocação de difusores nas superfícies laterais das salas a distribuição de energia é visualmente maior com o aumento das frentes de onda de propagação no decorrer do tempo, conforme visto na Figura 2.8.

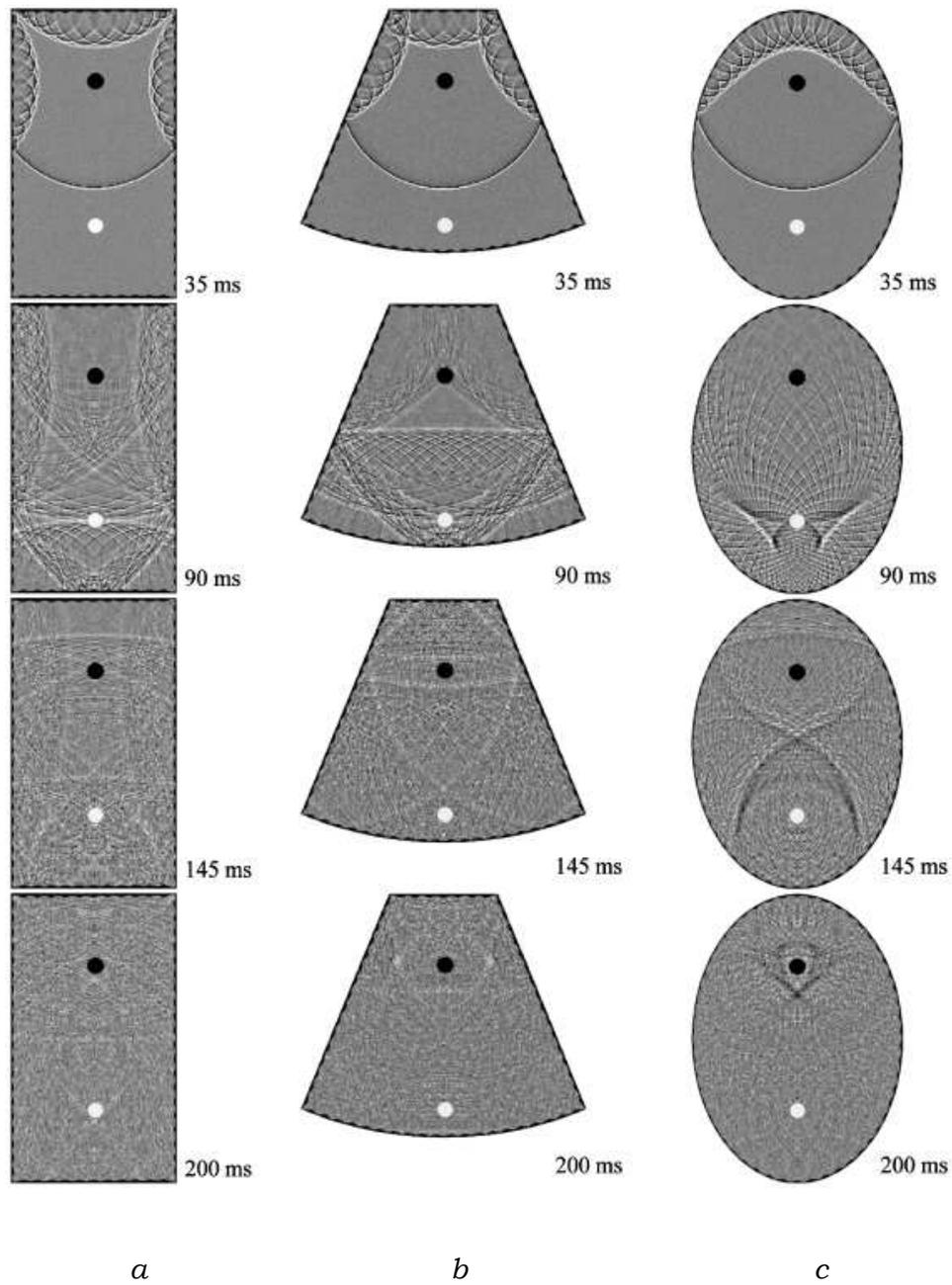


Figura 2.8. Visualização da propagação sonora: a) propagação sonora visualizada para uma sala retangular; b) formato de leque; c) formato elíptico. Com superfícies difusas. Fonte: Yokota, et al. (2002).

Para um mesmo formato de sala, o tipo de irregularidade existente nas paredes pode modificar a dispersão do som no decorrer do tempo, conforme visto na Figura 2.9, esta irregularidade ocorre superficialmente e, ao aumentar a complexidade da irregularidade, aumenta-se a quantidade de frentes de onda.

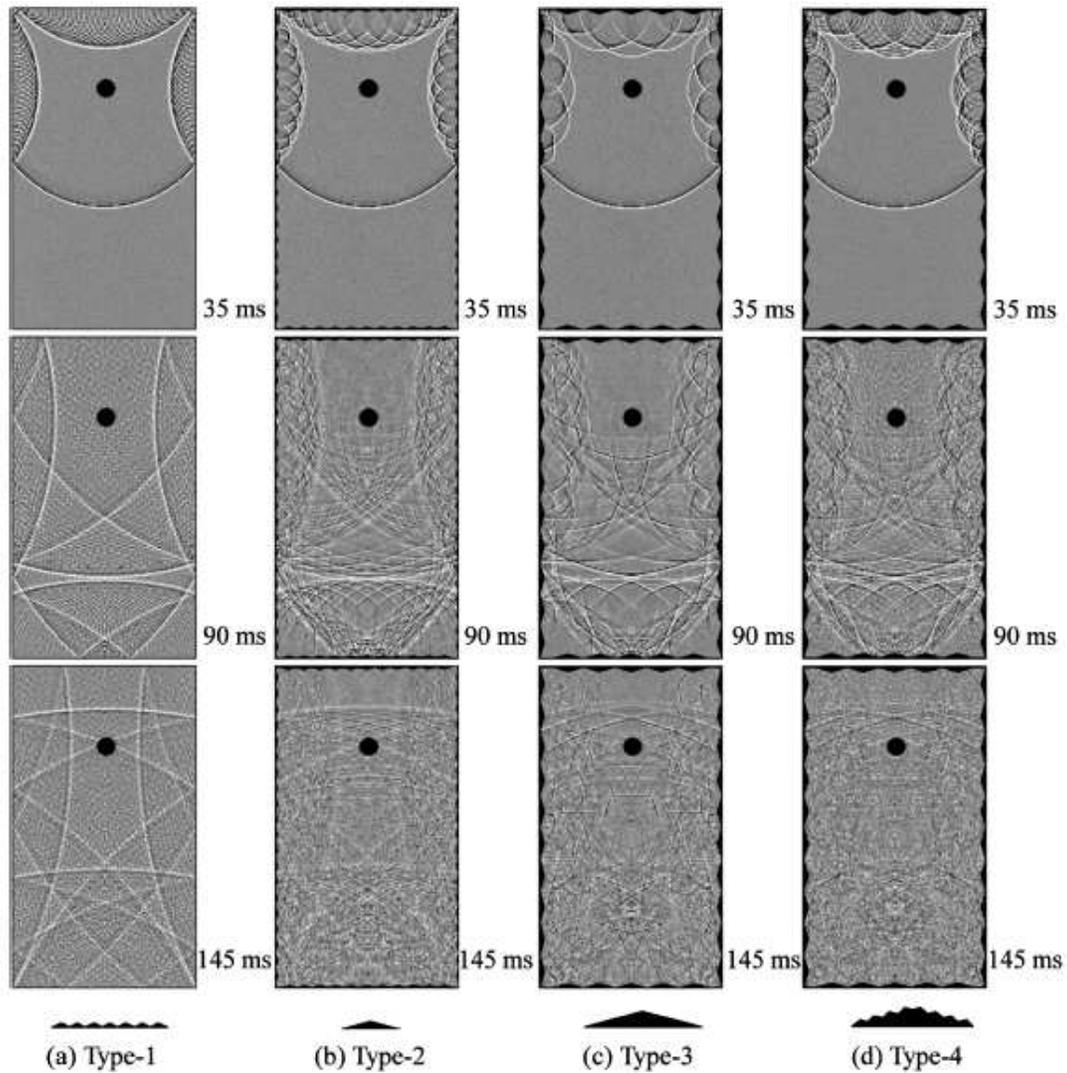


Figura 2.9. Propagação sonora visualizada no tempo para diferentes tipos de superfícies.
Fonte: Yokota, et al. (2002).

Estas alterações geométricas existentes na superfície modificam a distribuição de energia dentro do ambiente e conseqüentemente modificam algumas características acústicas importantes para a percepção sonora.

Se observada a energia que chega ao receptor, sua distribuição aumenta quanto mais irregularidades são observadas nas paredes da mesma sala. Aumenta-se, portanto, a quantidade de energia nas primeiras reflexões com o aumento de irregularidades nas paredes da sala.

2.3. Tempo de Reverberação

Quando as ondas sonoras são refletidas dentro de um ambiente sobrepondo-se ao som direto, além das primeiras reflexões, o campo sonoro resultante neste ambiente têm uma característica reverberante (SANTOS, 2004). Esta sobreposição ocorre devido à reflexão sonora das superfícies destes espaços trazendo uma sensação de continuidade do som produzido.

Por muitos anos os projetos acústicos de ambientes se baseavam no coeficiente de absorção das superfícies e as características geométricas da sala. Estas técnicas de adequação acústica tomavam como base o controle do tempo de reverberação do ambiente e certo controle no nível de pressão sonora distribuído no ambiente (COX e D'ANTONIO, 2004).

O Tempo de Reverberação é definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora de um ambiente decaia de 60 dB, representado na Figura 2.10 (EVEREST, 2001).

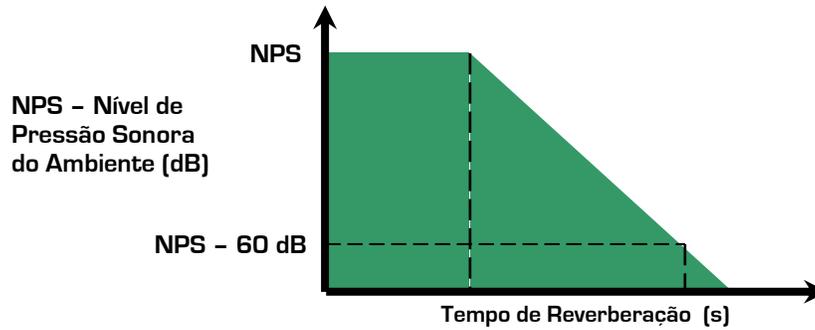


Figura 2.10. Diagrama esquemático representativo do tempo de reverberação.

O cálculo do tempo de reverberação foi obtido empiricamente por Sabine e publicado em 1922. Este cálculo considerava o volume do espaço e a absorção das superfícies internas conforme a Equação (2.1).

$$T_{60} = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot A} \quad (2.1)$$

onde: V = volume da sala/espaço (m^3);

c = velocidade de propagação sonora (m/s);

A = absorção sonora total das áreas internas (Sabine métrico) $A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i$;

S_i = área de cada superfície interna da sala (m^2);

α_i = coeficiente de absorção sonora da superfície S_i .

A fórmula de Sabine demonstrou desvios de resultados na predição do tempo de reverberação de espaços com uma grande quantidade de absorção. Para corrigir estas discrepâncias, outras formulações foram surgindo, como a formulação de Eyring (1930), que é apresentada na Equação (2.2).

$$T_{60} = \frac{55,3 \cdot V}{-cS \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.2)$$

onde: V = volume da sala/espaco (m^3);

S = superfície interna da sala/espaco (m^2);

c = velocidade de propagação sonora (m/s);

$\bar{\alpha}$ = coeficiente de absorção médio das superfícies internas.

A fórmula de Eyring (1930) também apresenta limitações devido ao cálculo das médias das áreas equivalentes de absorção. Considerando a influência do coeficiente de absorção de cada superfície dentro de uma sala, Millington (1932) elaborou uma fórmula mais precisa para salas com superfícies mais detalhadas e com diferentes coeficientes de absorção sonora, conforme expressa na Equação (2.3).

$$T_{60} = \frac{55,3 \cdot V}{-c \sum S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2.3)$$

onde: V = volume da sala/espaco (m^3);

S_i = i-ésima superfície interna da sala/espaco (m^2);

c = velocidade de propagação sonora (m/s);

α_i = coeficiente de absorção da i-ésima superfície interna.

O Tempo de Reverberação de um ambiente também pode ser determinado a partir da resposta impulsiva de uma sala. O método para determinação da resposta impulsiva será abordado no item 3.1 do capítulo 3.

2.4 Coeficiente de Difusão e de Espalhamento

Observada a importância da redistribuição de energia sonora em um ambiente, um aumento na quantidade de estudos que abordam os coeficientes utilizados para a caracterização desta redistribuição de energia tem sido observado nas últimas décadas (COX *et. al.*, 2006).

A necessidade de se obter um coeficiente representativo das irregularidades de uma superfície surgiu não apenas devido ao modelamento computacional, mas por observações de alteração nos atributos acústicos associados à lateralização de salas de concerto que adotavam difusores para redistribuir a energia sonora (SCHROEDER, 1979).

A Figura 2.11 mostra as características temporais e espaciais da interação da energia sonora incidente nas superfícies absorvedoras, reflexivas e difusoras. Observa-se a redistribuição da energia refletida na resposta temporal para uma superfície difusora comparada com superfícies reflexivas e superfícies absorvedoras. Para superfícies absorvedoras a resposta temporal mostra que a energia refletida é atenuada. As superfícies reflexivas redirecionam uma grande parte de energia incidente na direção especular. A resposta espacial das superfícies difusoras mostra a redistribuição da energia refletida para várias direções além da direção especular.

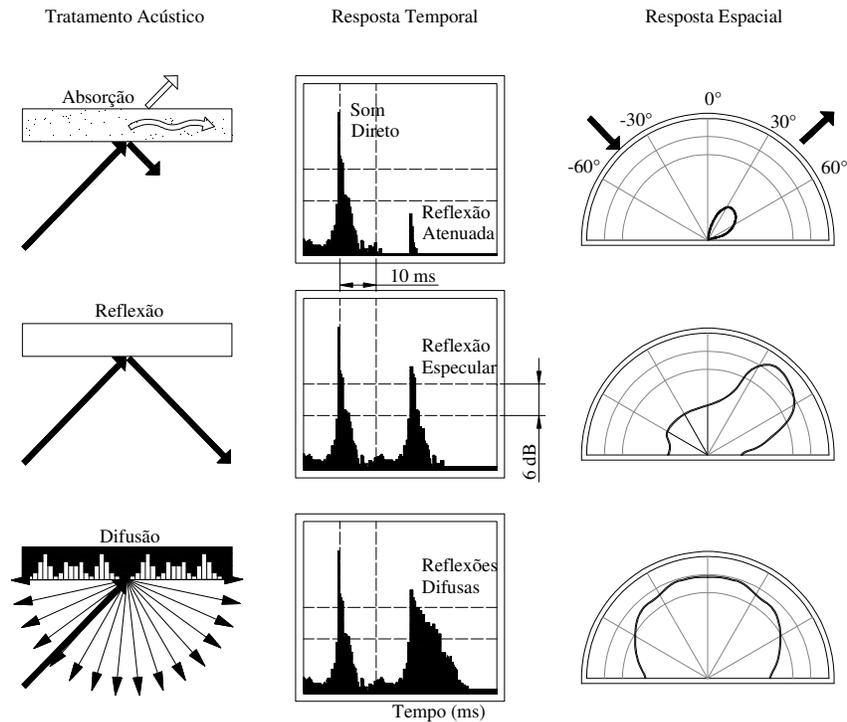


Figura 2.11. Representação das respostas espaciais e temporais de tratamentos de superfícies dependendo de suas características. Fonte: Cox e D'Antonio (2004).

Tratamentos superficiais realizados com aplicação de difusores de resíduos quadráticos projetados por Schoreder (1979) mostraram alteração de atributos acústicos de lateralização e EDT dependentes das primeiras reflexões da energia sonora dentro de teatros.

Um comparativo entre programas de modelagem acústica mostrou em seus resultados que os programas que utilizavam coeficientes para representar a característica de difusão foram os que mais se aproximavam de valores reais de medição (VORLÄNDER, 1995) e (BORK, 2004). Este comparativo mostrou a necessidade de se obter um coeficiente representativo da difusão das superfícies.

A necessidade de se obter coeficientes que representassem a difusão das superfícies culminou na obtenção de técnicas experimentais para a determinação de tais coeficientes e nestas últimas décadas, chegou-se à definição do coeficiente de difusão e do coeficiente de espalhamento (COX *et. al.*, 2006).

2.4.1 Coeficiente de Difusão

O coeficiente de difusão é descrito para se ter uma representação qualitativa da reflexão de energia de uma superfície. Esta representação considera, para um ângulo de energia incidente, a sua redistribuição refletida e representada por diagramas polares.

A Figura 2.12 mostra uma representação espacial do que seria a energia refletida por uma superfície muito irregular, com o difusor tipo “*Skyline*”.

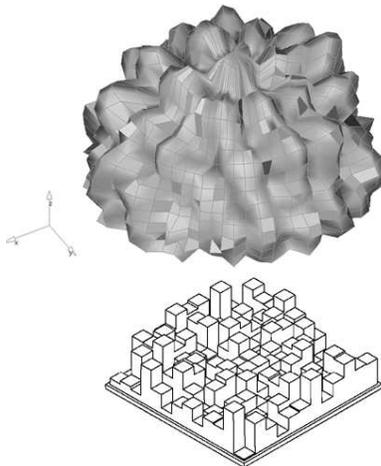


Figura 2.12. Representação da difusão de uma superfície difusora irregular. Fonte: Cox e D’Antonio (2004).

A ideia de concepção do coeficiente de difusão era obter a energia sonora refletida como se fosse um diagrama de energia sonora irradiada por altofalantes (COX et. al., 2006).

O coeficiente de difusão é dado por um único número que representa a uniformidade da resposta polar. Se a energia é redirecionada para todas as direções do semiplano da superfície considerada, então o coeficiente de difusão é um. Se a energia é redirecionada para uma direção específica, então o coeficiente de difusão é zero. O coeficiente de difusão é normalmente obtido em função da frequência, em bandas de terço de oitava (COX e D’ANTONIO, 2004).

Segundo Cox *et. al.* (2006), a redução da resposta polar em um número significativo foi idealizada a partir de uma função de autocorrelação dos valores obtidos para cada ângulo de

direção. Apesar de haver outros métodos propostos uma normativa técnica emitida pela *Audio Engineering Society* considerou a função de auto-correlação como o método mais robusto e usual (HARGREAVES *et. al.*, 2000).

A medição do coeficiente de difusão, segundo a AES-4id-2001, pode ser realizada em condições acústicas de campo livre a partir do uso de goniômetro em duas ou três dimensões. A Figura 2.13 mostra os arranjos experimentais para realização do ensaio.

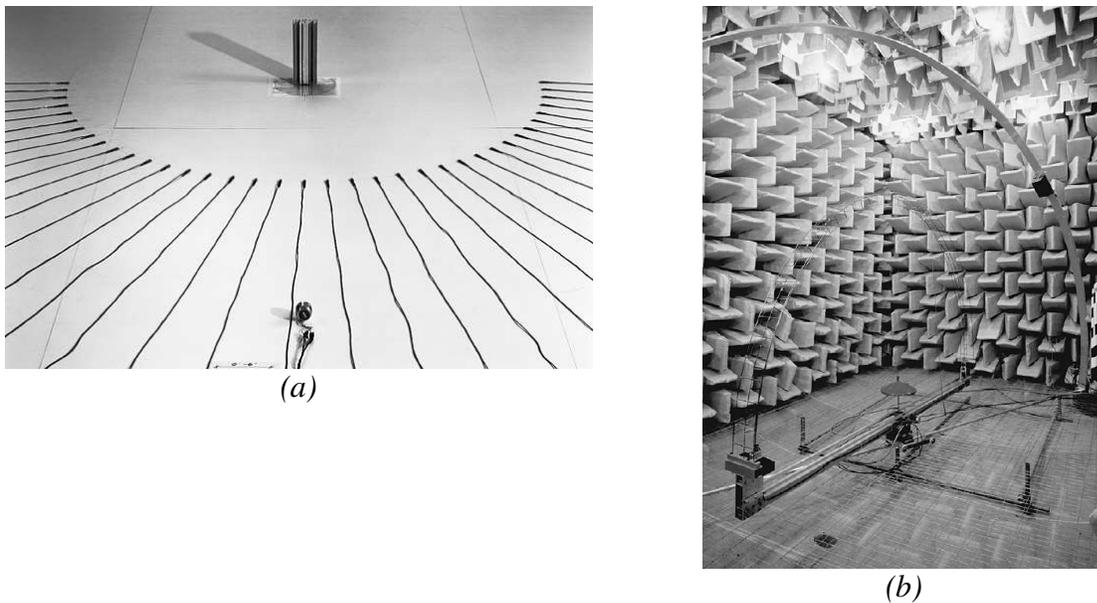


Figura 2.13. Arranjos experimentais para realização de determinação do coeficiente de difusão: (a) goniômetro em duas dimensões. (b) goniômetro em três dimensões. Fonte: Cox e D'Antonio (2004).

Para o uso do goniômetro de duas ou três dimensões, o comportamento do difusor deve ser considerado, este comportamento pode ser observado na Figura 2.14. Conforme a Figura 2.13 a técnica de goniômetro em duas dimensões é utilizada para difusores que realizam o redirecionamento da energia em uma direção longitudinal à incidência de energia (Figura 2.14a). A técnica do goniômetro em três dimensões é utilizada para o difusor que realiza o redirecionamento da energia em várias direções segundo o semiplano da base do difusor (Figura 2.14b).

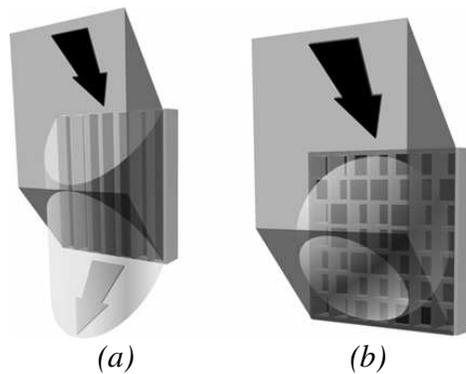


Figura 2.14. Comportamento da reflexão da energia de dois difusores com construções diferentes a partir da mesma direção da energia incidente. a) reflexão na direção longitudinal. b) reflexão em varias direções Fonte: Cox e D'Antonio (2004).

Segundo Cox *et. al.* (2004) o coeficiente de difusão sonora é preferido pelos construtores de difusores por fornecer maiores informações físicas representativas do comportamento dos difusores. Para os programas de modelagem os coeficientes de difusão não podem ser utilizados devido ao comportamento de cálculo dos programas que tratam da propagação especular da energia.

A vantagem do uso do coeficiente de difusão é a possibilidade de sua completa modelagem com métodos de elementos finitos e de elementos de contorno. Um ponto negativo é que seu uso é restrito a superfícies pequenas com alta rugosidade; para superfícies grandes o efeito de campo próximo atrapalha as medições dos coeficientes de difusão, resultando em valores errôneos.

2.4.2. Coeficiente de Espalhamento

Com o uso crescente de programas de modelagem computacional e dos métodos de simulação de ambientes, aumentou-se a necessidade de se usar um coeficiente mais representativo do efeito de difusão nestes programas (GOMES *et. al.*, 2004).

O princípio do coeficiente de espalhamento é obter a quantidade de energia que é refletida fora da zona especular. A zona especular é aquela que representa uma reflexão com o mesmo ângulo, em relação a normal ao plano de reflexão, da energia incidente.

A Figura 2.15 mostra os componentes da energia refletida de uma superfície a partir da energia incidente representada por uma unidade. A energia refletida é composta por uma parte refletida na região especular e uma parte espalhada ou refletida fora da região especular.

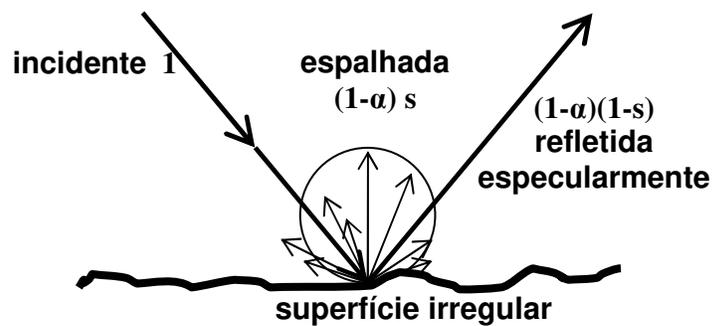


Figura 2.15. Digrama esquemático dos componentes da energia espalhada sobre uma superfície rugosa. Fonte: Vorländer e Mommertz (2000).

Comparando os impulsos resultantes de reflexões de energia para uma amostra de superfície rugosa com diferentes orientações, segundo Vorländer e Mommertz (2000), a parte inicial dos impulsos possui uma grande correlação entre si o que não ocorre com a parte tardia destes impulsos, como visto na Figura 2.16.

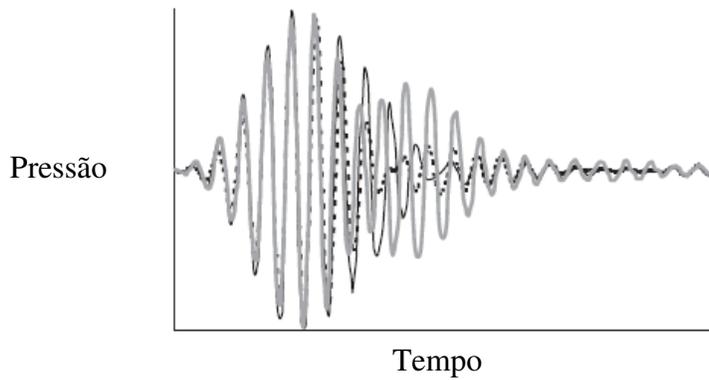


Figura 2.16. Pulsos refletidos para diferentes orientações de amostra. Fonte: Vorländer e Mommertz (2000).

Esta primeira parte dos impulsos é a parte refletida specularmente e, segundo Vorländer e Mommertz (2000), a soma de impulsos medidos para várias orientações tende a obter apenas a energia specular refletida pela superfície, como visto na Figura 2.17.

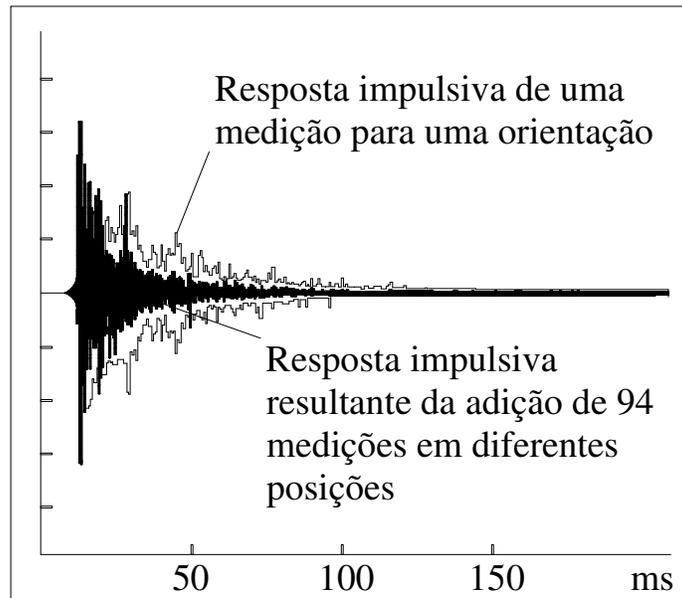


Figura 2.17. Comparação entre uma resposta impulsiva para uma orientação (branco) e para a soma de respostas para várias orientações (preto). Fonte: Vorländer e Mommertz (2000).

A resposta impulsiva resultante pode ser considerada como a resposta impulsiva da energia especular. Na Figura 2.15 a energia especular refletida (E_{spec}) é dada pela Equação (2.5).

$$E_{spec} = (1 - \alpha)(1 - s) = (1 - a) \quad (2.5)$$

onde: α = coeficiente de absorção sonora;
 a = coeficiente de absorção especular;
 s = coeficiente de espalhamento;

A fração da energia total incidente que é refletida (E_{total}) pode ser representada pela Equação (2.6).

$$E_{total} = (1 - \alpha) \quad (2.6)$$

Lembrando que o coeficiente de espalhamento é a fração de energia que é refletida fora da região especular, o coeficiente de espalhamento (s) pode ser determinado pela Equação (2.7).

$$s = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} = 1 - \frac{(1 - a)}{(1 - \alpha)} = \frac{a - \alpha}{1 - \alpha} \quad (2.7)$$

O coeficiente de espalhamento pode ser determinado em campo livre, mas a técnica mais utilizada e descrita na norma internacional ISO 17497-1:2004 é a que utiliza campo reverberante, podendo ser realizada em câmaras reverberantes em escala ou em tamanho real.

O método descrito pela norma ISO 17497-1:2004 prevê a medição de dois coeficientes conhecidos: o coeficiente de absorção da superfície e o coeficiente de absorção especular da superfície. O coeficiente de absorção especular é o obtido pela determinação do coeficiente de absorção, segundo ISO a 354:2003, da amostra em várias orientações para se obter a resposta impulsiva na direção especular. Esta, conforme visto anteriormente, pode ser obtida pela soma de várias respostas impulsivas em várias orientações da amostra, ou da determinação do coeficiente de absorção com a amostra em movimento circular contínuo. Para realizar este movimento,

recomenda-se o uso de uma mesa giratória para posicionamento ou realização de giro contínuo. O diagrama esquemático deste aparato pode ser observado na Figura 2.18.

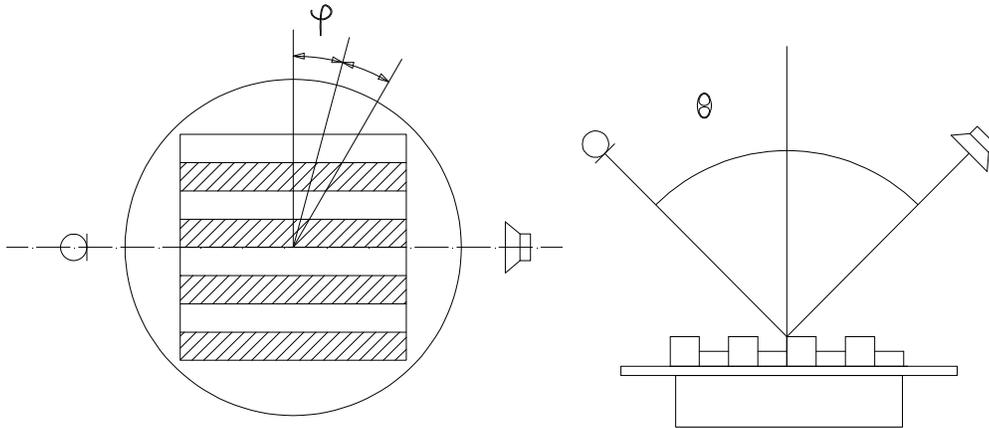


Figura 2.18. Posicionamento de aparato de medição para realização de medição para determinação do coeficiente de espalhamento. Fonte: Vorländer e Mommertz (2000).

O coeficiente de absorção da superfície é obtido com a amostra parada, como conhecido em procedimento da norma ISO 354:2003. São obtidos os tempos de reverberação da câmara em quatro condições: mesa giratória parada sem amostra; mesa giratória parada com a amostra; mesa giratória em movimento sem a amostra; e mesa giratória em movimento com a amostra.

A equação para determinação do coeficiente de absorção sonora é baseada na equação descrita na norma ISO 354:2003, através das medições do Tempo de Reverberação, conforme Equação (2.8).

$$\alpha = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (2.8)$$

Onde: V = é o volume da câmara reverberante (m^3);
 S = é a área da amostra (m^2);

T_1 = o tempo de reverberação obtido sem a amostra, mas com a mesa rotatória parada (s);

T_2 = o tempo de reverberação obtido com a amostra e mesa parada (s);

c_1 = velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_1 (m/s);

c_2 = velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_2 (m/s);

m_1 = o coeficiente de atenuação de energia do ar, calculado de acordo com a ISO 9613-1, utilizando a temperatura e umidade relativa durante a medição de T_1 (m^{-1});

m_2 = o coeficiente de atenuação de energia do ar, utilizando a temperatura e umidade relativa durante a medição de T_2 (m^{-1}).

A determinação do coeficiente de absorção sonora especular também é baseada na equação descrita na norma ISO 354: 2003, através das medições do Tempo de Reverberação, conforme a Equação (2.9).

$$a = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (2.9)$$

Onde: V = é o volume da câmara reverberante (m^3);

S = é a área da amostra (m^2);

T_3 = o tempo de reverberação obtido sem a amostra, mas com a mesa rotatória girando (s);

T_4 = o tempo de reverberação obtido com a amostra e mesa rotatória girando (s);

c_3 = velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_3 (m/s);

c_4 = velocidade de propagação sonora no ar durante a medição do T_4 (m/s);

m_3 = o coeficiente de atenuação de energia do ar, calculado de acordo com a ISO 9613-1, utilizando a temperatura e umidade relativa durante a medição de T_3 (m^{-1});

m_4 = o coeficiente de atenuação de energia do ar, utilizando a temperatura e umidade relativa durante a medição de T_4 (m^{-1}).

A partir da determinação do coeficiente de absorção do material e do coeficiente de absorção especular, o coeficiente de espalhamento pode ser obtido conforme dados da Equação (2.7).

Um cuidado a ser tomado é com relação à camada de ar que se forma abaixo da mesa giratória. Em estudos feitos por Choi e Jeong (2008), diferenças perceptíveis do coeficiente de espalhamento foram observadas para uma mesma amostra e diferentes espaçamentos abaixo da mesa giratória. Estas diferenças foram encontradas mesmo com os coeficientes de espalhamento da mesa giratória abaixo do máximo exigido pela norma ISO 17497-1:2004.

Alguns métodos estimam os coeficientes de espalhamento de superfícies para utilizá-los em programas de modelagem computacional (ZENG *et. al.*, 2006). Segundo Gomes *et. al.* (2004), o uso do coeficiente de espalhamento medido de acordo com a técnica descrita na norma ISO 17497-1:2004 em programas computacionais, aproxima os valores dos parâmetros acústicos obtidos com modelagem computacional dos valores medidos num mesmo ambiente.

2.5. Parâmetros Referentes à Avaliação da Qualidade Acústica de Salas.

Com o estudo da ambientação acústica de salas de concerto, atributos referentes a sensação subjetiva foram estudados para melhor descrever parâmetros que representam fatores correlacionados às salas que eram presentes no vocabulário de músicos e profissionais da música (METHA *et al.*, 1999). Estudos psicoacústicos mostraram a correlação destes atributos com a resposta do sistema auditivo a estímulos acústicos (ZWICKER e FASTL, 1999).

Parte desses atributos referentes à sensação subjetiva podem ser correlacionados com a energia existente na curva de decaimento de energia. Esta energia pode ser distribuída não apenas no domínio do tempo, mas também no domínio das frequências, estes atributos podem ser enumerados em uma grande possibilidade de combinações (MANNIS, 2008). Serão apresentados e definidos alguns atributos que são mais comumente utilizados para qualificação subjetiva de

salas e alguns de seus parâmetros objetivos são descritos na norma ISO 3382:1997. A Tabela 2.1 apresenta a correlação entre os atributos subjetivos e os parâmetros objetivos calculados.

Tabela 2.1 – Correlação entre os atributos subjetivos e seus parâmetros objetivos.

Atributo Subjetivo	Parâmetro Objetivo
Reverberância	<i>Early Decay Time (EDT)</i>
Clareza, Definição	C_{80} , D_{50}
Intimidade	IDTG
Envolvimento	LF (<i>Lateral Fraction</i>), IACC
Calidez e vivacidade	Calor e Brilho
Audibilidade	G, Nível sonoro relativo
Balanco entre Clareza, Definição; Calidez e vivacidade	Tempo Central

Os atributos subjetivos, apesar de representarem fatores correlacionados à sensação, correlacionam-se com os parâmetros objetivos que são quantidades mensuráveis e que podem possuir valores representativos e quantificados de acordo com as características de um ambiente.

2.5.1 Reverberância e tempo de decaimento inicial

Segundo Vorländer (2007), os atributos utilizados para descrever as sensações subjetivas podem ser analisados em dois grupos: os correlacionados às primeiras reflexões ou os correlacionados às reflexões tardias. A reverberância é correlacionada com as primeiras reflexões.

A reverberância ou tempo de decaimento inicial (EDT, do inglês *Early Decay Time*), é obtido a partir da análise da energia concentrada nas primeiras reflexões nas superfícies do ambiente. O EDT é definido como o tempo de decaimento dos primeiros 10 dB do decaimento de energia em um ambiente (METHA *et al.*, 1999).

Observa-se que para um mesmo tempo de reverberação o EDT pode ser diferente dependendo do comportamento da curva de decaimento do nível de pressão sonora de um ambiente, como pode ser visto na Figura 2.19.

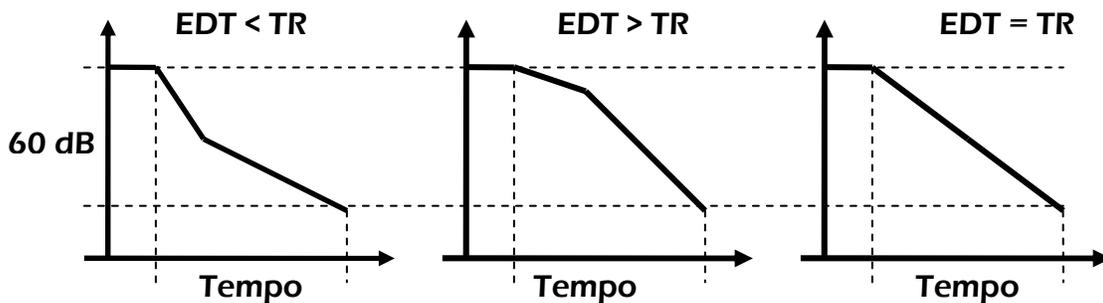


Figura 2.19. Diferentes valores de EDT para um mesmo valor de tempo de reverberação.

O EDT é sensível às superfícies do ambiente por ser composto das primeiras reflexões que chegam a um ponto receptor. O balanço da energia contida nestes primeiros instantes de decaimento de uma sala pode trazer uma sensação de maior definição do som ou mesmo uma sobreposição indesejada, tornando o som produzido sem distinção de timbre (KUTTRUFF, 1991).

Segundo Metha *et al.* (1999), um baixo valor de EDT pode trazer clareza no som reproduzido em um espaço, enquanto que quanto maior o valor de EDT, maior continuidade e reforço são atribuídos ao som.

2.5.2 Clareza e Definição

A análise das primeiras reflexões mostra que aquelas que chegam após 40 ms aos ouvintes podem dar a sensação de reforço do som produzido (EVEREST, 2001).

Kuttruff (1991) diz que ao analisar os resultados obtidos por Haas (1951), conclui-se que o tempo de atraso crítico que separa as reflexões destrutivas daquelas de ajudam a reforçar a frente de onda direta é algo em torno de 50 a 100 ms.

A Clareza (C_{80}) é definida como a relação logarítmica entre a energia sonora recebida nos primeiros 80 ms em um receptor e a energia existente após os 80 ms iniciais (METHA et al, 1999). Ela pode ser quantificada pelo índice de clareza obtido pela Equação (2.10).

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_0^{80ms} [p^2(t)] dt}{\int_{80ms}^{\infty} [p^2(t)] dt} \right\} dB \quad (2.10)$$

Sendo $p^2(t)$ a função do decaimento de pressão sonora da sala.

Os gráficos da Figura 2.20 mostram esquematicamente a alteração da área delimitada pelos primeiros 80 ms de acordo com a inclinação da curva de decaimento. Como a área demarcada até 80 ms no gráfico em “a” é menor em relação a área de 80ms a infinito, do que a área demarcada no gráfico em “b” em relação a área de 80ms a infinito, pode-se dizer que o C_{80} em “a” é menor que “b”.

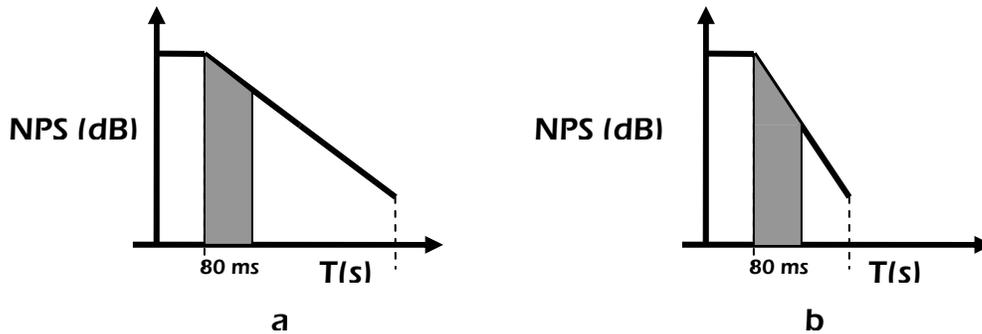


Figura 2.20. Diferentes valores de Clareza: a) um valor baixo de clareza para um decaimento linear; b) um valor alto de clareza para um decaimento linear. Fonte: Metha *et al.* (1999).

Valores de clareza entre +1 e -4 para as frequências de bandas de oitava de 500, 1000 e 2000 Hz, são considerados aceitáveis para salas de concerto, segundo Metha *et al.* (1999).

A Definição é obtida pela razão entre o valor da energia do decaimento dos primeiros 50 ms do tempo de reverberação sobre o decaimento total (KUTTRUFF, 1991). A Definição é obtida em percentual e dada pela Equação (2.11).

$$D = \frac{\int_0^{50ms} [p(t)^2] dt}{\int_0^{\infty} [p(t)^2] dt} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Analogamente à Clareza $p(t)$ é a função do decaimento da sala.

O uso da Definição é mais voltado para a inteligibilidade da palavra, pois esta foi utilizada como fonte para definição da compreensão silábica da palavra dentro de ambientes próprios (KUTTRUFF, 1991).

2.5.3 Intimidade e tempo de atraso inicial

A Intimidade é uma impressão subjetiva do tamanho do espaço, sendo diretamente proporcional à sensação volumétrica do espaço. Por exemplo, uma sala que estabelece uma sensação de proximidade entre a fonte e o ouvinte possui uma Intimidade maior que uma sala que produz uma sensação de distanciamento entre fonte e ouvinte.

Este parâmetro não é necessariamente correlato com a dimensão da sala, mas com um valor chamado Tempo de Atraso Inicial (ITDG – *Initial Time Delay Gap*). O ITDG é definido como a diferença entre os tempos de chegada do som direto e da primeira reflexão (METHA et al, 1999). Quanto menor for o ITDG, mais íntimo é considerado o ambiente. Um diagrama impulsivo pode ser visto na Figura 2.21.

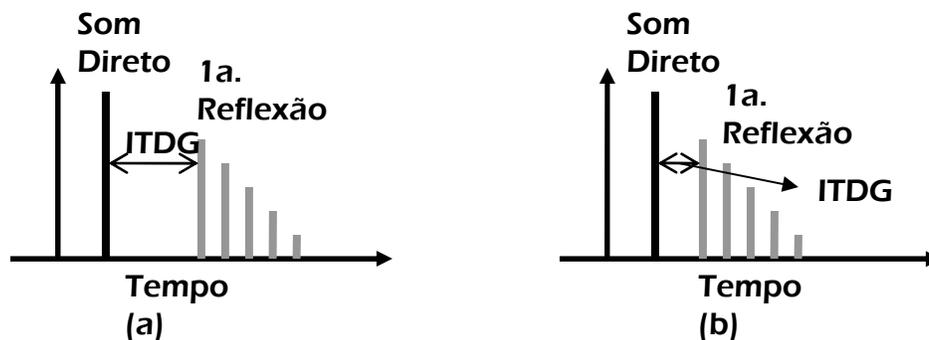


Figura 2.21. Exemplos de diferentes ITDGs: a) ambiente com baixa intimidade; b) ambiente com alta Intimidade.

A quantificação do Intimidade depende do tipo de finalidade do espaço. Tomando como exemplo a música, uma música de câmara necessita de mais intimidade, por ser executada em locais menores, do que música de orquestra. Um valor considerado bom para salas de concerto permeia os 16 ms.

2.5.4 Envolvimento ou lateralização

O parâmetro de Envolvimento pode ser definido como a sensação de envoltória espacial. Seria a mesma sensação do ouvinte se este estivesse envolto pela música. Este parâmetro é dependente de dois fatores importantes: a presença de reflexões laterais, alterando assim a largura aparente da sala, e a presença de reflexão difusa proporcionada pela textura das superfícies da sala (FIGUEIREDO, 2005). O Envolvimento pode ser obtido por dois parâmetros objetivos: a Fração Lateral (LF) e o Coeficiente de Correlação Cruzada Inter-Aural (IACC).

A determinação da Fração Lateral espacial é realizada a partir de dois microfones, um microfone omnidirecional e um microfone conhecido como microfone Figura “8”. Com um microfone captando a energia total e outro captando apenas a energia lateral, calcula-se a fração de energia que atinge o ouvinte lateralmente.

A Lateralização pode ser quantificada pela proporção da energia das reflexões que chegam nas laterais até 80 ms, similar à clareza, mas para as reflexões laterais (ISO 3382:1997) conforme visto na Equação (2.12).

$$LF = \frac{\int_{0,005s}^{0,080s} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080s} p^2(t) dt} \quad (2.12)$$

Onde p_L = pressão sonora instantânea medida no espaço com um microfone tipo Figura “8”.

O envolvimento pode ser quantificado a partir do fator IACC (*inter-aural cross correlation*) definido na equação 2.13. A equação 2.13 determina o coeficiente de correlação inter-aural a partir da diferença da pressão sonora existente entre os ouvidos.

$$\text{IACC}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_e(t) \cdot p_d(t + \tau) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_e^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_d^2(t) dt \right)^{1/2}} \quad (2.13)$$

onde : p_e = pressão medida no ouvido esquerdo;

p_d = pressão medida no ouvido direito.

τ é tomado na faixa de $-1\text{ms} < \tau < 1\text{ms}$, $t_1 = 0\text{ ms}$ e $t_2 \approx \text{TR}$. O valor máximo da $\text{IACC}(\tau)$ é o Coeficiente de Correlação Cruzada Inter-Aural IACC.

A determinação do IACC normalmente é feita com o auxílio de uma cabeça artificial que simula as mesmas interferências e atenuações no sinal que uma cabeça humana produz.

2.5.5 Calor e brilho

Nas salas de concerto, um parâmetro muito importante, caracterizado por um aumento no tempo de reverberação em baixas frequências em relação às altas frequências, é denominado calor ou calidez (BERANEK, 1962).

O calor pode ser determinado por uma comparação dos tempos de reverberação entre as baixas e as altas frequências, esta relação é chamada de Razão de Graves (BR, do inglês *Bass Ratio*), por se tratar de uma relação entre TR's de bandas de baixas frequências com as bandas de médias frequências (FIGUEIREDO, 2005). A Equação (2.14) mostra a relação utilizada para o cálculo.

$$BR = \frac{|TR_{125} + TR_{250}|}{|TR_{500} + TR_{1000}|} \quad (2.14)$$

Sendo: TR_i – Tempo de Reverberação na banda de frequência de oitava i .

Segundo Metha *et al.* (1999), valores recomendados para salas de concerto de Razão de Baixo estão entre 1,10 a 1,25 para Tempos de Reverberação maiores ou iguais a 2,2 segundos e valores entre 1,10 e 1,45 para Tempos de Reverberação menores que 1,8 s.

A sensação de brilho em um som produzido é decorrente de um certo aumento no tempo de reverberação percebido em altas frequências (FIGUEIREDO *et al.*, 2004).

O brilho de um som é quantificado a partir da razão entre valores do EDT para bandas de oitava em frequências consideradas altas em relação a médias frequências. A equação 2.15 mostra a relações para caracterização do brilho.

$$Br = \frac{EDT_{2000} + EDT_{4000}}{|EDT_{500} + EDT_{1000}|} \quad (2.15)$$

Metha *et al.* (1999) recomendam cuidados no uso de superfícies absorvedoras em altas frequências. O uso de materiais com um alto coeficiente de absorção pode prejudicar a sensação de brilho.

Muitos outros parâmetros e fatores são descritos e encontrados na literatura, mas os definidos segundo a ISO 3382:1997 foram descritos neste item. Muitos podem ser observados em artigos como o de Valadares (2004), porém todos são derivações ou correspondem de certa forma aos parâmetros denominados neste item.

3 Resposta impulsiva, modelagem numérica e auralização

Com o desenvolvimento computacional, o processamento de sinais se tornou uma ferramenta poderosa e mais presente no dia-a-dia. Dentre todas as técnicas utilizadas na área de processamento de sinais acústicos, a convolução de sinais permite que se implemente a auralização dos espaços.

Este capítulo abordará os processamentos necessários para a realização da auralização de espaços acústicos e de conceitos para a compreensão da metodologia adotada neste trabalho.

3.1 Resposta Impulsiva

Schroeder (1965) descreveu um novo método de medição utilizando impulsos para excitar um ambiente e, com a integração inversa das respostas destes impulsos (equação (3.1)), pode-se obter tempos de reverberação com mais precisão.

$$\langle s^2(t) \rangle = N_b \cdot \int_{-\infty}^0 r^2(t-\tau) d\tau \quad (3.1)$$

onde: $\langle s^2(t) \rangle$ = média quadrática das respostas de todas as possíveis curvas de decaimento, na banda N ;

$r^2(t-\tau)$ = respostas impulsivas para a banda do sinal de excitação considerando todos os sistemas interligados em série com o ambiente;

N_b = banda de frequência do decaimento.

As características acústicas de um ambiente não se limitam apenas ao controle do tempo de reverberação deste espaço, mas também da redistribuição de energia no mesmo. Para estes casos, considera-se não apenas a absorção sonora das superfícies, mas também as características reflexivas destas superfícies (BISTAFA, 2005).

A resposta impulsiva de uma sala está relacionada com sua geometria, portanto, não apenas as características de absorção das superfícies dos ambientes, mas também as características de difusão são parâmetros importantes para a caracterização desta resposta.

A resposta impulsiva pode ser definida como a função temporal da pressão sonora de um espaço acústico, obtida da excitação deste espaço como uma função similar ao delta de DIRAC (VORLÄNDER e BIETZ, 1994). Com a medição da resposta impulsiva da sala, obtém-se a função de transferência da sala e, a partir daí, os parâmetros correlacionados com a distribuição de energia interna e seus atributos subjetivos correlatos, como por exemplo a clareza (C_{80}), a reverberância (EDT), fração lateral (LF), Razão de Graves (BR) e brilho (Br). A Figura 3.1 descreve o diagrama esquemático para se obter uma resposta em frequência de um sistema.

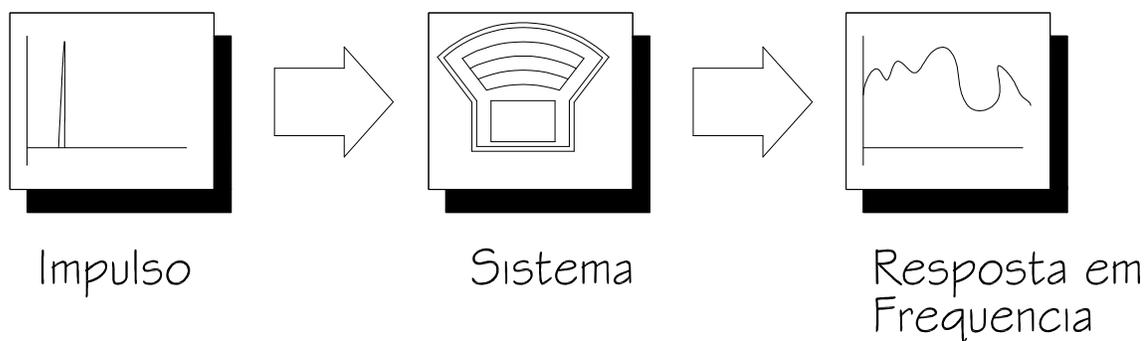


Figura 3.1. Diagrama esquemático para se obter uma resposta em frequência de um sistema a partir de uma excitação impulsiva, neste caso exemplificado pela planta de um auditório.

Os métodos utilizados para a obtenção da resposta impulsiva de um sistema são derivados de uma transformada inversa da resposta em frequência destes sistemas. Estes métodos são diferenciados pelas interações matemáticas necessárias para se obter a resposta em frequência

de um sistema e a excitação é dada por um sinal com muita energia concentrada em um curto espaço de tempo (FAHY e WALKER, 1998).

Este sinal de excitação, denominado impulso, normalmente é criado por um estouro de um balão de ar, ou um bater de palmas, ou acionamento de uma pistola de festim, ou até mesmo algum dispositivo construído justamente para realizar esta excitação (BARBO *et al.*, 2008; SUMARAC-PAVLOVIC *et al.*, 2008). O esquema elétrico para medição de resposta em frequência utilizando como fonte de excitação um pulso é representado na Figura 3.2.

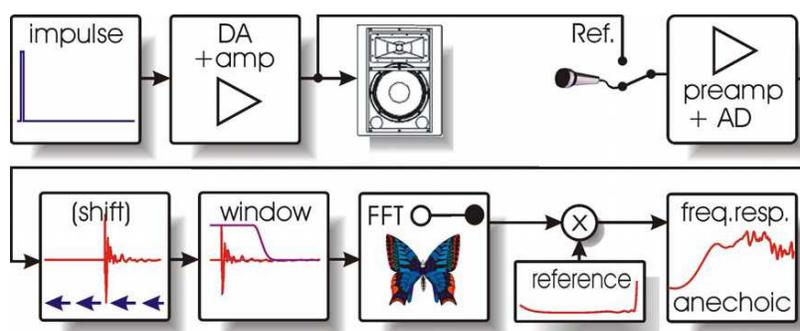


Figura 3.2. Diagrama elétrico de medição de resposta em frequência com excitação por impulso. Fonte: Müller & Massarani (2001).

O método da seqüência de comprimento máximo (MLS - *Maximum Length Sequence*), utilizando a técnica de correlação, é implementado tomando-se como sinal de excitação seqüências binárias dispostas em forma de trem de pulsos com um comportamento de período comparável a um *shift-register* (registrador de deslocamento). O sinal de excitação é composto por uma seqüência de pulsos com $L=2^k - 1$ estados binários diferentes. Devido à função de autocorrelação do sinal MLS, a resposta impulsiva de um sistema pode ser obtida a partir da correlação cruzada do sinal amostrado na saída do sistema pelo sinal MLS da entrada, de acordo com Mommertz e Müller (1995). A Figura 3.3 mostra o digrama elétrico de medição de resposta em frequência com excitação de sinal por MLS com pré-ênfase.

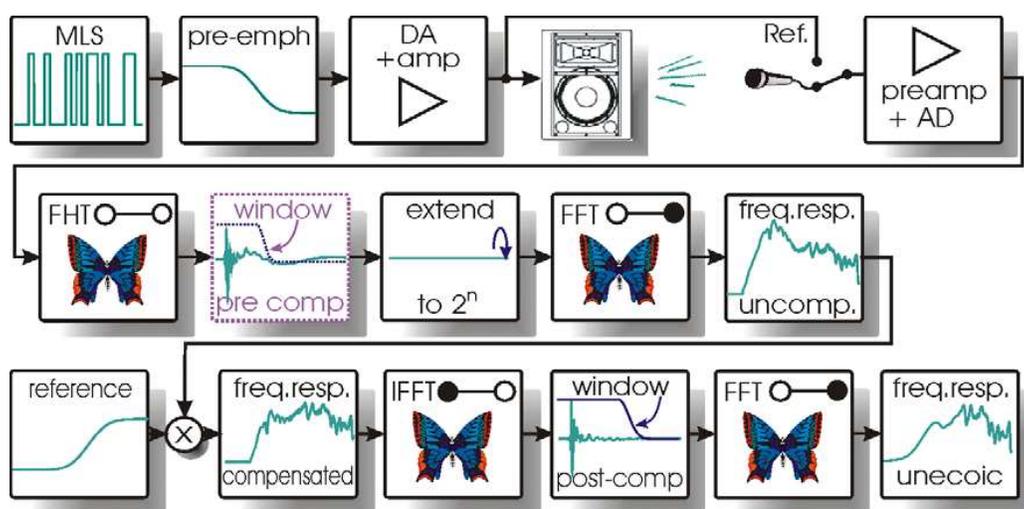


Figura 3.3. Diagrama elétrico de medição de resposta em frequência com excitação por MLS com pré ênfase. Fonte: Müller & Massarani (2001).

A correlação cruzada pode ser obtida pela transformada rápida de Hadamard que, segundo Mommertz e Müller (1995), tem uma performance computacional bem mais rápida. Porém, nos dias atuais, com a velocidade de processamento dos computadores já supre a vantagem apresentada pelo uso desta transformada.

A técnica de MLS é vulnerável a variações e não-linearidades do meio, como alteração de temperatura, umidade ou condição de campo acústico, bem como alteração decorrente do tempo de uso do sistema de excitação do sinal. Esta técnica torna-se mais utilizada em condições de controle do campo acústico, como laboratórios e salas fechadas, não sendo recomendada para espaços com aberturas ou que tenha uma alteração constante do meio de medição (SVENSSON e NIELSEN, 1999).

Segundo Müller e Massarani (2001), a técnica de medição de resposta impulsiva utilizando como sinal de excitação um sinal de varredura possui muitas vantagens sobre a técnica de MLS. A técnica utilizando sinal de varredura de senos possui uma boa isolamento dos componentes de distorção harmônica. Estes componentes ficam alocados no final da Resposta Impulsiva obtida e podem ser eliminados a partir de um janelamento. Apenas o tempo de

reprodução do sinal de excitação precisa ser grande o suficiente para que a resposta impulsiva contenha os valores de interesse e no final o resultado das possíveis distorções.

A Figura 3.4 mostra o diagrama elétrico de medição da resposta impulsiva com excitação por varredura de senos.

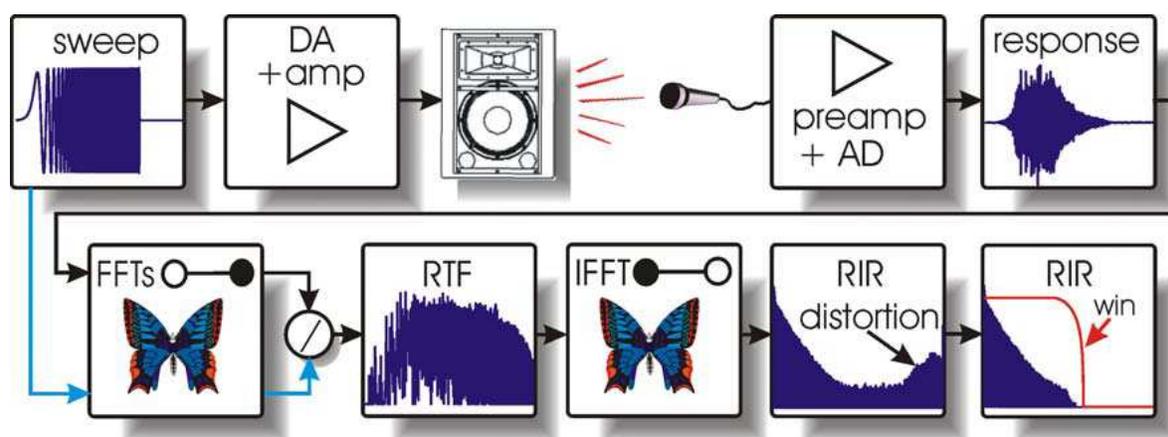


Figura 3.4. Diagrama elétrico de medição de resposta impulsiva com excitação por varredura. Fonte: Müller & Massarani (2001).

A resposta impulsiva de um sistema traz a informação de suas propriedades. No caso do sistema ser uma sala ou um espaço acústico a resposta impulsiva pode trazer as características direcionais e espaciais entre duas posições de fonte e microfone (KUTTRUFF, 1991). Segundo Kuttruff (1991), a função de transferência de um sistema pode ser obtida a partir de uma transformada de Fourier da resposta impulsiva. Um fato importante é que o caminho contrário pode ser obtido pela transformada inversa de Fourier para a resposta em frequência da sala.

As informações que podem ser obtidas pela resposta impulsiva de uma sala são mais elaboradas que o simples decaimento sonoro ou Tempo de Reverberação. Valores referentes à distribuição de energia da sala nas primeiras reflexões e a distribuição de energia nas frequências são fatores importantes para definir atributos acústicos ligados à percepção sonora que foram explicados na seção 2.5.

3.2 Modelagem numérica de salas

Com o crescimento da capacidade de processamento dos computadores, a modelagem numérica se tornou uma prática muito freqüente na análise e no projeto de espaços, possibilitando desde visualizações de desenhos e cálculos numéricos em computadores, até simulações em três dimensões e representação fiel à realidade a partir de várias técnicas de modelagem, inclusive de campo acústico dos espaços (VORLÄNDER, 2008).

Comparativos de medições reais de salas e de métodos numéricos foram realizados de forma a qualificar os programas de simulação. Os chamados “*Round Robin*” foram comparativos realizados entre parâmetros medidos em uma sala e os resultados das simulações realizadas por programas que participaram do comparativo (VORLÄNDER, 1995).

Outros dois comparativos foram realizados, sem a distinção dos programas participantes, mas com observação dos métodos de cálculo utilizados (BORK, 2000). Uma das observações pertinentes foi que os programas que utilizaram o coeficiente de espalhamento obtiveram uma maior proximidade aos valores dos parâmetros obtidos com as medições (GOMES *et al.*, 2004).

Os métodos utilizados nos programas de simulação têm como princípio básico obter a Resposta Impulsiva da sala simulada e, a partir desta, obter os fatores referentes às características da sala como Tempo de Reverberação, EDT, ITDG, C_{80} , D_{50} etc.

Dentre os métodos para determinação da resposta impulsiva, os mais consagrados, segundo Melo *et al.* (2007), são os de traçado de raios, o das imagens ou das fontes virtuais, o de traçado de cones ou de pirâmides e o de transição de energia

Alguns métodos serão abordados sucintamente para compreensão de seu funcionamento e suas características favoráveis à implementação.

3.2.1 Método do traçado de raios

O método de traçado de raios é um algoritmo que toma como base a geometria espacial objetivando traçar o caminho dos raios acústicos da fonte sonora até o receptor (KUTTRUFF, 1993). Para isto a fonte realiza a dispersão desta energia em várias formas como raios, feixes cônicos, piramidais e partículas com propagação em linha reta e com perda de energia para cada reflexão de acordo com as características das superfícies internas (LEHNERD e BLAUERT, 1992). A Figura 3.5 mostra esquematicamente o princípio do traçado de raios.

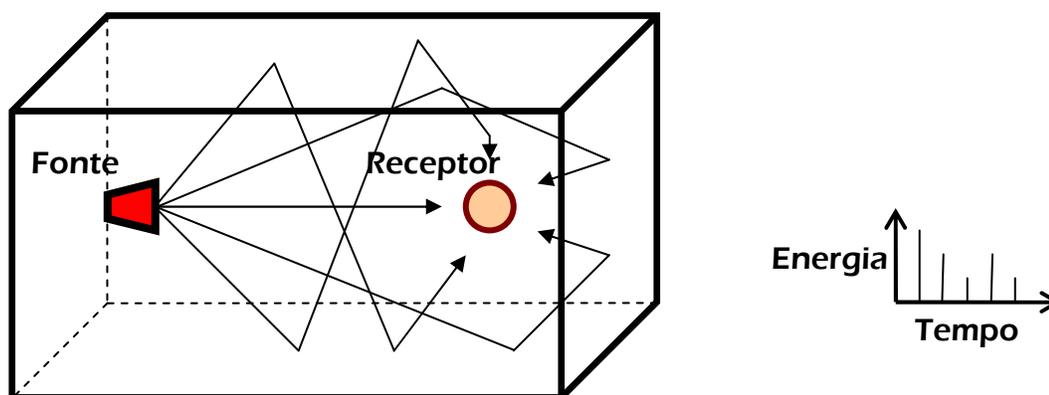


Figura 3.5. Diagrama esquemático do método de traçado de raios com gráfico representativo da energia de cada reflexão que chega ao receptor.

O algoritmo do método de traçado de raios toma como base as reflexões especulares, dependendo das características de absorção das superfícies, estas reflexões perdem a energia. No caso de superfícies difusas, o algoritmo toma como base um ângulo da direção especular de reflexão e um ângulo que representa o espalhamento da energia do raio incidente (GOMES *et al.*, 2007). Os valores a serem computados são a quantidade de energia captada pelo receptor e o tempo de chegada.

O receptor normalmente é modelado como um ponto no espaço. Fisicamente, é necessário um limite de volume para obter os raios que atingem o receptor (KUTTRUFF, 1991). Para este problema, cria-se uma detecção espacial dos raios como se o receptor fosse considerado como um certo volume próximo ao ponto considerado. Esta detecção é realizada para todos os raios que atingem o volume considerado originando assim uma detecção do raio acústico produzido pelo algoritmo (LEHNERD e BLAUERT, 1992).

A criação de um volume finito do receptor traz problemas de resolução computacional, dentre eles, o problema de detecção múltipla e de detecção inválida (LEHNERD, 1993).

A detecção múltipla ocorre quando vários raios de uma mesma trajetória são detectados em um elemento receptor. A detecção inválida é observada quando o raio de ação de um receptor ultrapassa o limite geométrico de uma superfície (LEHNERD, 1993). Estes erros podem ser visualizados na Figura 3.6.

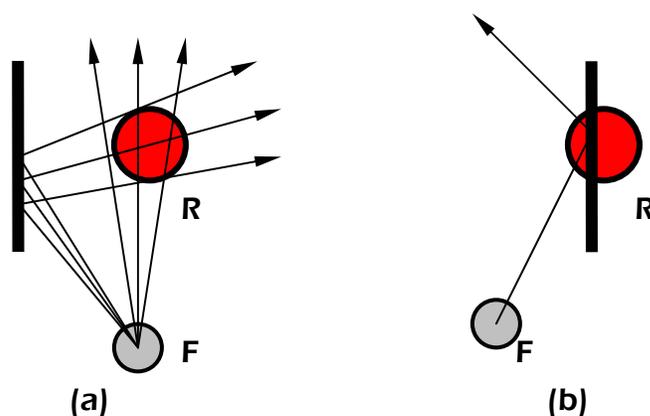


Figura 3.6. Problemas decorrentes do algoritmo do método de traçado de raios: a) problema das múltiplas detecções de uma mesma trajetória; b) problema de detecção inválida.

Em implementações mais recentes destas técnicas o erro de detecção múltipla já não faz parte das possíveis desvantagens do uso do método de traçado de raios.

O tamanho do receptor é definido, segundo Lehnerd e Blauert (1992), para que todo o raio seja aproveitado e detectado para contabilizar a energia no receptor. O raio da esfera considerada como detector é obtido pela Equação (3.2).

$$r_e = l_{\max} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{N}} \quad (3.2)$$

Onde: r_e – raio da esfera considerada como receptor;

l_{\max} – comprimento do raio detectado;

N – número de raios detectados.

A quantidade de raios utilizada para o cálculo no método de traçado de raios exige um número em função da área do modelo e do tempo. Esta relação é apresentada na Equação (3.3).

$$N \geq \frac{8\pi c^2}{A} t^2 \quad (3.3)$$

Onde: N – número de raios emitidos;

A – área da parede refletora;

c – velocidade de propagação sonora;

t – tempo de viagem do raio.

Pela Equação (3.3) é percebido o aumento computacional necessário para o cálculo da resposta impulsiva. Tem-se o aumento no número de raios com o quadrado do tempo de viagem dos raios.

A resposta do método de raios é uma distribuição da energia no tempo, a qual é convertida em um impulso equivalente, porém com valores de pressão no tempo (KUTTRUFF, 1991). Para cada banda de frequência é realizado o cálculo da resposta impulsiva, como resultado da soma dos impulsos equivalentes. A densidade temporal, que é o produto da quantidade de impulsos pelo tempo da resposta, é um problema na elaboração dos componentes de reflexões tardias do impulso.

3.2.2 Método de fontes virtuais

Quando uma fonte sonora emite um som que incide sobre uma superfície, seu espelhamento geométrico pode ser considerado para localização e estudo da propagação sonora da energia produzida por esta fonte (KLEINER, 1993; KUTTRUFF, 1991). O esquema básico para compreensão do método pode ser observado na Figura 3.7.

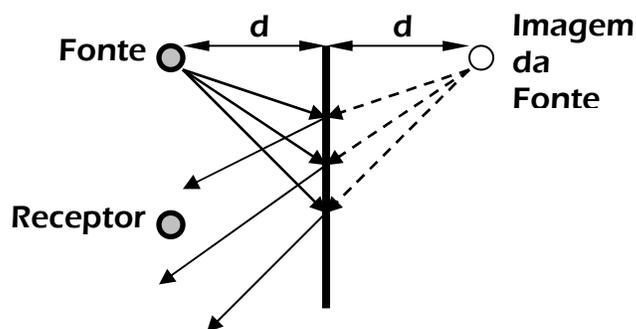


Figura 3.7. Imagem de uma fonte segundo método de fontes virtuais.

O comportamento do raio sonoro é observado a partir de composições de imagens de acordo com as reflexões. Supondo um raio que incide em uma parede, a primeira reflexão é chamada de reflexão de primeira ordem. Seguindo a propagação do raio, a segunda reflexão é chamada de reflexão de segunda ordem e assim sucessivamente, como visto na Figura 3.8.

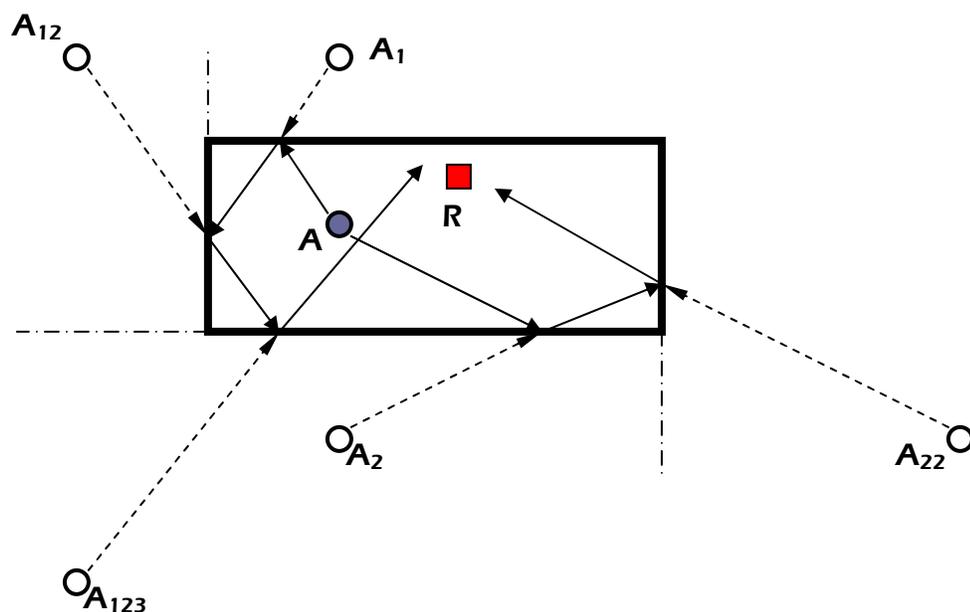


Figura 3.8. Ordem das reflexões do método de fontes virtuais.

De acordo com a Figura 3.8, os índices indicam a ordem de reflexão da imagem, sendo A_1 a primeira ordem, A_{12} a segunda ordem de reflexão. Ou seja, N paredes planas gerarão N reflexões de primeira ordem, que gerarão $(N-1)$ reflexões de segunda ordem cada uma, num total de $N(N-1)$ reflexões. Pode-se, portanto obter a equação do número de imagens obtidas utilizando-se a Equação (3.4).

$$n_{im}(i_0) = N \frac{(N-1)^{i_0} - 1}{N-2} \quad (3.4)$$

Sendo: n_{im} = número total de imagens obtidas;

i_0 = ordem das reflexões;

N = número de superfícies planas da sala.

Para cada reflexão calculada, a energia do traço obtido deve ser decrescida do valor do coeficiente de absorção sonora da superfície e da propagação segundo a lei do inverso do quadrado, para a propagação em condições de campo livre, considerando a fonte pontual.

A Equação (3.4) mostra o aumento exponencial do número de fontes de acordo com a quantidade de ordens necessárias para o método de fontes virtuais. Para diminuir o esforço computacional sobre este cálculo, um teste de visibilidade é realizado para limitar a quantidade de ordens necessárias para o cálculo da resposta impulsiva da sala uma validação das projeções de fonte que realmente interceptarão o receptor. Como dito anteriormente esta validação pode ser feita com um método inverso de traçado de raios (LEHNERD e BLAUERT, 1992).

O método das fontes virtuais, assim como o de traçado de raios, é um método robusto para a obtenção da resposta impulsiva (LEHNERT, 1993), alguns problemas foram encontrados quando aplicados para superfícies curvas. Para estes casos, pode-se utilizar uma aproximação das superfícies, no caso de curvas, utilizando planos próximos ou superfícies triangulares. Mas este método pode prejudicar o uso para auralização.

Mesmo realizando um tratamento geométrico de cantos existentes como a união de paredes das salas (LOKKI *et al.*, 2002), o que aumenta significativamente o tempo de processamento computacional (VORLÄNDER, 1989), é comum o uso do método de fontes virtuais juntamente com outros métodos de determinação numérica de Resposta Impulsiva.

3.2.3 Método do traçado de pirâmides

Tomando como base o método de traçado de raios geometricamente, o método do traçado de pirâmides tem como princípio o traçado de feixes piramidais refletidos pelas superfícies. A zona de sombra é retirada e a área refletida é associada a uma fonte (LEWERS, 1993). Este efeito é observado na Figura 3.9.

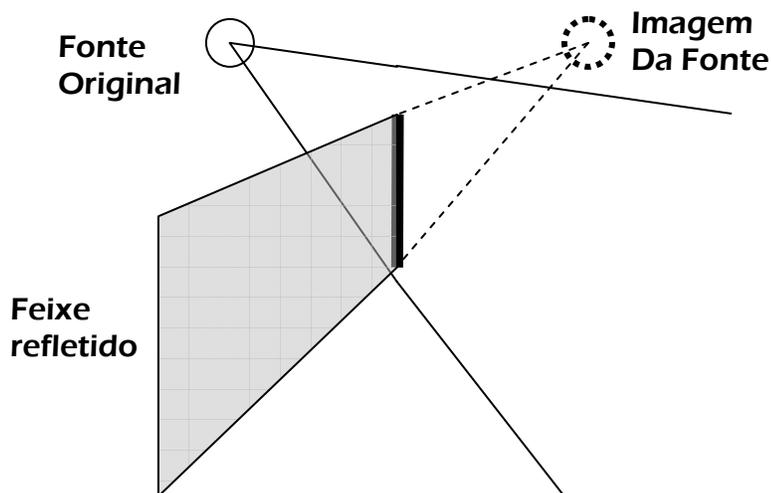


Figura 3.9. Esquema de reflexão do método de traçado de pirâmides quando o feixe original encontra uma superfície.

No método de traçado de pirâmides, todos os caminhos potenciais podem ser enumerados e representados pelo feixe refletido, cobrindo todos os espaços nas direções de radiação da fonte sonora.

Para o método de traçado de pirâmides, a fonte emite raios centralizados nos triângulos, sendo estes uma aproximação de icosaedros sobrepostos que definem em sua base a propagação esférica da fonte. Neste caso, pode-se ignorar o tamanho da fonte, e esta pode ser representada pontualmente (STEPHENSON, 1996), como visto na Figura 3.10.

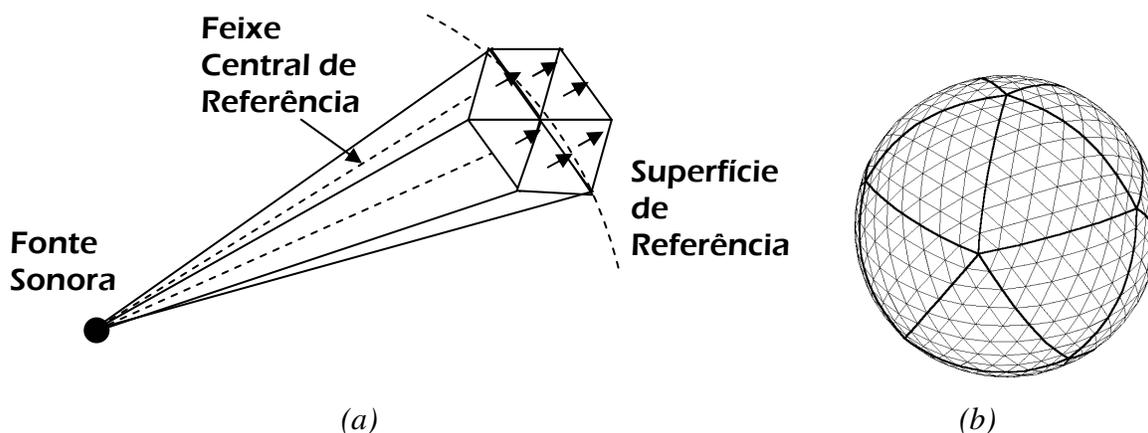


Figura 3.10. a) Esquema de traçado de pirâmides ;b) representação espacial. Fonte: Camilo e Tenenbaum (2006).

Apesar da complementação espacial do método em relação ao método de traçado de raios, quando os feixes atravessam mais superfícies, dependendo do ângulo de incidência, este não se divide, pois o feixe de propagação é dependente do feixe central de referência visto na Figura 3.11 (STEPHENSON, 1996).

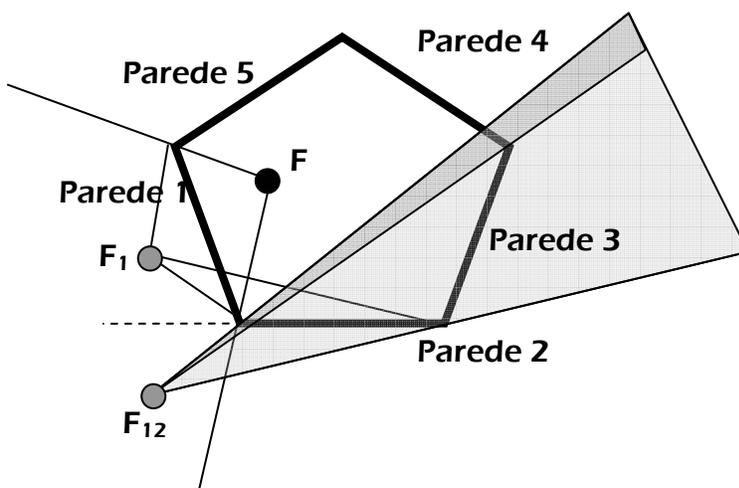


Figura 3.11 – Limitação do método de traçado de pirâmides, onde o feixe produzido por F_{12} é representado como único e sem reflexão da parede 4.

Os métodos de traçado aqui discutidos, normalmente são utilizados para determinação de reflexões iniciais por serem bons representantes de reflexões especulares. Para determinação

de reflexões não-especulares o uso de outros algoritmos são utilizados para obtenção da resposta impulsiva modelada, como por exemplo o de radiossidade e de transição de energia (LEWERS, 1993).

3.2.4 Uso da transição de energia.

O uso da técnica de transição de energia ou da radiossidade acústica consiste, em substituir as superfícies por elementos discretizados e conectados por “nós”, junto com a fonte, e distribuir o fluxo de energia dos “nós” para o receptor e entre os “nós”, formando assim uma malha de distribuição (LEWERS, 1993), como mostrado na Figura 3.12.

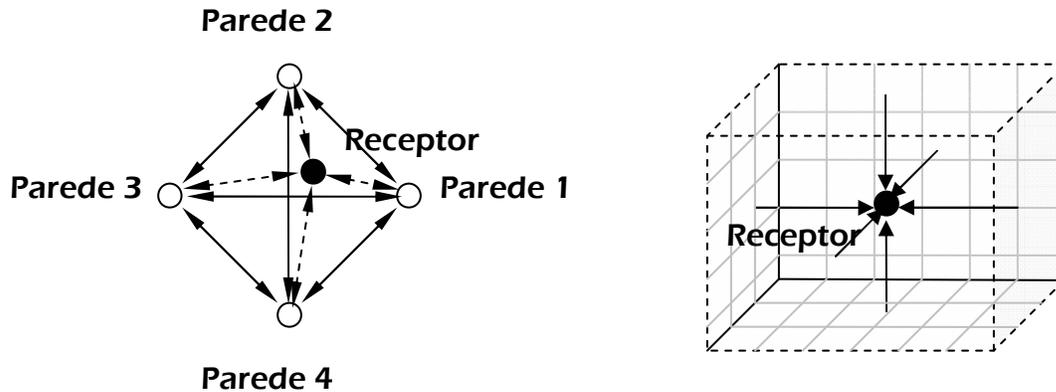


Figura 3.12. Diagrama da técnica de transição de energia.

O método de transição de energia parte do princípio de que todas as superfícies podem ser discretizadas em elementos que refletem energia e possuem um certo espalhamento que transfere a energia da direção especular. Segundo Lewers (1993), este fenômeno atribui um coeficiente de espalhamento para cada superfície dado por $(1-\delta)$ e não pelo coeficiente de absorção sonora $(1-\alpha)$. A energia removida da direção especular é computada como energia da

parte das reflexões tardias da Resposta Impulsiva calculada. Este método acaba sendo mais utilizado para reflexões especulares sem um tratamento de difusão, quando calculadas, as reflexões das superfícies (CAMILO e TENENBAUM, 2006).

3.2.5 Solução numérica da equação de onda

Métodos baseados na solução numérica da equação de onda discretizam as superfícies e volumes em elementos menores solucionando a equação para cada elemento (FAHY e WALKER, 2004).

Para estes métodos, os limites geométricos precisam ser bem definidos para que a interação destes com os fenômenos internos ao volume ou superfície em questão possam representar com precisão satisfatória os fenômenos físicos reais (SAVIOJA, 2000).

Um destes métodos é o método de elementos finitos que consiste na solução da equação de Helmholtz para todos os elementos que discretizam um volume. A partir desta solução para todos os elementos, a resposta em frequência entre os pontos de fonte e receptor é obtida. A Figura 3.13 mostra a discretização do volume de um ambiente.

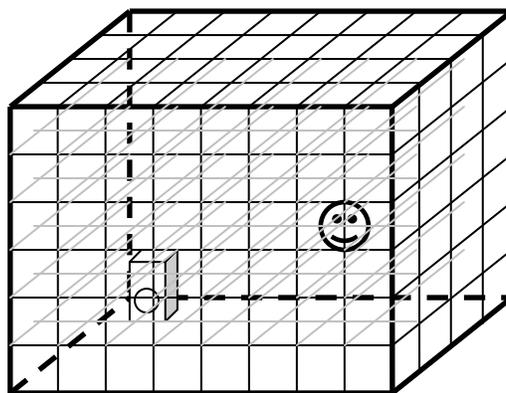


Figura 3.13. Discretização de um volume segundo o método dos elementos finitos.

A vantagem do método de elementos finitos é seu uso para casos em que fenômenos acústicos precisam ser estudados com mais precisão como congruências geométricas ou união de paredes.

A solução da equação de onda pelo método dos elementos finitos tem como resultado a resposta em frequência do sistema discretizado (SAVIOJA, 2000). Para obter a Resposta Impulsiva basta realizar uma transformada inversa de Fourier e as características da sala podem ser obtidas.

Quanto mais discretizado o volume, mais tempo de processamento computacional é necessário e os limites do sistema precisam ser bem definidos com relação à absorção, reflexão e acoplamento dos elementos (FAHY e WALKER, 2004).

O método de solução da equação de onda por elementos de contorno utiliza a discretização do contorno do sistema, no caso, da sala a ser modelada. Nesta técnica, a solução é obtida através da função de Green, onde a integral é formada por elementos discretos. As pressões em cada elemento são correlacionadas linearmente entre si, junto com a velocidade de partícula em cada elemento, formando o campo sonoro.

A vantagem desta técnica de elementos de contorno perante a técnica de elementos finitos é a quantidade de elementos necessários para a solução da equação de onda, sendo bem menor. As matrizes resultantes, porém, são bem mais densas e não possuem uma simetria que permite técnicas comuns de solução de matrizes.

Assim como no método de elementos finitos, os elementos de contorno são limitados para ambientes grandes e para frequências muito altas, que necessitam de um número grande de elementos de discretização.

3.2.6 Métodos estatísticos

Os parâmetros acústicos relacionados a ambientes internos são baseados no estudo das reflexões das ondas sonoras em suas superfícies. A definição do campo formado pelas reflexões internas é conhecida como campo reverberante. O campo reverberante é calculado e obtido por métodos estatísticos (FERNANDES JÚNIOR, 2005).

De acordo com Kuttruf (1991), os métodos estatísticos são utilizados para obtenção da cauda reverberante da resposta impulsiva. Esta parte da resposta impulsiva possui um comportamento com baixo grau de decaimento da densidade de energia devido às reflexões tardias. Estes métodos são utilizados complementarmente a outros, formando métodos híbridos para cálculo do modelo computacional.

3.2.7 Métodos híbridos

O uso de mais de um método de modelagem computacional para a construção da resposta impulsiva é utilizado para suprir deficiências características de cada. A resposta impulsiva da modelagem de um espaço pode ser calculada por métodos geométricos e complementarmente por métodos de resolução da equação de onda, por exemplo.

A limitação dos métodos geométricos ocorre nas altas frequências devido à consideração de que os raios propagados têm a maior parte da sua energia concentrada na zona especular, não obtendo uma boa definição da energia contida fora da zona especular. Nos métodos que utilizam a discretização do ambiente, as superfícies difusas são consideradas e a energia que definirá a cauda reverberante da Resposta Impulsiva da Sala é calculada com uma precisão maior que nos métodos geométricos (CAMILO e TENEMBAUM, 2006).

A determinação do método a ser utilizado para a técnica de modelagem computacional dependerá da precisão necessária para alcançar uma boa reprodução da Resposta Impulsiva observando como parâmetros a faixa de frequência de interesse e o volume da sala a ser modelada (FERNANDES JR, 2005).

3.3 Auralização

Segundo Vorländer (2008), a auralização é a técnica de tornar audíveis arquivos sonoros criados através de medição, síntese ou simulação.

A auralização é responsável por converter sinais anecóicos, sem nenhuma impressão de espaço, em sinais que podem ser percebidos como se fossem gerados com uma certa ambientação (KLEINER *et al.*, 1993).

O termo “auralização”, segundo Kleiner (1993), foi utilizado pela primeira vez por Mathay (1913) para indicar interpretação musical e depois incluída por Martin (1952). O termo deriva da ideia de visualização do som.

Para criar uma ambientação que possa ser comparável a uma execução real do sinal sonoro no ambiente modelado, deve-se tomar o cuidado de imprimir todos os parâmetros pertinentes no sinal anecóico. Estes sinais são responsáveis pela coloração, efeito de posição, profundidade, espacialidade, continuidade do sinal reproduzido entre outros parâmetros.

A principal ferramenta normalmente utilizada para criar esta impressão é a convolução do sinal anecóico ($s(t)$) com a resposta impulsiva do ambiente ($f(t)$), que se deseja utilizar como base da impressão. O resultado é o sinal anecóico com a impressão do filtro da resposta impulsiva do ambiente ($g(t)$). Este procedimento é representado na Figura 3.14.

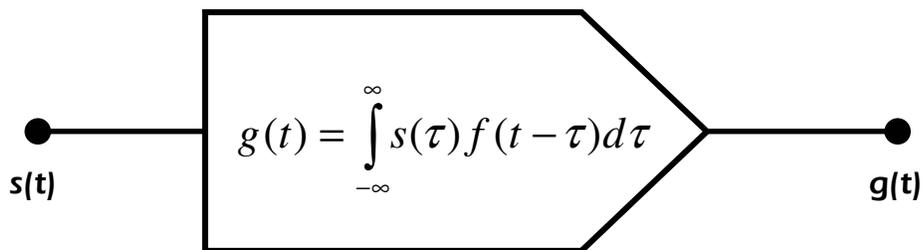


Figura 3.14. Convolução do sinal da fonte $s(t)$ com o filtro da resposta impulsiva $f(t)$ para obter o sinal de recepção $g(t)$. Adaptado de: Vorländer (2008).

Os métodos de modelagem numérica estudados no item anterior são os mais utilizados para se obter a resposta impulsiva. Estes métodos são utilizados por programas que realizam a criação da resposta impulsiva da sala a partir de ecogramas.

Segundo Vorländer (2008), o processo de auralização pode ser separado em três partes: o sinal inicial, o processo de auralização e o tratamento do sinal para apresentação.

3.3.1 Sinal inicial ou de entrada

O sinal inicial deve ser um sinal sem nenhuma impressão espacial gravado em ambiente anecóico. Os sinais utilizados como amostra normalmente são gravados apenas com a impressão temporal do instrumento como reverberação interna, tipo de ataque e continuidade das notas musicais (GODENBERG, 2005).

A gravação deste sinal demanda o uso de uma boa técnica que permita sua reprodutibilidade com clareza e com todas as informações necessárias dentro da faixa de frequência de interesse (FARIA, 2005). Normalmente esta faixa de frequência compreende o intervalo de 20 a 20000 Hz.

A transformada de Fourier é uma ferramenta de processamento de sinais muito importante para transformar sinais no domínio do tempo em sinais no domínio da frequência. Por se tratar de um processamento de funções contínuas, é comum o uso da transformada discreta de Fourier para retirar uma amostra de um sinal a partir do processo de janelamento. Este processo de janelamento acaba tirando a continuidade do sinal, acarretando o aparecimento de fenômenos indesejáveis na análise de sinais. Este fenômeno resultante do processo de janelamento, em particular, é conhecido como *leakage* (ou vazamento) (FAHY e WALKER, 1998).

Computacionalmente, a frequência de amostragem para gravação precisa ser, pelo menos, o dobro da frequência máxima de reprodução (FAHY e WALKER, 1998). Para a transformada discreta de Fourier, este requisito tende a impedir problemas de resolução causados pelo princípio de Nyquist, para que não ocorra uma reprodução de sinais com frequências menores não existentes no sinal, o *aliasing*. O fenômeno de *aliasing* é observado na Figura 3.15.

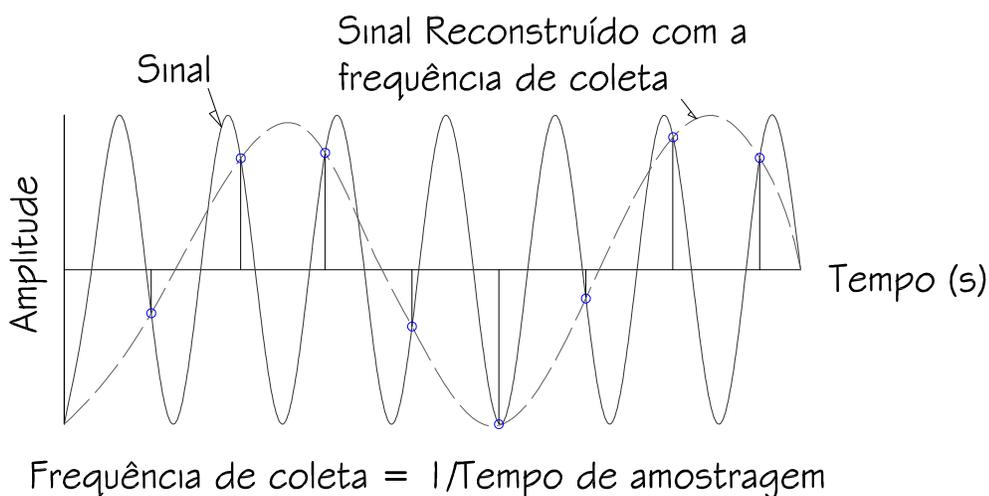


Figura 3.15. Fenômeno de aliasing de um sinal.

Para a Figura 3.15, considerando um sinal a coleta ou amostragem do sinal é realizada numa frequência dada por $1/\text{tempo de amostragem}$, e representado por traços pretos com círculos. Caso a frequência de coleta não seja suficiente para caracterizar o sinal a ser coletado (pelo

menos o dobro da frequência do sinal), a impressão dada pela coleta do sinal é de que um sinal com uma frequência menor é que está sendo coletado, e não o sinal original, como visto na Figura 3.15 o sinal tracejado.

Não apenas os requisitos de amostragem do sinal devem ser observados, mas a qualidade do sinal com relação a distorções e diretividade da fonte também devem ser considerados para que este sinal possa ser utilizado como sinal de entrada. Gravações de instrumentos individuais proporcionam uma maior percepção das possíveis variações do sinal gravado que uma gravação de vários instrumentos juntos (VORLÄNDER, 2008).

A obtenção de um sinal inicial necessita que este não contenha nenhuma impressão espacial; comumente são realizadas gravações de sinais anecóicos em câmaras ou ambientes que não causem uma impressão espacial na gravação.

Observada a gravação, ou obtendo um sinal inicial confiável, processos referentes à filtragem e alocação de receptor são necessários para obter a melhor representação da propagação das ondas sonoras geradas pela fonte.

O sinal deve representar o propósito da auralização como, por exemplo, uma verificação de ambientação para a fala deverá conter uma amostra de um discurso ou de uma locução. No caso de observação de nuances de auditórios, instrumentos musicais em performance solo ou em conjunto deverão ser utilizados como fonte para gravação do sinal de entrada.

Na busca de uma condição real, a gravação em dois canais é representativa da audição humana, e normalmente realizada para obtenção de sinais binaurais (FARIA, 2005). A tecnologia binaural refere-se ao conjunto de técnicas necessárias para reproduzir a audição, o que pode ser considerado como a gravação e reprodução das pressões sonoras que chegam ao tímpano. Para este tipo de gravação, utiliza-se um processamento no sinal inicial que representa a influência da cabeça humana (HRTF – *Head Related Transfer Function*), ou o uso de uma cabeça artificial (*Dummy Head*).

3.3.2 Processamento do sinal, convolução e filtragem

A simulação da sala para a construção da função de transferência relacionada a uma posição de fonte e receptor nesta sala é o passo inicial para realização da auralização segundo Everest (2001). Dentro da simulação, os parâmetros conhecidos da sala como geometria e características acústicas das superfícies são selecionados e introduzidos, de acordo com o espaço que se deseja simular.

De acordo com Thaden (2005), a convolução é o processamento principal para a realização da auralização. O conceito de convolução pode ser expresso como o operador matemático que, a partir de duas funções matemáticas, resulta numa terceira função matemática com características das duas funções anteriores.

Dadas duas funções matemáticas no domínio do tempo $s(t)$ e $f(t)$, a convolução entre estas funções pode ser definida como a integral do produto destas duas funções depois de uma delas ser invertida e deslocada para depois realizar o produto entre elas. Esta operação pode ser vista esquematicamente na Figura 3.16.

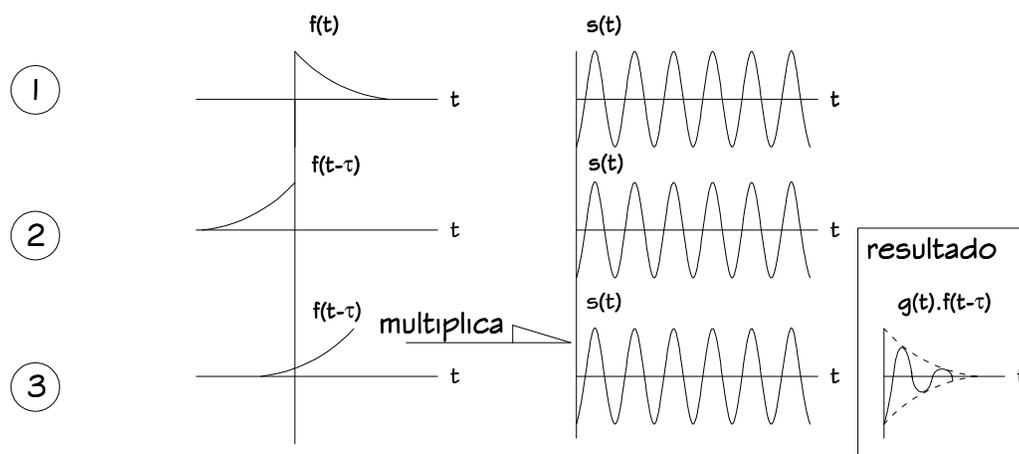


Figura 3.16. Esquema de realização de uma convolução entre dois sinais.

A Equação (3.5) é a formulação matemática da convolução dos sinais apresentados na Figura 3.16.

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (3.5)$$

Onde: $g(t)$ = é a função resultante da convolução;
 $s(t)$ = é a função de entrada da convolução;
 $f(t)$ = é a função de filtragem (segundo Vorländer (2008)).

Percebe-se que o sinal representado pela função $s(t)$ acaba recebendo a impressão matemática do sinal representado pela função $f(t)$. Desta forma, a convolução utiliza um sinal referente à resposta impulsiva de um ambiente para modular suas características em outros sinais, criando a impressão espacial de um ambiente num sinal.

A impressão da interferência de uma cabeça humana também pode ser colocada em um sinal para causar uma reprodução muito próxima a uma sensação real de posicionamento e direcionamento do som.

Para cada ouvido, existe uma Resposta impulsiva representativa das interferências causadas pela cabeça e torso. Estas respostas impulsivas podem ser obtidas com medições realizadas com torsos artificiais ou até mesmo medições realizadas nos canais auditivos de pessoas (PAUL, 2008).

Outra possibilidade para utilizar as HRTF para auralização dos sinais é o uso de funções de transferência fornecidas por fabricantes de torsos artificiais e já incorporadas em programas de simulação. Nos programas de simulação que também realizam a auralização, a criação de sinais binaurais para reprodução já realizam a convolução de sinais simulados a partir de modelos computacionais e de parâmetros de localização de fonte e receptor.

3.3.3 Reprodução do sinal

A convolução do sinal de entrada pela resposta impulsiva de um ambiente não é o único processamento existente nas técnicas de auralização. O processamento utilizado para que se tenha um sinal mais próximo possível das condições reais exigem outros detalhes como a utilização de tecnologia binaural de reprodução, a qual é baseada no fato de se causar a impressão espacial nos ouvidos (FIGUEIREDO, 2005).

As técnicas utilizadas para reprodução podem ser agrupadas, segundo Faria (2005), em dois tipos principais: a técnica de reprodução binaural, e a técnica de reprodução multicanal.

A reprodução binaural pode ser realizada a partir do uso de *headphones*, ou fones de ouvido com o sinal separado para causar a sensação em cada um dos ouvidos. Utiliza-se uma derivação desta técnica para o caso de utilizar-se um ambiente anecóico e dois altofalantes, com o cuidado de cancelar a interferência cruzada entre os dois canais de reprodução. Esta interferência consiste no ouvido direito escutar parte do som produzido para o ouvido esquerdo e vice-versa (EVEREST, 2001).

O uso de técnicas de reprodução multicanal exige um processamento de separação dos canais para criar uma imersão da cabeça dentro do espaço compreendido entre os altofalantes. Dentre estas técnicas, as principais são: o processamento estéreo, o processamento mono, o Surround 5.1 e o sistema Ambisonic. Outros sistemas foram criados e aperfeiçoados, mas segundo Faria (2005), todos foram derivados de vários altofalantes com sinais processados, a fim de criar uma imersão espacial.

A Figura 3.17 mostra esquematicamente as técnicas de reprodução de sinais processados para auralização. A partir das respostas impulsivas binaurais, para cada ouvido, a convolução do sinal anecóico com a resposta binaural é realizada para ser utilizado na reprodução. O processo para reproduzir o som convoluído pode ser escolhido entre reprodução binaural (equalização de fone de ouvido e cancelamento de interferência cruzada) ou multicanal (processamento estéreo,

processamento mono, decodificador *ambisonic* e *surround* 5.1). Para o caso de reprodução binaural, a HRTF é necessária.

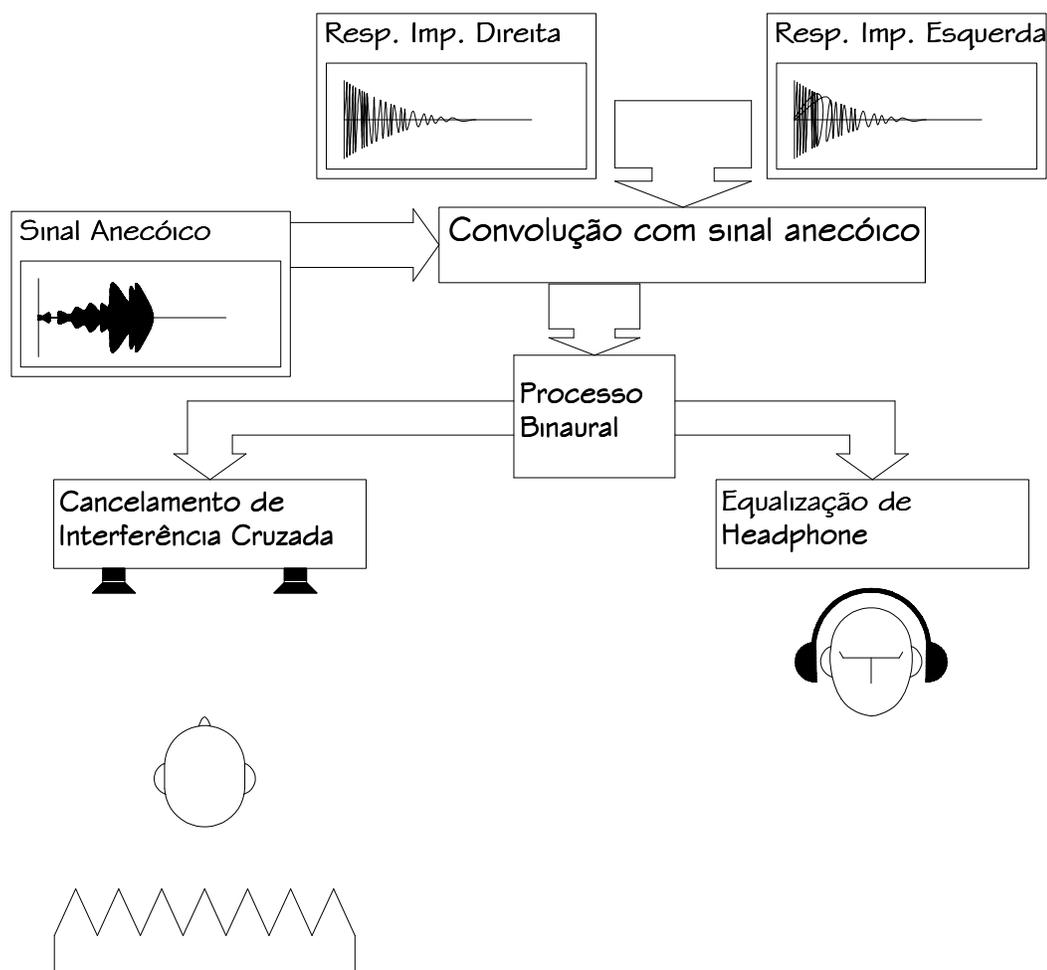


Figura 3.17– Técnicas de reprodução de sinal para auralização de sinal binaural. Adaptado de: Everest, (2001).

Vantagens e desvantagens podem ser atribuídas às técnicas de reprodução (Faria, 2005), mas o uso do processo binaural utilizando o fone de ouvido representa uma grande praticidade por não necessitar de um ambiente especial para alocação do aparato de teste.

3.3.4 Percepção subjetiva do sinal

As técnicas de auralização modelam o sinal de um ambiente através da convolução da resposta impulsiva de um ambiente pelo sinal sem nenhuma impressão espacial, mas a percepção destes panoramas acústicos criados é realizada por pessoas que exprimem sua sensação. Para realizar comparações das sensações auditivas de sinais auralizados, deve-se usar um júri para verificar a percepção a estes sinais.

A composição do júri dependerá do tipo de aplicação que se deseja investigar, como por exemplo, verificar a inteligibilidade de projetos de salas de aula, (HAN e MAK, 2008), em que o júri pode ser composto por professores e alunos que utilizam este tipo de espaço.

Farina (2000) aplicou questionários para verificação da qualidade acústica de teatros para música, especificando no questionário a caracterização do membro do júri como musicista, crítico ou outros.

O tipo de público e o estado em que se encontra o aparelho auditivo dos ouvintes também é importante. Testes audiométricos são recomendados para avaliar a audição dos ouvintes (GARADAT *et al.*, 2009). Testes não tão rígidos como os audiométricos são realizados para verificar a audição, utilizando rotinas em programas de computador que, de acordo com o procedimento proposto por Campelo e Bento (2010) e Choi *et al.* (2007) pode ser considerado suficiente para a verificação da saúde auditiva do indivíduo. Outra forma de verificação é perguntar ao mesmo júri se foi exposto a alguma atividade ruidosa, ou uma verificação inicial com sinais conhecidos (LOKKI, 2002).

Um ponto muito importante para a realização de testes de júri é o treinamento dos indivíduos deste júri. Normalmente, cada indivíduo pode ter sua impressão particular e um direcionamento no tipo de percepção deve ser realizado para obter uma resposta direcionada à sensação subjetiva que se deseja avaliar (MERIMAA & HESS, 2004).

A verificação de variação de sinais pode ser obtida através de testes de comparação de pares. Estes testes fazem a comparação de dois sinais, ou situações, e depois reafirmam a

tendência com perguntas comparativas entre os dois sinais. Como por exemplo pode-se imaginar que duas situações A e B são expostas a um indivíduo; depois é exposto aleatoriamente uma das duas situações e pergunta-se o quão próximo de uma destas situações está uma das duas situações que é escolhida aleatoriamente. Segundo Looki (2002) e Berg (2006), este tipo de verificação é caracterizado como método duplo-cego com três estímulos e com a referência escondida, obtido pela recomendação ITU-R BS.1116-1 da International Telecommunication Union. A recomendação ITU-R BS.1116-1 utiliza uma escala para verificação da diferença entre sinais apresentados. A percepção fica escalonada em cinco graus de paridade no comparativo destes sinais. Uma derivação deste método pode ser utilizada para escalonar extremos de comparação e verificar o posicionamento de um sinal dentro destes extremos (ITU-R. BS. 1387-1).

Análises estatísticas das respostas obtidas devem ser utilizadas para verificação do comportamento do parâmetro subjetivo que se deseja estudar (WICKELMAIER & CHOISEL, 2005). Normalmente, uma análise de distribuição para verificar as variâncias encontradas pode ser suficiente para verificação direta de um fator subjetivo.

4 Materiais e Métodos

A metodologia empregada para o estudo da influência dos coeficientes de espalhamento obtidos experimentalmente na percepção subjetiva de sinais auralizados teve como primeiro passo a determinação experimental dos coeficientes de espalhamento.

Para a determinação experimental dos coeficientes de espalhamento uma câmara reverberante em escala 1:5 foi construída e seus detalhes construtivos estão abordados no Apêndice A.

Com os coeficientes de espalhamento obtidos, foram criados modelos computacionais baseados em salas existentes para que a resposta impulsiva obtida por medições desta sala pudesse ser comparada com a resposta impulsiva do modelo criado. Esta impressão criada pela resposta impulsiva de um espaço pode ser definida como panorama acústico. Estes comparativos serviram para qualificar o programa computacional utilizado para modelagem e a sala utilizada foi o auditório da Associação de Docentes da Universidade Estadual de Campinas (ADUNICAMP).

Realizada esta qualificação, foram criados outros panoramas acústicos baseados em salas projetadas para uma boa audibilidade para música. Alterações dos coeficientes de espalhamento do banco de dados do programa computacional utilizado para modelagem computacional foram realizadas para computar os valores de coeficiente de espalhamento obtidos experimentalmente. Estes panoramas criaram uma impressão espacial em amostras sonoras que foram apresentadas a um júri através de técnicas de auralização.

A resposta subjetiva do júri aos sinais resultantes da auralização foi analisada e a influência dos coeficientes de espalhamento, tomando como base os atributos subjetivos de qualificação de salas, foi verificada.

Os itens a seguir detalham cada tópico da metodologia apresentada nesta introdução.

4.1 Câmara reverberante em escala e equipamentos de medição

O projeto da câmara reverberante em escala foi feito de acordo com as relações entre as dimensões altura, largura e comprimento, indicados na norma de ensaio de potência sonora ISO 3741:1994. Estas dimensões são recomendadas para a construção de câmaras reverberantes em escala real e são utilizadas em modelos, desde que respeitados os fatores de escala para cada uma das dimensões de largura, altura e comprimento (NASCIMENTO e ZINDELUK, 2005).

De acordo com a ISO 3741:1994, as paredes da câmara reverberante devem ter um coeficiente de absorção sonora menor que 0,06 para as frequências de medição. A câmara reverberante em escala (1:5) que foi construída no Laboratório de Conforto Ambiental (LACAF) da Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Unicamp possui paredes em chapas de acrílico reforçadas com perfis metálicos (SANTOS e BERTOLI, 2008). O acrílico foi escolhido devido ao seu baixo coeficiente de absorção sonora (menor que 0,05) e pelo seu fator de isolamento ($R_w =$ de 25 dB), segundo a empresa especializada Dagol (2007).

As paredes de grande parte das câmaras reverberantes não são paralelas evitando assim a ocorrência de ondas estacionárias. Schultz (1971) comentou que as paredes paralelas não auxiliam muito no campo difuso da câmara, pois não aumentam significativamente a quantidade de modos. Waterhouse (1955) evidenciou elementos que realizam a sobreposição das ondas sonoras dentro da câmara. Estes elementos são conhecidos como difusores. Os difusores causam uma interferência na propagação da onda sonora, obtida como se houvesse uma variação na geometria da câmara de ensaios. Na câmara em escala foram instalados difusores metálicos para aumento do número de modos, pois o formato final da câmara foi de um paralelepípedo com as dimensões de 1,20 m de largura, 1,52 m de profundidade e 0,96 m de altura.

A influência de vibrações externas na estrutura da câmara reverberante deve ser atenuada o máximo possível. Para esta atenuação foi feito o desacoplamento da câmara reverberante de qualquer superfície que possa transmitir vibração para sua estrutura (NASCIMENTO e ZINDELUK, 2005). A câmara em escala 1:5 do LACAF-FEC foi montada sobre uma mesa adaptada para suportar seu peso estimado de 82 kg. A atenuação de vibrações que poderiam ser

transmitidas da mesa para a estrutura da câmara foi realizada com a instalação de coxins de borracha entre a tampa superior e a estrutura da mesa (SANTOS e BERTOLI, 2008). A verificação da atenuação de vibrações foi feita com uma medição de vibração com um acelerômetro triaxial. Este acelerômetro foi posicionado antes e depois do coxim, com uma fonte de vibração acoplada na estrutura da mesa e, a partir destas medições, compararam-se os níveis de atenuação de vibração.

As medições acústicas de modelos em escala necessitam de cuidado na escolha dos transdutores de captação e reprodução, pois assim como as dimensões, as frequências de análise também devem respeitar o fator de escala do modelo. Por exemplo, num modelo 1:10 se a faixa de frequências estudada é de 100 a 1000 Hz, as frequências a serem consideradas no modelo seriam de 1000 a 10.000 Hz. Considerando a possibilidade de se trabalhar com frequências maiores que 20 kHz, o microfone escolhido foi o modelo 40 BE da G.R.A.S. de ¼ de polegada pré polarizado que possui a resposta em frequência plana de 100 a 40 kHz. Em conjunto com o microfone, o pré amplificador modelo 26 CB foi escolhido, conforme recomendação do fabricante. A Figura 4.1 mostra uma foto da câmara em escala.

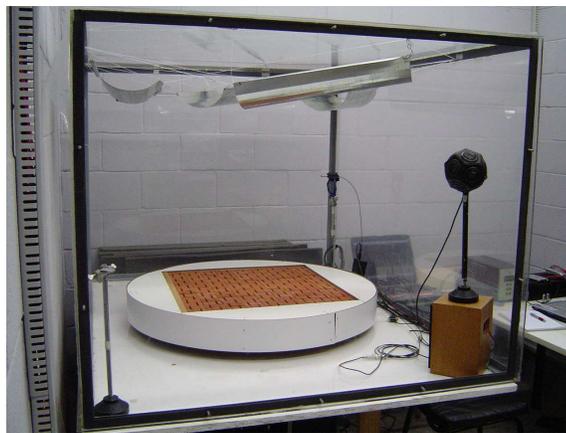


Figura 4.1. Câmara reverberante em escala com equipamentos de medição.

Para a reprodução dos sinais em escala, a faixa de frequências de análise também deve ser observada, sendo comum o uso de reprodutores de alta frequência (GOMES *et al.*, 2004). Para a câmara reverberante em escala 1:5 do LACAF-FEC, uma fonte sonora em escala 1:5 foi

construída para a realização dos ensaios. O formato utilizado para a manufatura da fonte foi o dodecaedro, seguindo a distribuição espacial conseguida com a fonte sonora da Marca Brüel & Kjaer em escala real. No lugar dos altofalantes foram utilizados *tweeters* da marca Bravox modelo Neo Tech 25 A, devido a sua resposta em frequência de 4 kHz a 30 kHz. O sistema pode ser visualizado na Figura 4.2.



Figura 4.2. Reprodutores sonoros utilizados nos ensaios.

Segundo a norma ISO 17497:2004, para determinação do coeficiente de espalhamento a amostra precisa realizar movimentos circulares contínuos ou com paradas em posições escolhidas. Para realizar este movimento foi adquirida uma mesa giratória da Brüel & Kjaer modelo 9640.

O procedimento de determinação do coeficiente de espalhamento consiste em medições do Tempo de Reverberação. Para este fim, foi utilizado o *software* DIRAC da Brüel&Kjaer destinado a medição acústica de salas que utiliza a técnica de deconvolução para obtenção da resposta impulsiva. As medições de tempo de reverberação em altas frequências, acima de 10.000 Hz, sofrem absorção do ar de acordo com a umidade relativa do ar (BRÜEL&KJAER, 1978). A solução é realizar a compensação desta atenuação para as altas frequências. O *software* DIRAC possui uma rotina de compensação desta atenuação nas altas frequências que otimiza a determinação dos Tempos de Reverberação para modelos em escala. Esta rotina baseia-se nas condições da umidade relativa do ar e da temperatura durante o ensaio para calcular o coeficiente

de atenuação sonora do ar para altas frequências de acordo com as planilhas de compensação existentes na norma ISO 9613:1996.

4.2 Medições do coeficiente de espalhamento

Segundo a ISO 17479:2004, os ensaios de coeficiente de espalhamento podem ser realizados em câmaras reverberantes em escala. A norma especifica um volume mínimo de $200/N^3 \text{ m}^3$, sendo N o fator de escala reduzida 1:N. Para a câmara em escala construída, com dimensões de 1,20 m de largura, 1,52 m de profundidade e 0,96 m de altura, o volume em escala real é de $1,75 \text{ m}^3$, que em escala de 1:5 é representado por um volume de $218,9 \text{ m}^3$.

As medições do coeficiente de espalhamento necessitam de uma preparação da amostra de ensaio. Esta deve ser disposta em formato circular com diâmetro de $3,0/N$ metros, sendo N o fator de escala. O formato circular garante, no momento da medição, que durante a movimentação da amostra obtenha-se a alteração da rugosidade desta amostra (COX e D'ANTONIO, 2004). Uma amostra em formato circular pode ser vista da Figura 4.3.

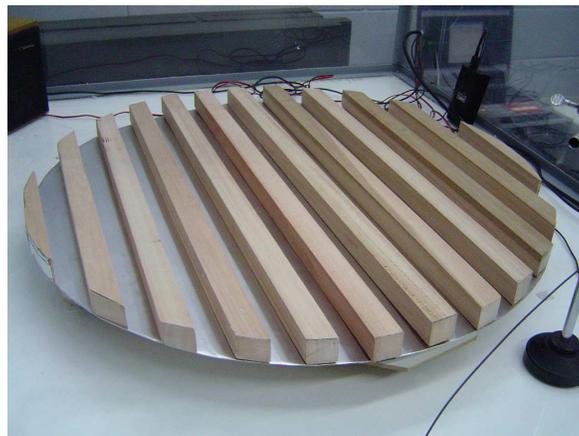


Figura 4.3. Amostra para ensaio de determinação do coeficiente de espalhamento.

Quando for utilizada uma amostra em formato quadrado, esta deve ser montada no interior de uma estrutura em formato circular conforme visto na Figura 4.4. As dimensões da amostra quadrada devem respeitar o tamanho mínimo de $2,65/N$ m de lado, sendo N o fator de escala. Para este caso, o diâmetro da estrutura circular terá o diâmetro de $3,75/N$ m.

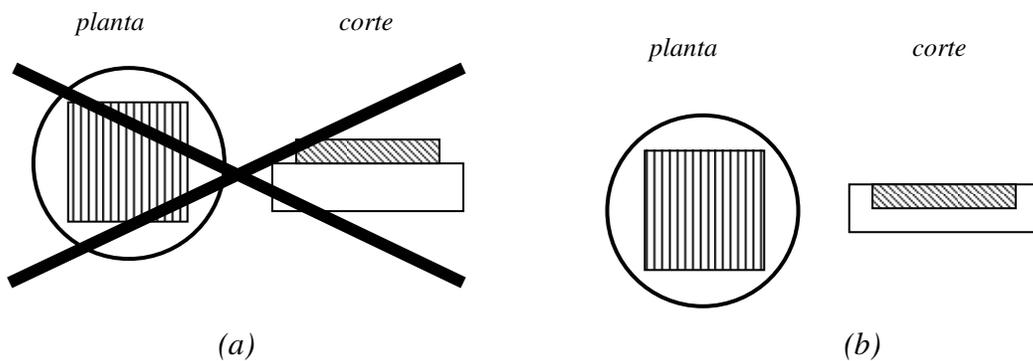


Figura 4.4. Preparação de amostra quadrada para realização de ensaio de determinação de coeficiente de espalhamento. a) Forma incorreta; b) forma correta. Adaptado de: Cox e D'Antonio (2004).

As distâncias mínimas entre paredes, amostra, receptor e fonte devem ser respeitadas considerando o fator de escala. Neste caso, a distância de 1 m, para um fator de escala de 1:5 é considerada como uma distância de 20 cm; a distância mínima é representada pela letra e na Figura 4.5a. A profundidade obtida pela rugosidade da amostra não deve exceder o valor de $d/16$, sendo d o valor do diâmetro da amostra, como mostrado na Figura 4.5b.

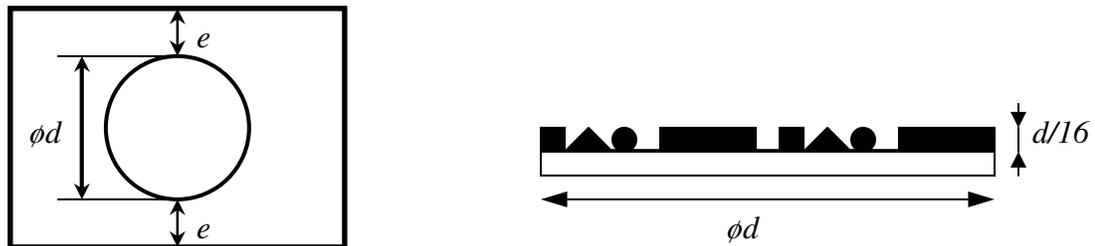


Figura 4.5 – a) Representação esquemática do distanciamento mínimo entre amostra e paredes da câmara; b) representação de profundidade estrutural da amostra. Fonte: ISO 17497-1 : 1994.

De acordo com a norma ISO 17479-1:2004, os ensaios de medição de coeficiente de espalhamento são realizados com a medição de tempos de reverberação a partir de respostas impulsivas obtidas em quatro condições diferentes:

- 1 – Apenas a mesa giratória parada;
- 2 – A amostra de ensaio sobre a mesa giratória parada;
- 3 – Apenas a mesa giratória em movimento (girando);
- 4 – A amostra de ensaio sobre a mesa giratória em movimento (girando).

Para cada situação citada, a norma ISO 17479:2004 pede que sejam determinadas as respostas impulsivas de ao menos duas posições de fonte sonora e três posições de microfone, perfazendo um total de seis arranjos entre fonte-microfone.

Os ensaios para determinação do coeficiente de espalhamento com a câmara do LACAF-FEC foram realizados para quatro posições de microfone e duas posições de fonte, num total de oito arranjos entre microfone e fonte sonora. O sinal utilizado foi uma varredura tonal (*sweep*) linear, para uma ênfase nas altas frequências. O tempo da varredura escolhido foi de 2,73 s. A mesa giratória foi utilizada para realização de medições contínuas para um tempo de rotação completa de 180 s. O posicionamento de fonte sonora e microfone pode ser visto na Figura 4.6.

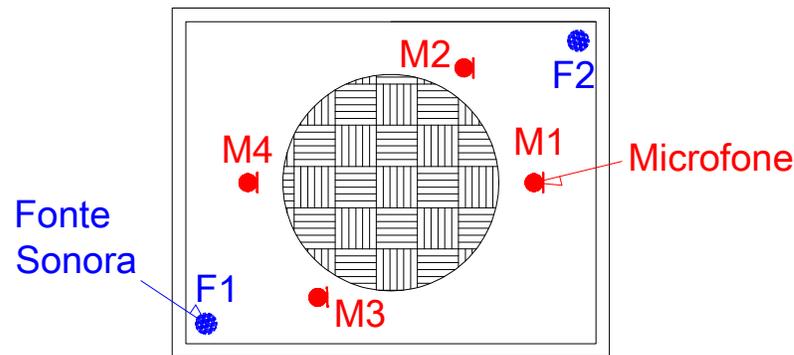


Figura 4.6. Planta esquemática da câmara reverberante em escala mostrando o posicionamento de fonte e microfone.

Para validação da metodologia de medição utilizada, foram realizados ensaios com uma amostra composta por semi-esferas de gesso, cujos valores medidos no laboratório foram comparados com os valores obtidos por Vorländer e Mommertz (2000) com uma amostra composta por semi-esferas de madeira. Este comparativo mostrou uma diferença dentro dos desvios previstos.

Após os ensaios realizados de validação da metodologia de determinação do coeficiente de espalhamento, outras superfícies tiveram seus coeficientes de espalhamento determinados. Estas novas medições foram realizadas para se obter o coeficiente de espalhamento de superfícies que serão utilizadas para modelamento computacional do auditório da ADUNICAMP e da sala de trabalho.

4.3 Simulações computacionais

As simulações computacionais deste trabalho foram desenvolvidas utilizando um programa computacional chamado E.A.S.E. da empresa Renkus-Heinz Inc. utilizado para projeto de ambientes com módulo de auralização, convolução e cálculo da resposta impulsiva de uma sala. Uma das licenças do *software* foi gentilmente cedida temporariamente pela Universidade

Estadual de Maringá para a criação por modelagem computacional das respostas impulsivas das salas utilizadas para estudo.

Segundo Vorländer (2007), o programa E.A.S.E. realiza parte da simulação computacional a partir de um algoritmo híbrido de traçado de raios e de fontes virtuais sonora desenvolvido numa base conhecida como “CAESAR”. Esta base tem como parte chave de seu algoritmo o processamento paralelo entre os algoritmos de traçado de raios e de fontes virtuais. Ele calcula as reflexões especulares com precisão e as reflexões difusas com a aproximação estatística, utilizando espalhamento sonoro das superfícies.

O programa E.A.S.E. funciona com a criação de um modelo virtual do ambiente tipo CAD, onde as superfícies internas são revestidas com materiais contidos no banco de dados do programa. Cada material possui sua informação referente a posicionamento espacial e características acústicas (coeficiente de absorção sonora e coeficiente de espalhamento). Um exemplo de um teatro modelado com o auxílio do programa E.A.S.E. pode ser visto na Figura 4.7.

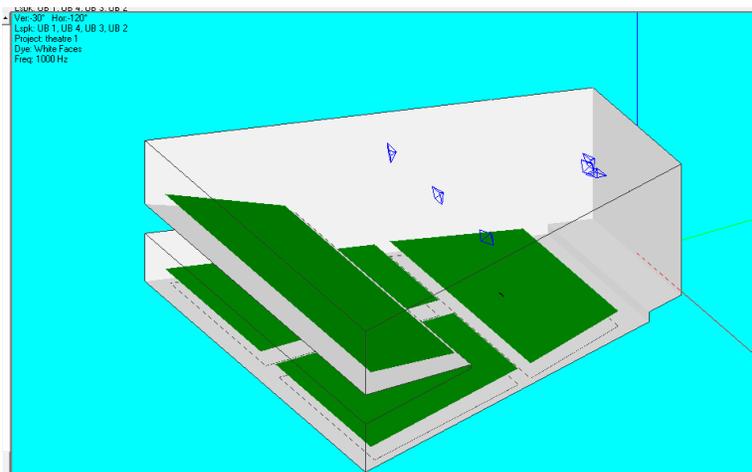


Figura 4.7. Exemplo de teatro modelado segundo programa computacional E.A.S.E.

O banco de dados do *software* E.A.S.E. possui uma vasta biblioteca de materiais e seus respectivos coeficientes de absorção sonora, porém não dispõe de coeficientes de espalhamento destes materiais em função da frequência. Existe a possibilidade de complementar a biblioteca do *software* inserindo materiais novos e alterando suas características acústicas, tanto para absorção sonora como para o coeficiente de espalhamento. Com isto, o coeficiente de espalhamento obtido experimentalmente pode ser utilizado para criar superfícies com os coeficientes de espalhamento representativos das condições físicas reais.

O auditório da ADUNICAMP foi modelado no programa computacional E.A.S.E. para obter valores de parâmetros acústicos para comparação com valores obtidos de medições realizadas com o *software* DIRAC. Este espaço foi escolhido por já possuir medições de resposta impulsiva *in situ* anteriormente realizadas. O auditório da ADUNICAMP visto externamente e seu modelo no *software* E.A.S.E. são mostrados na Figura 4.8.

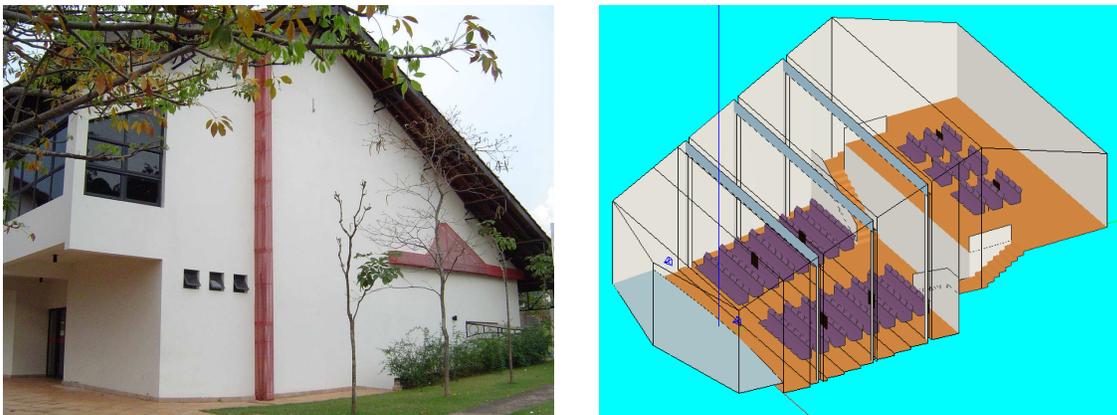


Figura 4.8. a) Foto do auditório da ADUNICAMP; b) modelo computacional do auditório simulado no E.A.S.E.

A primeira verificação para a utilização do programa computacional foi o cálculo de parâmetros acústicos obtidos da resposta impulsiva, como o tempo de reverberação (TR), o *Early Decay Time* (EDT), a Clareza (C80) e a definição (D50). Os desvios referentes aos valores obtidos foram calculados segundo a ISO 3382:1997 *Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters* e os limites observados como validação dos valores calculados.

Verificados estes valores, foram tomadas amostras de sons produzidos em campo livre, sem influência de reflexões do ambiente, e estas foram convoluídas com as respostas impulsivas das salas para gerar um novo arquivo com a impressão espacial ou panorama acústico do ambiente modelado.

Os arquivos obtidos com o panorama acústico resultante de medições reais e panoramas resultantes de modelagem computacional foram apresentados para um júri para verificar possíveis diferenças na percepção dos dois panoramas.

O modelo de estudo para este trabalho partiu de uma forma geométrica comum de sala e alterações nas superfícies internas foram realizadas para criar os panoramas acústicos. Nestes panoramas foram alteradas as características acústicas de difusão das superfícies, de acordo com coeficientes obtidos de elementos ensaiados na câmara em escala 1:5.

Uma sala de trabalho em formato retangular foi projetada e modelada para fornecer uma boa audibilidade para música. As proporções utilizadas para determinação da sala foram baseadas no modelo de proporção de largura, comprimento e altura de Bolt, Beranek e Newman, de acordo com Mannis (2008), com dimensões de: 6,5 m x 8m x 5m, respectivamente, correspondente aos fatores de proporção (1,3x1,6x1,0).

4.4 Auralização e apresentação ao júri

Amostras de sinais acústicos obtidos de um violino e de um piano foram utilizadas para serem convoluídas com as respostas impulsivas obtidas da sala de estudo e, assim, criar a impressão espacial da sala com as alterações que forem realizadas.

O sinal anecóico do piano foi utilizado para verificação comparativa da resposta impulsiva medida no auditório da ADUNICAMP com a resposta impulsiva modelada pelo software E.A.S.E.. O comparativo foi realizado a partir da auralização das duas respostas

impulsivas com o sinal anecóico do piano e apresentação a um júri para obter a resposta da percepção de alguma diferença entre os sinais resultantes.

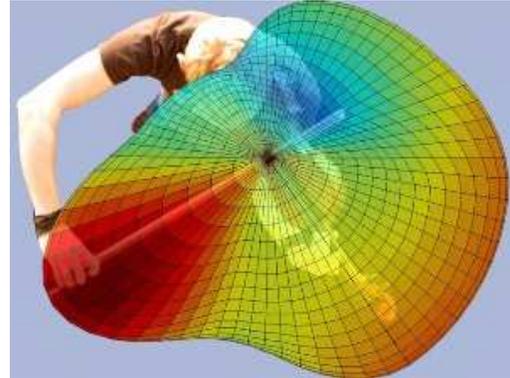
O sinal do violino foi utilizado para a auralização da sala de trabalho e a apresentação dos resultados destas auralizações para os ouvintes considerando os atributos subjetivos de qualidade de salas.

Os sinais do violino foram gravados em uma câmara anecóica do Departamento de Mecânica Computacional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp. Um aluno violinista do Instituto de Artes foi solicitado para as gravações com o violino. A escolha do violino se deu devido a sua faixa de frequências, normalmente de 400 a 5000 Hz (Meyer ,2009), e devido ao fato de que, nestas frequências, se encontram os valores de espalhamento dos difusores medidos na câmara reverberante em escala. Outra característica do violino é a possibilidade de se obterem variações temporais de ataque, de acordo com a técnica utilizada para tocá-lo.

Um cuidado tomado no momento da gravação foi o posicionamento do microfone de gravação no eixo em que o violino proporciona maior diretividade, sendo este o eixo perpendicular ao cavalete ou plano formado pelos orifícios em formato de “f” (ou “esses” em português) do seu corpo, como visto em vermelho escuro na Figura 4.9b. Uma foto do posicionamento do microfone, do tipo *side adress* ou com membrana perpendicular ao seu eixo, em relação ao violinista é mostrada na Figura 4.9a.



(a)



(b)

Figura 4.9. Posicionamento do violinista: a) posicionamento do microfone de gravação em relação ao violinista dentro da câmara anecóica da FEM-Unicamp; b) gráfico de diretividade do violino em relação ao violinista. Fonte: Behler (2006).

Os sinais gravados na câmara anecóica foram três, descritos como: Amostra 1 – sinal gravado de um violino tocando pausadamente com suavidade. Amostra 2 – sinal gravado de um violino tocando com mais velocidade e ataque. Amostra 3 – sinal gravado de um violino tocando em *pizzicato*. As características dos sinais gravados no tempo podem ser vistas na Figura 4.10.

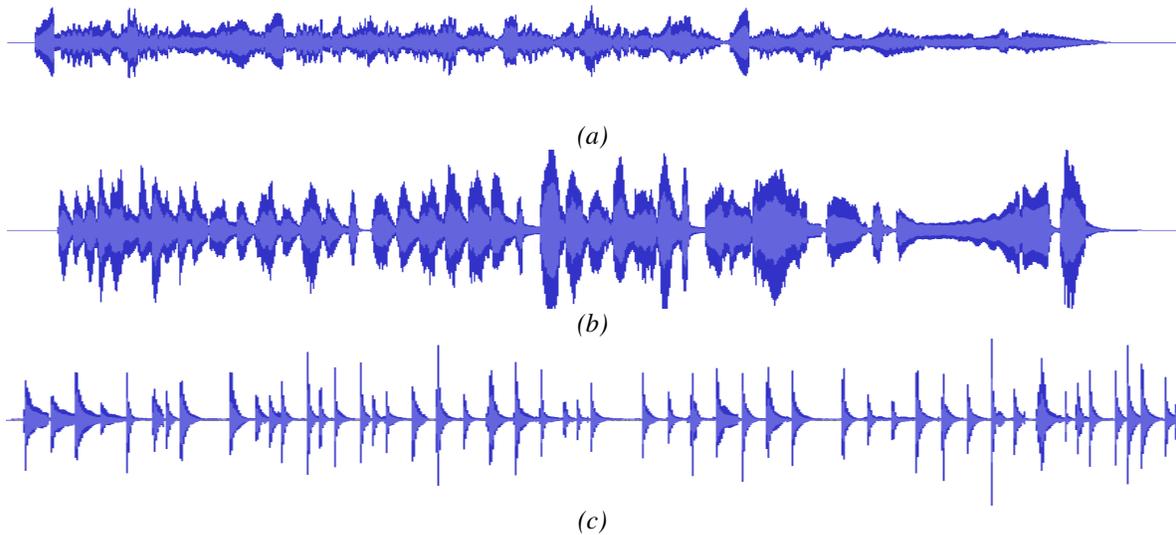


Figura 4.10. Sinais gravados em câmara anecóica com diferentes técnicas de execução: a) tocado pausadamente e suave; b) tocado com mais velocidade e ataque; c) tocado em “pizzicato”.

Estes sinais foram amostras sonoras tiradas de trechos musicais baseados na tipomorfologia dos sons utilizados por Blauert (1997) em seus experimentos de localização espacial.

A verificação da influência de posição das placas de difusores na percepção do ouvinte foi feita para os difusores colocados próximos à fonte sonora e para os difusores colocados próximos ao receptor. Com relação à quantidade de difusão, os difusores colocados na lateral tiveram seus valores de coeficiente de espalhamento alterados de acordo com o material colocado. O restante da sala foi projetada para ter um tempo de reverberação médio de 0,6 s. As alterações para cada condição testada foram feitas sem alterar o tempo de reverberação médio da sala.

As condições indicadas nos gráficos são determinadas de acordo com a quantidade de difusão e localização da mesma na sala, sendo definidas como:

Condição 1 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes próximas e atrás da fonte sonora (cobrindo aproximadamente 25% da área total da sala).

Condição 2 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes próximas e atrás do receptor (cobrindo aproximadamente 25% da área total da sala).

Condição 3 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes laterais da sala (cobrindo aproximadamente 36% da área total da sala).

Condição 4 – Placas com difusores QRD 2D colocadas nas paredes laterais da sala (cobrindo aproximadamente 36% da área total da sala).

Plantas da sala modelada mostrando a alocação dos painéis difusores, segundo as condições apresentadas são mostradas na Figura 4.11.

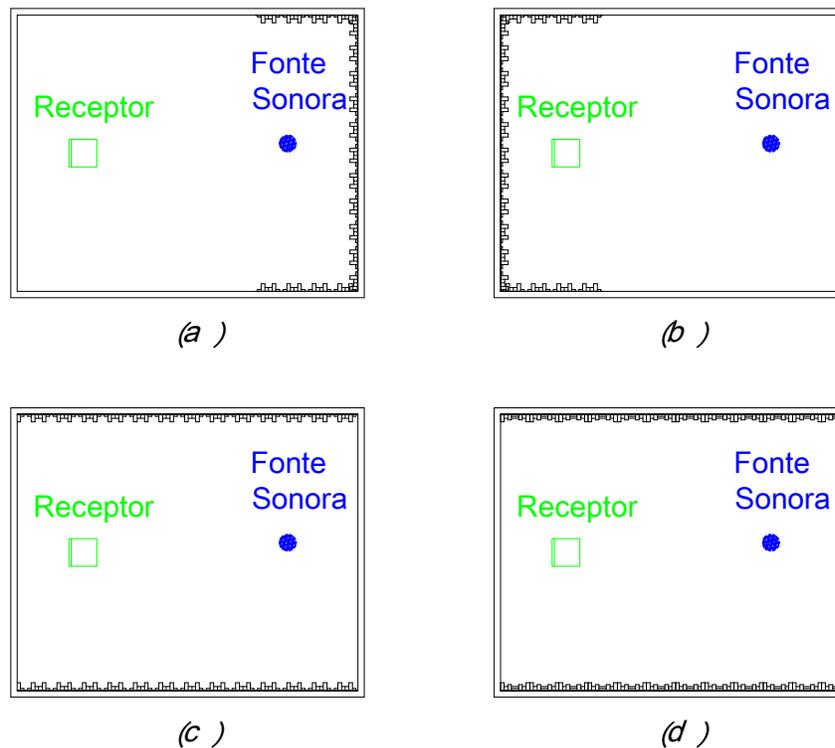
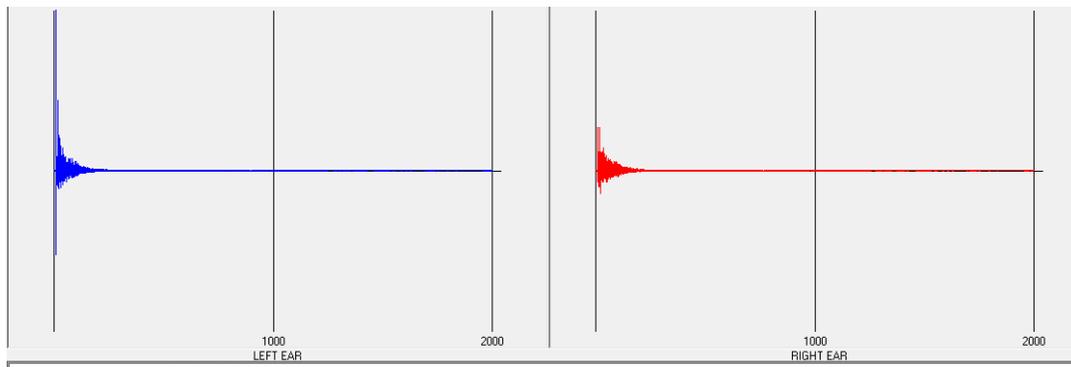


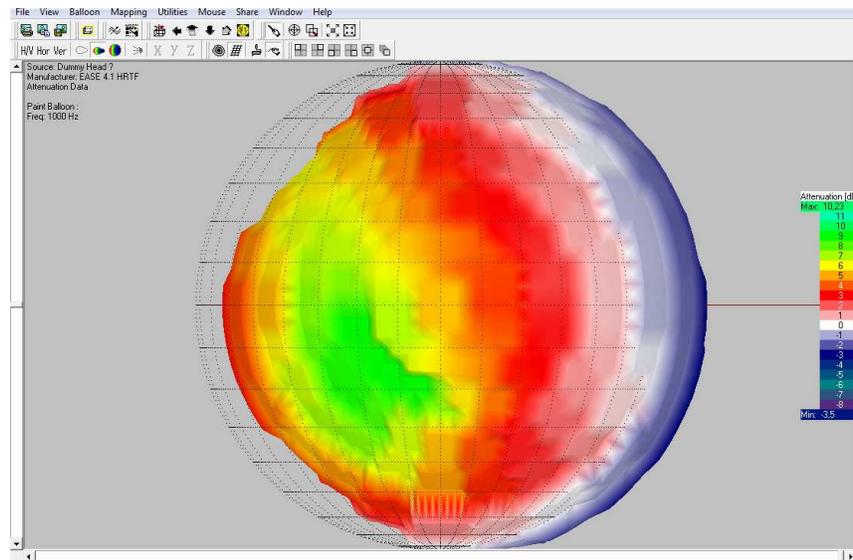
Figura 4.11. Plantas de alocação dos difusores na sala de trabalho: a) Condição 1 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes próximas e atrás da fonte sonora. b) Condição 2 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes próximas e atrás do receptor. c) Condição 3 – Placas com difusores QRD colocados nas paredes laterais da sala. d) Condição 4 – Placas com difusores QRD 2D colocadas nas paredes laterais da sala.

Como os ensaios de júri foram realizados utilizando reprodução por fone de ouvido, a função de transferência relativa à cabeça HRTF (*Head Related Transfer Function*) é uma função transferência referente a interferência de uma cabeça humana em um campo sonoro, porém produzida artificialmente e utilizada para obter a mesma sensação de audição do humano no campo sonoro em questão (PAUL, 2009). A HRTF obtida do programa computacional E.A.S.E. foi utilizada como filtro para criar uma resposta real espacial dos sinais convoluídos (VORLÄNDER, 2007).

Um padrão existente no banco de dados do programa E.A.S.E. referenciado como *Dummy Head* foi utilizado como padrão para auralização. A Figura 4.12 mostra o módulo de ajuste e uso da função transferência da cabeça, onde a Figura 4.12a mostra as respostas impulsivas para cada ouvido e a Figura 4.12b mostra uma esfera representativa dos valores de atenuação espacial da função de transferência relacionada à cabeça.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Exemplo de função de transferência relacionada à cabeça HRTF. a) respostas impulsivas referentes a cada ouvido; b) esfera representativa da função transferência relacionada à cabeça.

Depois de realizado o processamento dos sinais, criando os panoramas acústicos e tratando os sinais com as HRTF para apresentação dos sinais por fones de ouvido, foi escolhido um júri para apresentação destes sinais.

A escolha dos ouvintes do júri foi realizada tomando como base pessoas capazes de perceber variações existentes nos sinais apresentados. Pessoas que trabalham com música, gravação, reprodução e execução, que precisam perceber estas variações no seu dia-a-dia. O júri foi composto por alunos da disciplina de acústica III, alunos de música do Instituto de Artes da

Unicamp e alguns músicos voluntários ao experimento. O mesmo júri que realizou os testes de validação subjetiva do modelo computacional do auditório da ADUNICAMP, participou dos testes com os atributos subjetivos com a sala de trabalho.

Inicialmente, foi realizado um teste de triagem auditiva para verificação da capacidade auditiva dos ouvintes. Esta triagem foi realizada tomando como base as recomendações de triagem auditiva da *American Speech-Language-Hearing Association* (ASHA), baseado na norma OSHA 1910-95-App E. Utilizando um programa que gera níveis tonais aferidos, os testes foram realizados como uma parte inicial do programa que apresentava os sinais de impressão espacial, junto com uma medição do ruído de fundo local, de acordo com procedimento proposto por Campelo e Bento (2010). Segundo Choi *et al.* (2007) realizando uma aferição dos níveis gerados no fone de ouvido do audiômetro antes e depois da triagem auditiva, o procedimento de triagem realizado por computador pode ser considerado suficiente para a verificação da saúde auditiva do indivíduo. Baseado nesta informação, antes e depois de cada amostragem do programa o sistema foi aferido para verificação dos níveis dos sinais emitidos. O próprio sistema foi utilizado como audiômetro, baseado no fato da resposta em frequência do fone de ouvido utilizado ser maior que a resposta em frequência dos fones utilizados em audiômetros considerados padrão para realização de audiometrias (TDH 50P). As respostas em frequência do fone utilizado no sistema (HD 515) e do fone utilizado em audiômetros (THD 50P) são mostradas na Figura 4.13.

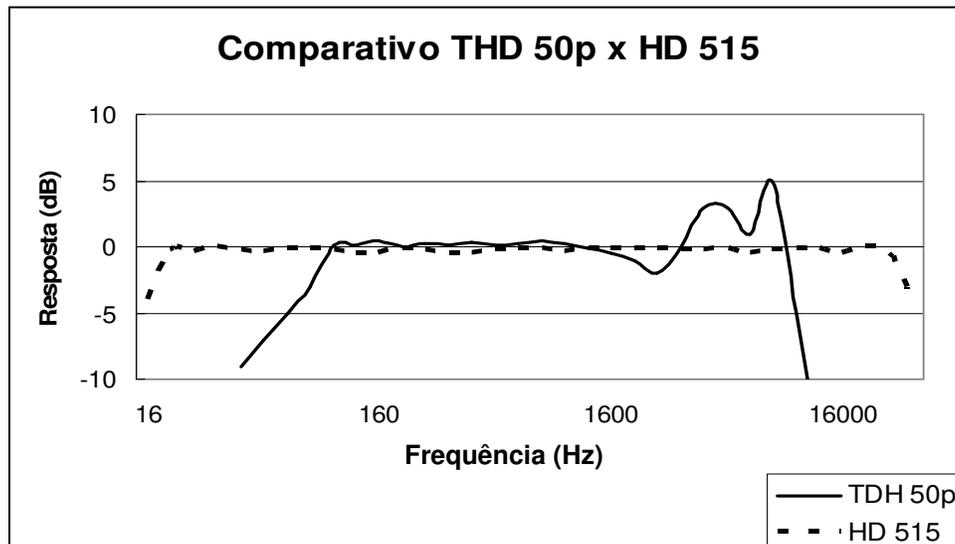
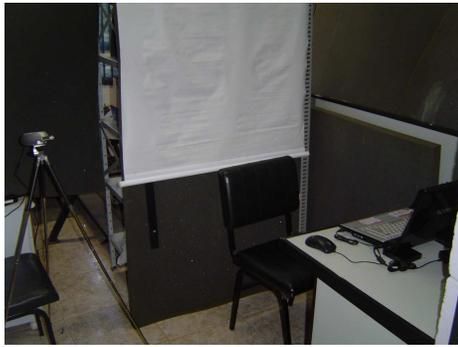


Figura 4.13. Comparativo da resposta em frequência dos fones de ouvido utilizados em audiômetros (TDH 50p) e o utilizado no sistema de utilizado para auralização e triagem auditiva (HD 515).

O sistema utilizado para a apresentação das amostras ao júri foi composto por uma placa de processamento de sinais EDIROL FA-66 com resolução de 24 bits e um fone de ouvido da Seinnheiser modelo HD 515, próprio para atividades que exigem qualidade sonora. Os níveis de sinal foram aferidos por um medidor de nível de pressão sonora da marca 01 dB modelo SLM calibrado com precisão tipo 1.

Os locais de realização dos testes necessitavam apresentar um ruído de fundo que não causasse interferências indesejadas durante os testes. Foram utilizados três locais: uma sala no laboratório de conforto ambiental da FEC (sala 3); um estúdio de ensaio do Instituto de Artes da Unicamp (sala 35) e uma sala de ensaios do Instituto de Artes da Unicamp (sala 31). A montagem do sistema utilizado para os testes nas salas utilizadas e a posição do ouvinte durante os testes estão mostrados na Figura 4.14.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.14. Locais onde foram realizados os testes de júri: a) sala 3 do laboratório de conforto ambiental FEC; b) estúdio de ensaio do Instituto de Artes da Unicamp; c) sala de ensaios do Instituto de Artes da Unicamp; d) posição do ouvinte durante o teste.

Após a triagem auditiva, foram realizados dois testes: um para identificar limites de percepção do ouvinte com relação ao campo acústico, e outro, comparativo entre pares, com gradação para identificar a percepção direta do ouvinte (Wickelmaier e Choisel, 2005). Para o teste de percepção direta, dois sons A e B são reproduzidos para o ouvinte. Posteriormente, um dos dois será novamente reproduzido aleatoriamente. O ouvinte deve indicar, o quão próximo do som A ou B um som reproduzido está, caracterizando assim uma tendência da percepção. Uma imagem do questionário eletrônico desenvolvido por Rioux (2001) é apresentada na Figura 4.15.

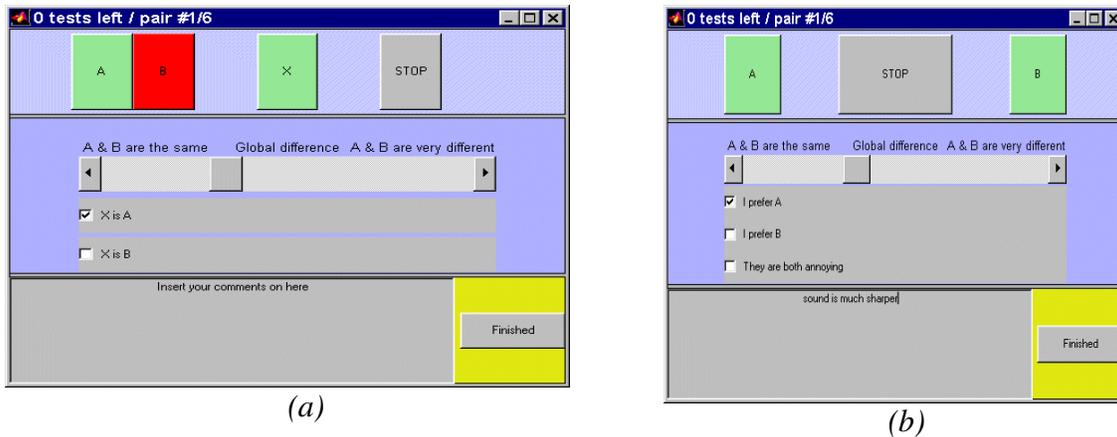


Figura 4.15. Exemplo de questionário comparativo elaborado por Rioux (2001). a) teste comparativo tipo ABX com graduação de proximidade de extremos. b) teste pareado entre duas amostras.

A Figura 4.16 mostra um questionário utilizado por Lokki e Pulkki (2002) que faz uso da mesma técnica e do mesmo algoritmo, diferenciando apenas a forma de apresentação.

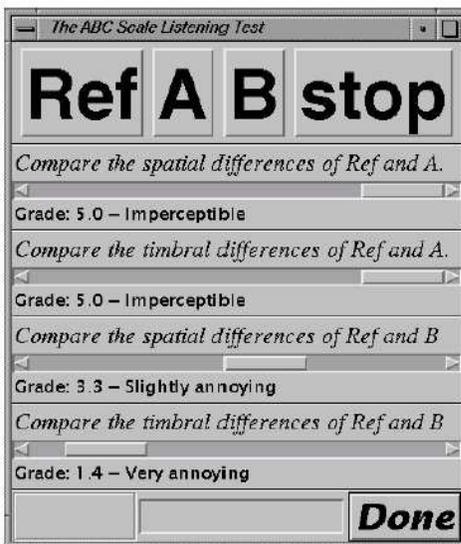


Figura 4.16. Exemplo de questionário comparativo elaborado por Lokki e Pulkki (2002).

Este tipo de questionário eletrônico possui um algoritmo computacional conhecido e disponível para *download* e uso gratuito em plataforma MatLab®. Utilizou-se o mesmo algoritmo, porém com programação em macros do programa Power Point® da Microsoft®. Um exemplo das questões elaboradas para apresentação ao júri são mostradas nas Figuras 4.17 e 4.18.

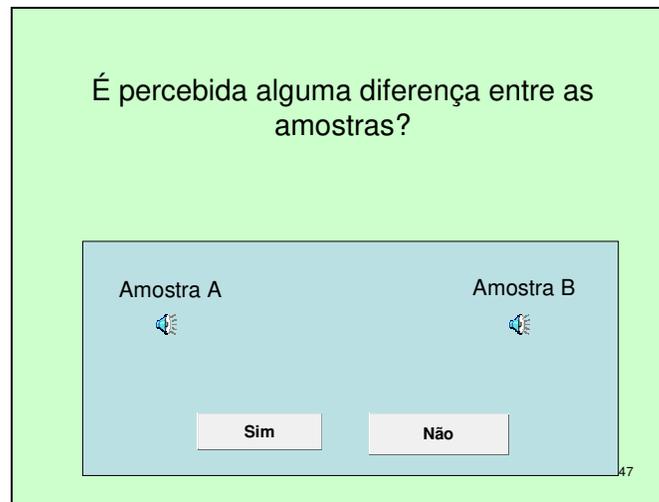


Figura 4.17. Questão elaborada para verificação dos limites de percepção do ouvinte.

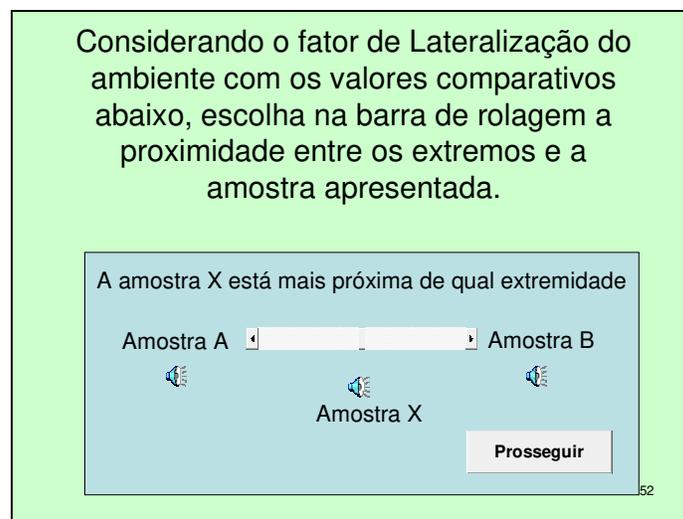


Figura 4.18. Questão elaborada para teste de verificação subjetiva de valores auralizados com alteração do coeficiente de espalhamento.

O conjunto de 80 questões foi respondido pelos ouvintes. A cada passo, a apresentação realizava a gravação das respostas e dos valores obtidos da barra de rolagem e da percepção positiva ou não dos limites de percepção em arquivo de texto.

A avaliação da percepção acústica da sala pelos ouvintes foi armazenada considerando os atributos de qualidade de salas de concerto: clareza, lateralização, brilho, reverberância e razão de graves (FIGUEIREDO *et al.*, 2004). Estes atributos subjetivos foram avaliados de acordo com os panoramas apresentados, onde os membros do júri indicaram o quão próximo o sinal resultante dos panoramas para cada condição está de uma situação com mais ou menos a impressão de cada parâmetro.

O parâmetro Clareza (C80) foi escolhido para analisar a influência dos difusores para o parâmetro subjetivo de uma boa inteligibilidade do som tocado. Subjetivamente foi verificada a impressão de definição da amostra executada.

O parâmetro de lateralização (LF) foi escolhido para verificar a influência dos difusores na fração lateral, o que pode dar uma ideia dos valores de largura de fonte e de coloração lateral.

O parâmetro de reverberância (EDT) foi escolhido para verificar a concentração de energia das primeiras reflexões e a sensação de reverberação no recinto ou reverberância.

Os atributos de Brilho (Br) e razão de graves (BR) ajudarão a verificar a influência dos difusores nas frequências se há uma correlação entre a diferença do tempo de reverberação das frequências e a sensação de calidez (razão de graves) ou brilho.

Antes de cada teste a ser realizado o ouvinte era instruído sobre as etapas as quais seria submetido durante o procedimento de teste. Era explicado o significado de cada parâmetro a ser analisado e como ele deveria responder de acordo com a percepção realizando um comparativo entre o som ouvido e os extremos apresentados de cada parâmetro.

Um termo de esclarecimento foi apresentado com todos os tópicos de principal interesse ao ouvinte, como a explicação sobre os objetivos da pesquisa, riscos, privacidade da identidade

do ouvinte e os dados do pesquisador. Cada termo era assinado confirmando o aceite de participação na pesquisa.

Todo o procedimento completo de teste levou de 40 a 80 min por pessoa, incluindo a explicação inicial e as aferições dos níveis emitidos pelo sistema antes e depois de cada teste. O total de indivíduos que fizeram o teste foi de 35, onde foram validados 32 testes.

Os testes que foram invalidados tiveram como motivo de invalidação o ruído de fundo da sala utilizada para testes acima dos limites permitidos e um deles obteve resultado negativo no procedimento de triagem auditiva.

Os valores obtidos das respostas do questionário foram compilados com a ajuda de uma planilha do *software* Excel®. Estes resultados foram arranjados graficamente para apresentação no capítulo 5.

5 Resultados e Discussão

Primeiramente, alguns trabalhos foram realizados para obtenção do coeficiente de espalhamento de materiais. Estes trabalhos foram convertidos em relatórios e artigos publicados em congressos (SANTOS e BERTOLI, 2008; SANTOS e BERTOLI 2009), descrevendo os detalhes construtivos e as dificuldades encontradas na implementação dos ensaios.

Com os ensaios implementados, foram realizadas medições do coeficiente de espalhamento de superfícies difusoras, com o objetivo de utilizá-las na validação dos modelos desenvolvidos.

A partir da validação do modelo computacional, o modelo de uma sala de trabalho projetada para se obter uma boa audibilidade para música foi criado. Nesta sala foram realizadas modificações nas características das superfícies e respostas impulsivas foram simuladas para serem convoluídas com sinais anecóicos.

As convoluções entre os sinais anecóicos e as respostas impulsivas de cada condição a ser estudada resultou em panoramas acústicos, causando uma impressão espacial nos sinais anecóicos.

Os panoramas foram apresentados a um júri e as variações percebidas foram comparadas a extremos de descritores subjetivos. Dessa forma, os panoramas resultantes foram qualificados de acordo com os valores escolhidos pelos ouvintes.

Neste capítulo serão apresentados os resultados das etapas realizadas no presente trabalho.

5.1 Câmara reverberante

A escala da câmara reverberante foi escolhida baseado no fato de que a escala de 1:5 é a da câmara utilizada nos ensaios de determinação do coeficiente de espalhamento em algumas das literaturas adotadas como referência (COX *et al.*, 2006; GOMES *et al.*, 2004; VORLÄNDER *et al.*, 2004). Com esta escala a maior banda de medição de 1/3 de oitava será a de 4 kHz que é suficiente para caracterização do coeficiente de espalhamento de uma superfície, segundo a ISO 17497-1:2004.

O resultado das diferenças entre os níveis de pressão sonora medidos interna e externamente a câmara para determinação do seu isolamento são mostrados na Figura 5.1.

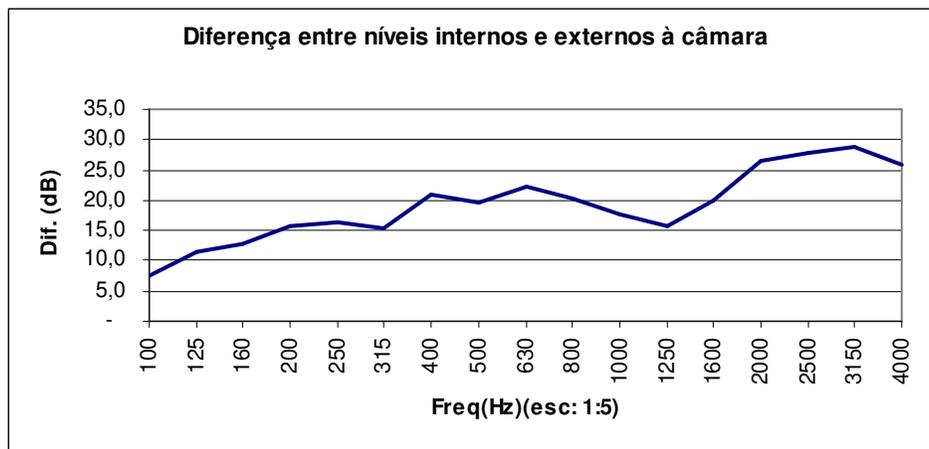


Figura 5.1. Resultados da diferença calculada de medições de Nível de Pressão sonora interna e externamente à câmara em escala 1:5.

Na Figura 5.1 os valores de frequência estão convertidos na escala 1:5, o cálculo do R_w para as paredes da Câmara em escala resultou no valor de $R_w = 19 \text{ dB}$.

O formato final da câmara foi de um paralelepípedo com as dimensões de 1,20 m de largura, 1,52 m de profundidade e 0,96 m de altura. A Figura 5.2 mostra os resultados dos Tempos de Reverberação medidos da câmara em escala, onde deve-se lembrar que para a escala de 1:5 as frequências de interesse vão de 500 a 20000 Hz.

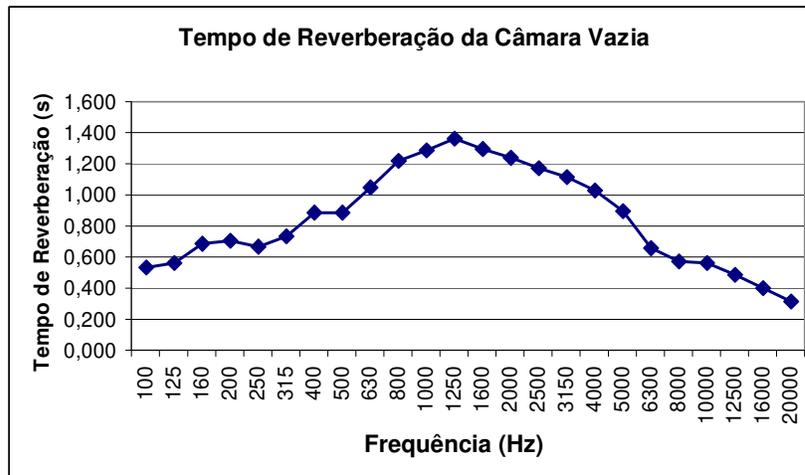


Figura 5.2. Tempo de reverberação medido para câmara em escala 1:5 vazia.

Os detalhes da construção da câmara reverberante estão descritos no Apêndice A. Uma foto da aparência final da câmara pode ser vista na Figura 5.3.



Figura 5.3. Aspecto final da câmara reverberante em escala com equipamentos para medição do coeficiente de espalhamento.

5.2 – Medições preliminares do coeficiente de espalhamento

Os ensaios de medição de coeficiente de espalhamento necessitam de quatro medições de tempos de reverberação: duas com a mesa giratória parada, sendo estas com e sem a amostra de ensaio; e duas com a mesa giratória em movimento, sendo estas com e sem a amostra de ensaio.

Os primeiros ensaios de determinação de coeficiente de espalhamento foram realizados por Vorländer e Mommertz (2000). Nestes ensaios, foram utilizadas semi-esferas maciças de madeira para verificar a influência do espalhamento com o aumento da densidade de semi-esferas na amostra de ensaio.

Nesta pesquisa, ensaios com amostra de semi-esferas confeccionadas em gesso foram realizados e os resultados mostraram coeficientes de espalhamento com valores próximos quando comparados aos valores dos coeficientes obtidos por Jeon *et al.* (2004).

A amostra utilizada foi composta por 171 semi-esferas maciças de gesso com 40 mm de diâmetro, espalhadas aleatoriamente de forma a cobrir uma área de 44% da área da mesa giratória. A amostra utilizada pode ser observada na Figura 5.4.



Figura 5.4. Amostra de semi-esferas utilizada para medição de coeficiente de espalhamento.

Os primeiros resultados obtidos foram comparados com valores publicados por Jeon *et al.* em 2004 que utilizaram semi-esferas de vários tamanhos onde eram determinados os coeficientes de espalhamento das amostras formadas por cada tipo de semi-esferas. A partir de um ajuste de escala dos resultados publicados, sendo que as medições de Jeon *et al.* (2004) foram realizadas para uma escala de 1:10, realizou-se o comparativo entre os valores determinados para as esferas em gesso e os valores publicados por Jeon. A Figura 5.5 mostra o gráfico dos valores obtidos de coeficiente de espalhamento para amostra composta por semi-esferas em gesso comparados com os valores retirados da pesquisa mencionada.

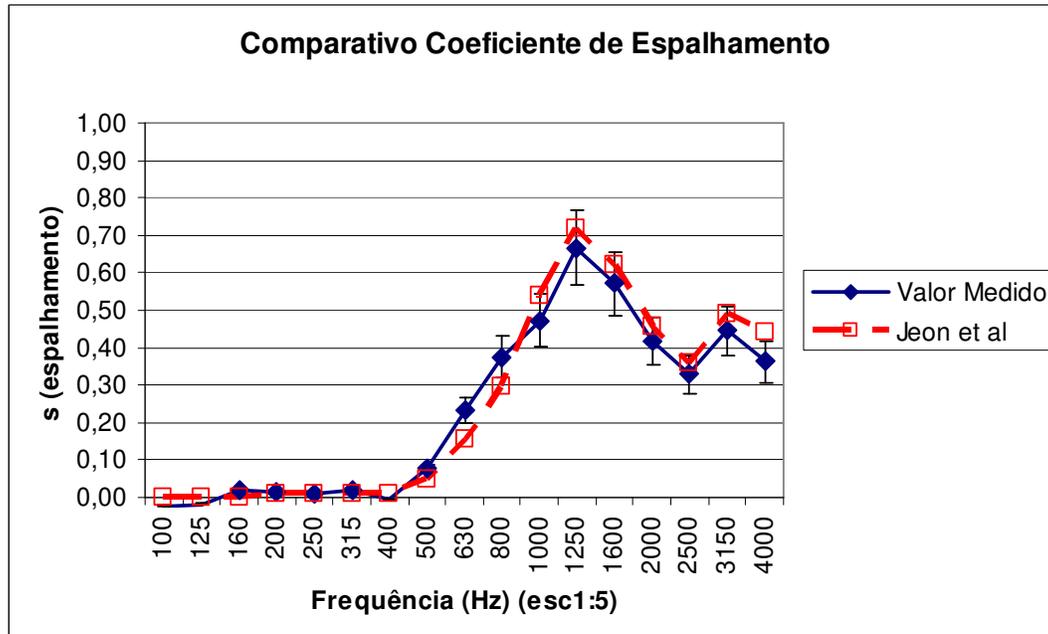


Figura 5.5. Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento para amostras medidas e obtidas em publicação de Jeon *et al.* (2004).

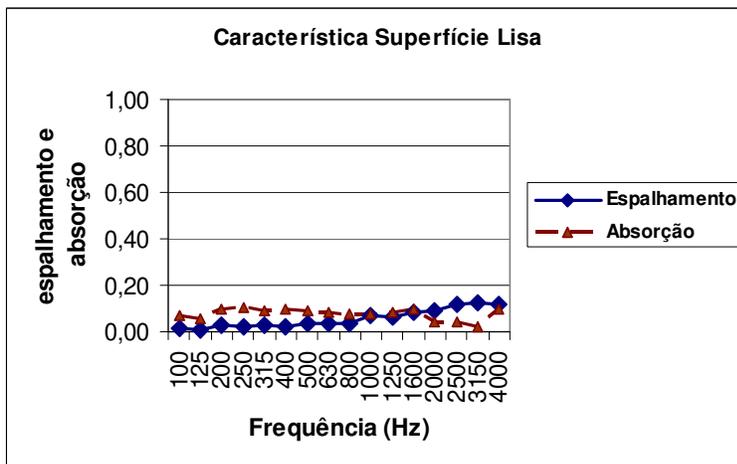
Observa-se na Figura 5.5 que os valores obtidos com as medições dos coeficientes de espalhamento da amostra composta por semi-esferas em gesso estão com valores equivalentes de acordo com os desvios calculados segundo norma ISO 17497:2004.

5.3 Determinação dos coeficientes de espalhamento de superfícies utilizadas em modelos computacionais

Com o aparato de ensaio ajustado para determinação do coeficiente de espalhamento, foram realizadas medições para determinar os coeficientes de absorção sonora e de espalhamento para materiais que representassem as superfícies do auditório da ADUNICAMP, utilizado como base para caracterização de um panorama acústico.

As superfícies do auditório da ADUNICAMP são, em sua maioria, lisas com acabamento em reboco. O teto possui um padrão estrutural por conta das vigas utilizadas para fixação do lambri. A platéia representa uma superfície com muitas reentrâncias e suas características foram modeladas diretamente no programa.

As paredes de reboco liso foram representadas por medições de uma chapa de MDF com revestimento reflexivo em uma das faces. O material no interior da câmara reverberante e os resultados dos coeficientes de espalhamento e absorção em função da frequência são mostrados na Figura 5.6.



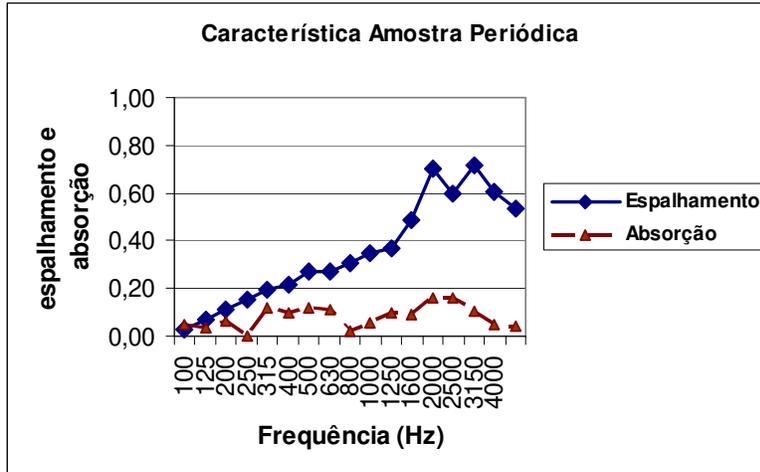
(a)



(b)

Figura 5.6. a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora; b) foto do material medido dentro da câmara.

O teto do auditório é formado por madeiras espaçadas periodicamente e o coeficiente de espalhamento foi determinado com uma superfície similar em escala 1:5. As características desta superfície são apresentadas na Figura 5.7.



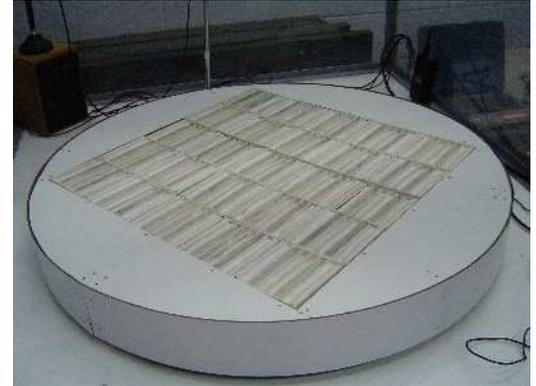
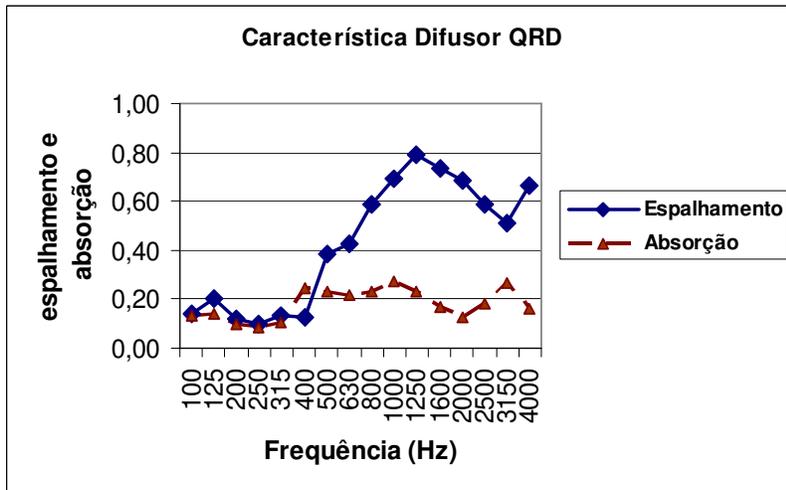
(a)



(b)

Figura 5.7. a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora; b) foto do material medido dentro da câmara.

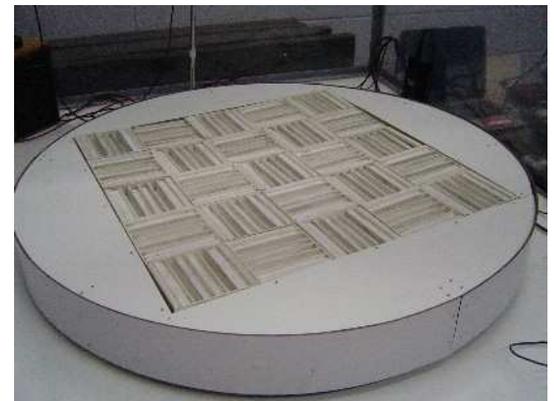
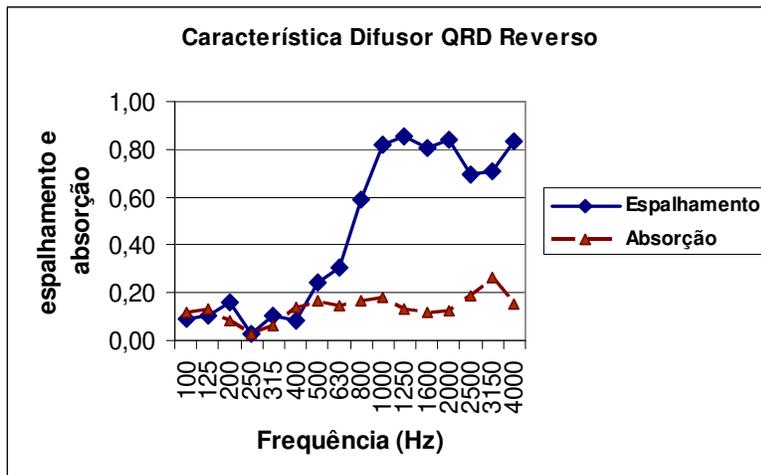
Para as alterações que foram realizadas na sala de trabalho, o coeficiente de espalhamento foi obtido a partir de medições de difusores de resíduos quadráticos (QRD – *Quadratic Residue Diffusers*). Estes foram construídos e seus coeficientes de espalhamento foram determinados para dois tipos de modulação: direcionada e transversa. As Figuras 5.8 e 5.9 mostram os coeficientes de espalhamento e de absorção determinados para estes elementos, respectivamente.



(b)

(a)

Figura 5.8. a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora; b) esquema de montagem dos difusores QRDs na mesa de ensaios.

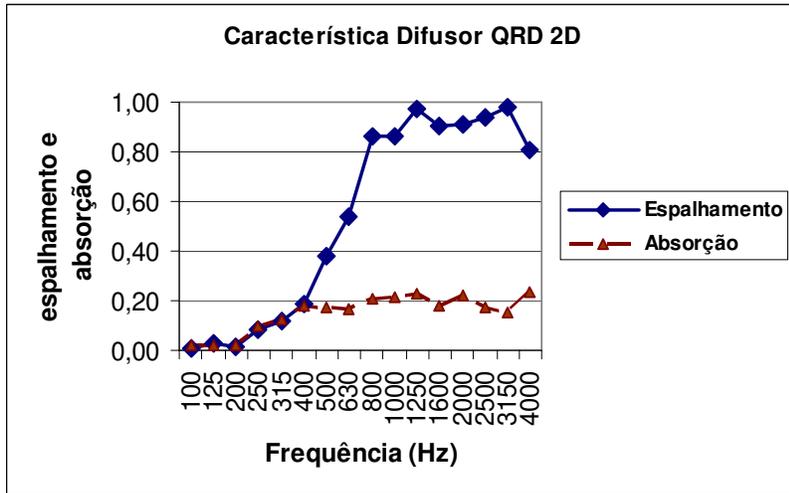


(b)

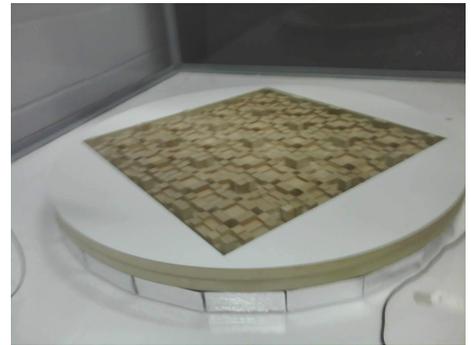
(a)

Figura 5.9. a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora; b) esquema de montagem dos difusores QRD's transversos na mesa de ensaios.

Outra superfície muito utilizada em salas e estúdios é o difusor QRD 2D. Esse difusor tem como característica criar a difusão de um difusor de resíduos quadráticos, mas em duas direções de propagação e não apenas uma como os difusores QRDs convencionais. As características deste difusor e sua montagem no ensaio são mostradas na Figura 5.10.



(a)



(b)

Figura 5.10. a) Gráfico com coeficientes de espalhamento e de absorção sonora; b) esquema de montagem do material QRD 2D na mesa de ensaios.

5.4 Validação do modelo computacional

Com os coeficientes de espalhamento determinados, um modelo computacional foi construído e simulado para se obter sua resposta impulsiva. Um comparativo com resultados obtidos deste modelo e medições reais foi realizado para verificação e qualificação do uso do programa de simulação. Foram comparados, auditivamente, amostras sonoras auralizadas com as duas respostas impulsivas, a medida e a modelada.

Criado o modelo computacional do auditório da ADUNICAMP, foram determinadas as características acústicas deste modelo e estas comparadas com os valores obtidos das medições realizadas neste mesmo auditório.

O modelo virtual criado com os devidos materiais utilizados está mostrado na Figura 5.11.

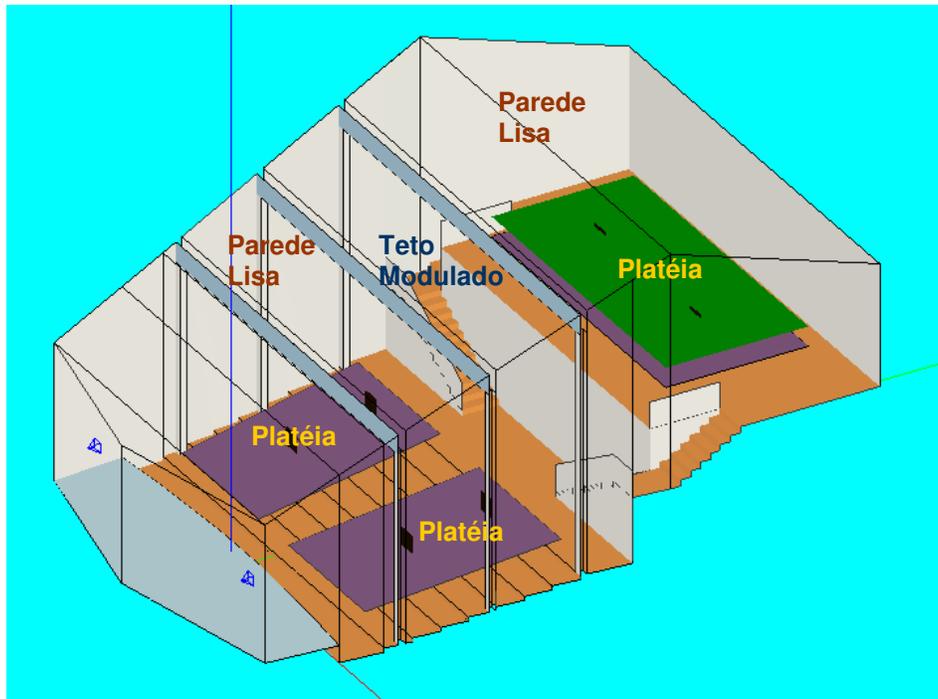


Figura 5.11 – Modelo computacional do auditório da ADUNICAMP criado com as características acústicas das superfícies indicadas.

Os coeficientes de absorção e de espalhamento determinados experimentalmente em câmara reverberante reduzida, para a superfície lisa e para o teto, foram utilizados no modelo. Para a platéia, foi utilizado, conforme recomendação do fabricante do *software*, o modelo para cálculo de coeficiente de espalhamento e o material da biblioteca do *software* identificado como “poltrona estofada para teatro”. Este modelo de cálculo é uma aproximação de valores de coeficiente de espalhamento para serem utilizados em superfícies que não possuam coeficiente de espalhamento determinado (VORLÄNDER, 2007).

As medições das respostas impulsivas do auditório foram realizadas com duas posições de fonte e seis posições de microfone e foi utilizada a técnica de excitação por sinal de varredura de senos com o *software* de medição DIRAC da Brüel&Kjaer. A fonte sonora foi um dodecaedro da Brüel&Kjaer modelo 4206. As posições de microfone e fonte sonora podem ser observadas na Figura 5.12 que contempla uma planta simplificada do auditório.



Figura 5.12. Pontos de microfones e fontes da medição realizada no auditório da ADUNICAMP.

O cálculo dos principais parâmetros realizado pelo programa computacional E.A.S.E., foi obtido a partir de simulações da resposta impulsiva de cada posição de fonte para cada posição de receptor. Foram utilizadas as mesmas posições de fonte e microfone das medições do auditório. O comparativo entre as médias dos valores de tempo de reverberação (TR) obtido nas medições e simulado pelo programa computacional E.A.S.E. é apresentado na Figura 5.13.

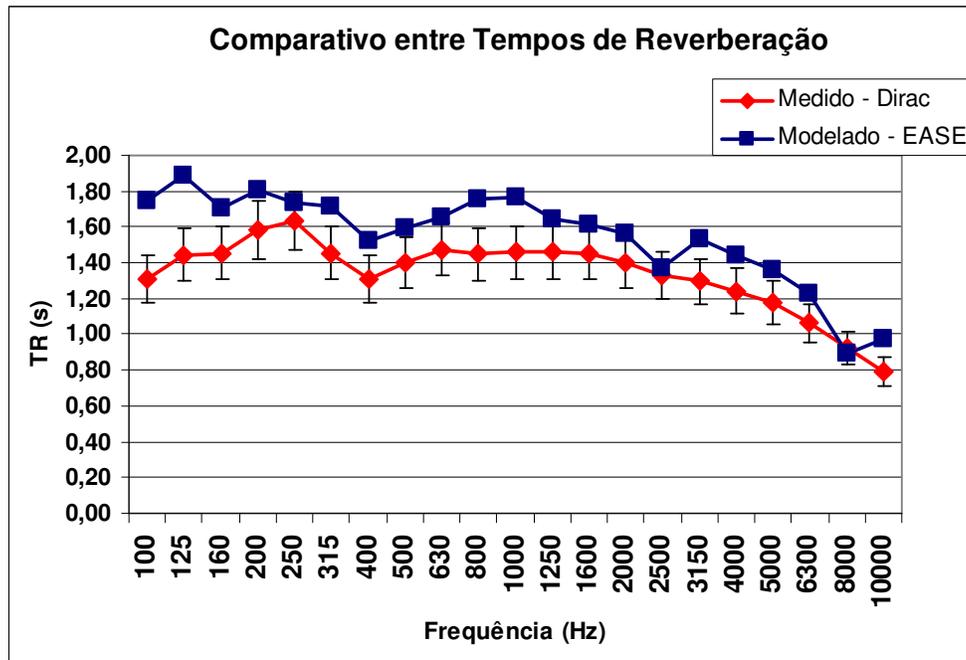


Figura 5.13. Comparativo entre valores de Tempos de Reverberação calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

Apesar da mesma tendência apresentada dos valores modelados pelo E.A.S.E. comparados aos valores medidos pelo DIRAC, os valores modelados apresentaram desvios de até 0,2 s, representando uma variação de 16%, no pior caso. Como a finalidade da comparação é validar um modelo para uso em auralização o desvio máximo percebido é de 5%, segundo Bork (2000), citando a norma de ensaios ISO 3382:1997.

Com a simulação da resposta impulsiva da sala pelo programa computacional E.A.S.E., pode-se comparar os valores dos parâmetros acústicos associados às primeiras reflexões do ambiente calculadas com as medidas com o programa de medição DIRAC. A comparação das médias dos valores de EDT medidos com simulados pode ser observada na Figura 5.14.

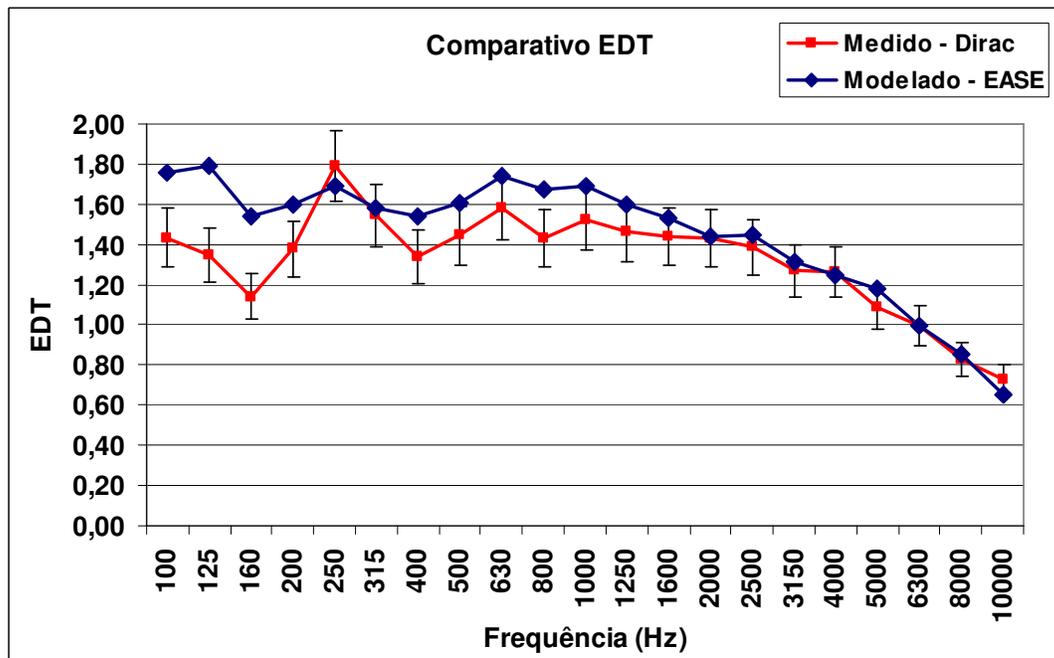


Figura 5.14. Comparativo entre valores de EDT calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

Conforme visto na Figura 5.14 os valores calculados do parâmetro EDT no E.A.S.E. mostraram valores acima dos limites para atributos subjetivos comparados aos valores obtidos de medições com o DIRAC para frequências abaixo de 1000 Hz. Estes limites foram apresentados por Bork (2000), segundo a norma de ensaios ISO 3382:1997.

Outro parâmetro dependente das primeiras reflexões é o C80 que é conhecido como clareza; que representa a quantidade de energia que chega nos primeiros 80 ms após o término do som produzido em um recinto. Este fator também pode ser calculado pelo modelo computacional. O gráfico com a comparação das médias dos valores de C80 calculados e medidos é apresentado na Figura 5.15.

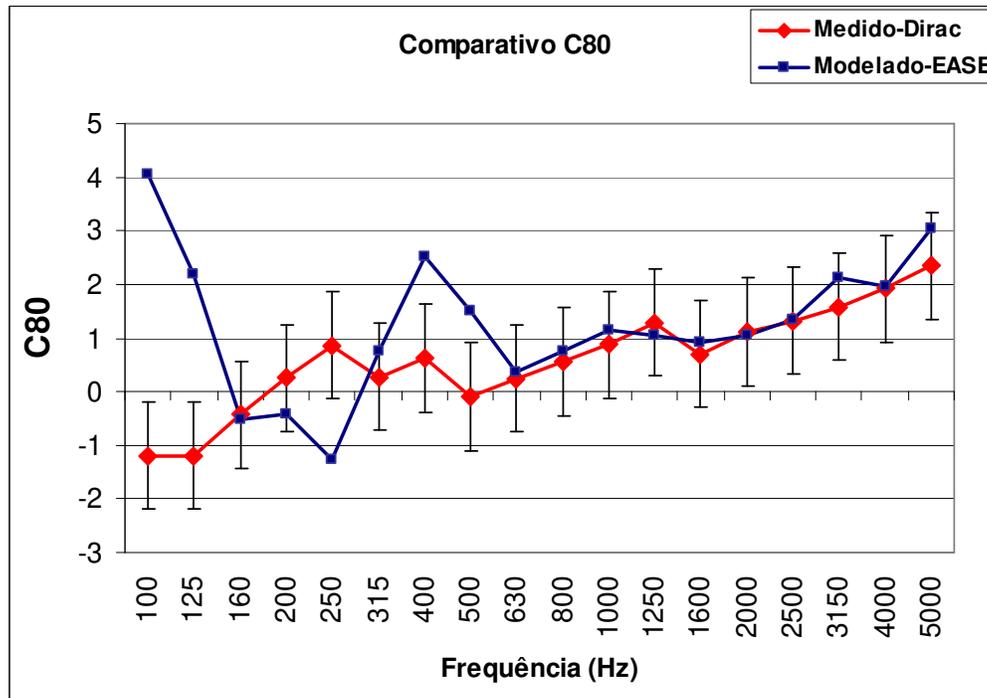


Figura 5.15. Comparativo entre valores de C80 calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

Para valores de C80, os limites percebidos, segundo Bork (2000), são de 1dB. No gráfico da Figura 5.15, observam-se valores fora da faixa considerada, principalmente para frequências abaixo de 630 Hz.

As médias dos valores calculados e medidos de D50 em função da frequência podem ser observados na Figura 5.16.

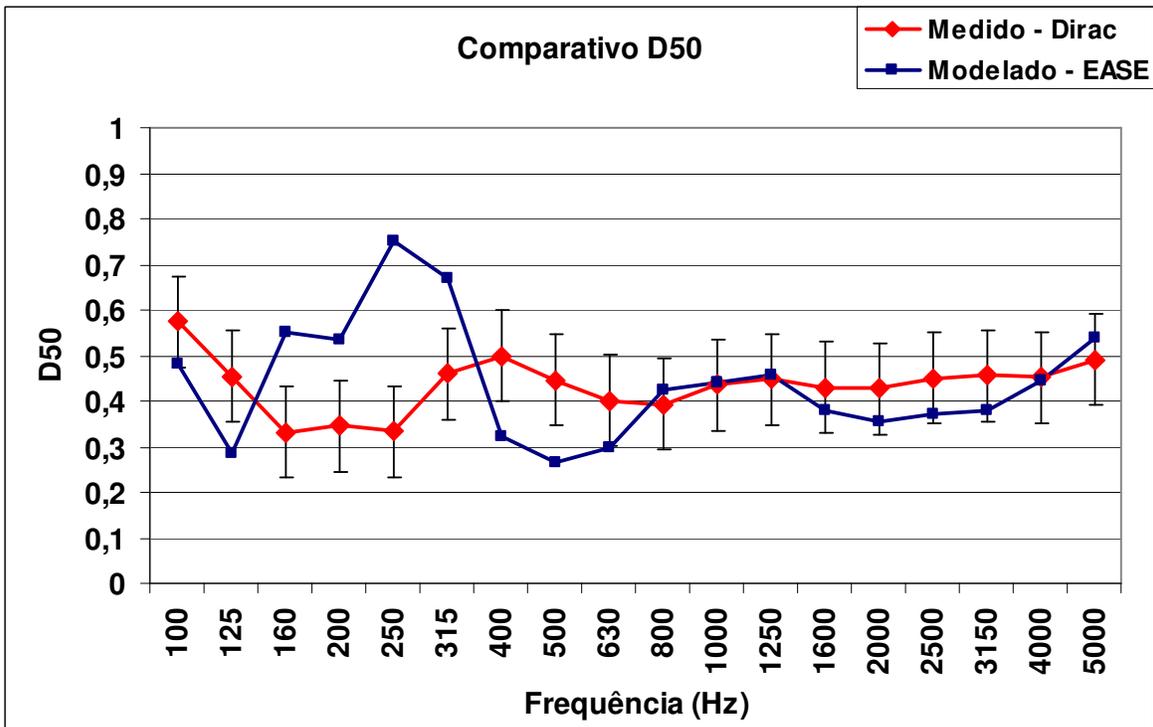


Figura 5.16. Comparativo entre valores de D50 calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

Os valores de D50 calculados pelo programa computacional E.A.S.E. ficaram fora da faixa de valores considerados como limites subjetivos, segundo Bork (2000). Estas diferenças ocorreram para valores abaixo de 630 Hz.

Complementando os parâmetros acústicos, cujos valores podem ser calculados pelo programa de simulação E.A.S.E. e que foram determinados a partir das medições das respostas impulsivas medidas no auditório da ADUNICAMP, a determinação do índice de transmissão da fala (STI - *Speech Transmission Index*) e da perda de articulação consonantal (%ALC - *Articulation Loss Consonant*) foram realizadas para cada arranjo entre fonte e microfone. Os resultados obtidos estão na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados determinados de STI e %ALC obtidos pelo software de medição DIRAC e pelo software de modelagem E.A.S.E..

DIRAC	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5	F1M6	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5	F2M6
STI	0,56 (Fair)	0,56 (Fair)	0,54 (Fair)	0,54 (Fair)	0,53 (Fair)	0,54 (Fair)	0,56 (Fair)	0,55 (Fair)	0,55 (Fair)	0,54 (Fair)	0,53 (Fair)	0,55 (Fair)
% ALC	8,3	8	9,2	9,3	9,7	9	8	8,5	8,5	8,9	9,4	8,8

E.A.S.E.	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5	F1M6	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5	F2M6
STI	0,54 (Fair)	0,53 (Fair)	0,53 (Fair)	0,54 (Fair)	0,53 (Fair)	0,54 (Fair)	0,55 (Fair)	0,55 (Fair)	0,55 (Fair)	0,53 (Fair)	0,52 (Fair)	0,53 (Fair)
% ALC	9,09	8,5	9,11	9,3	9,48	9,83	9,1	8,8	8,3	9	9,4	9,8

No caso dos parâmetros de STI e %ALC da Tabela 3 os valores obtidos da medição com o DIRAC e os valores calculados pelo E.A.S.E. apresentaram diferenças consideradas imperceptíveis, principalmente para o pior caso: na posição F1 de fonte e posição M6 de microfone.

A partir das diferenças observadas nos valores de T30, C80, D50 e EDT, realizou-se um detalhamento do modelo computacional para obter uma estimativa física da interferência causada pelas poltronas do auditório. Considerando a importância de se ter uma boa aproximação nos fatores de impressão espacial para criar uma boa resposta impulsiva pelo programa, uma nova modelagem foi feita e o modelo com a platéia detalhada pode ser observado na Figura 5.17.

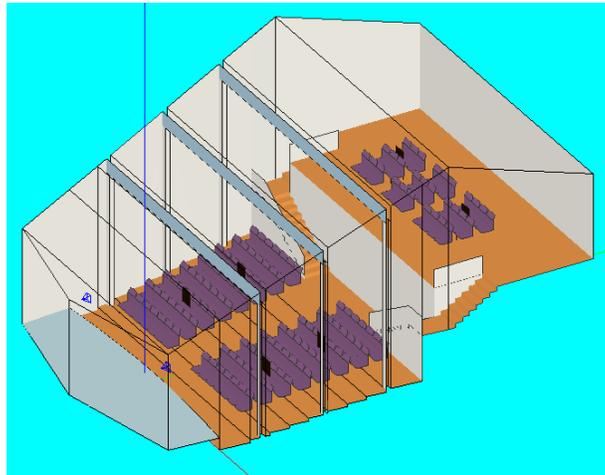


Figura 5.17. Modelo computacional do auditório da ADUNICAMP criado com a platéia detalhada.

Um novo cálculo foi feito a partir das novas condições e as principais características foram obtidas pelo programa computacional E.A.S.E.. O comparativo entre os valores obtidos nas medições e simulado pelo programa computacional E.A.S.E. é apresentado na Figura 5.18.

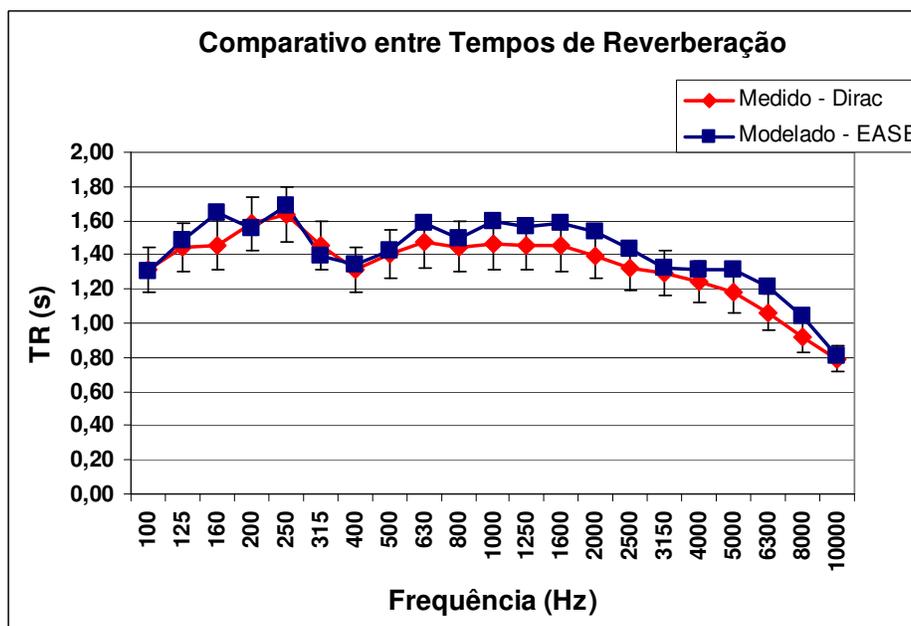


Figura 5.18. Comparativo entre valores de Tempos de Reverberação calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

O parâmetro EDT foi comparado novamente e o resultado pode ser visto na Figura 5.19.

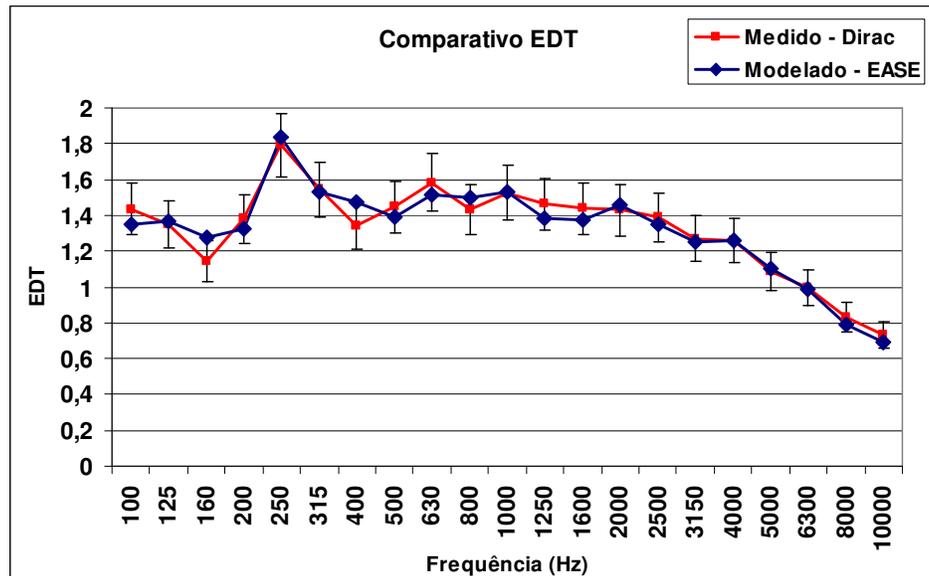


Figura 5.19. Comparativo entre valores de EDT calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

O C80 foi comparado novamente com o valor medido e é apresentado na Figura 5.20.

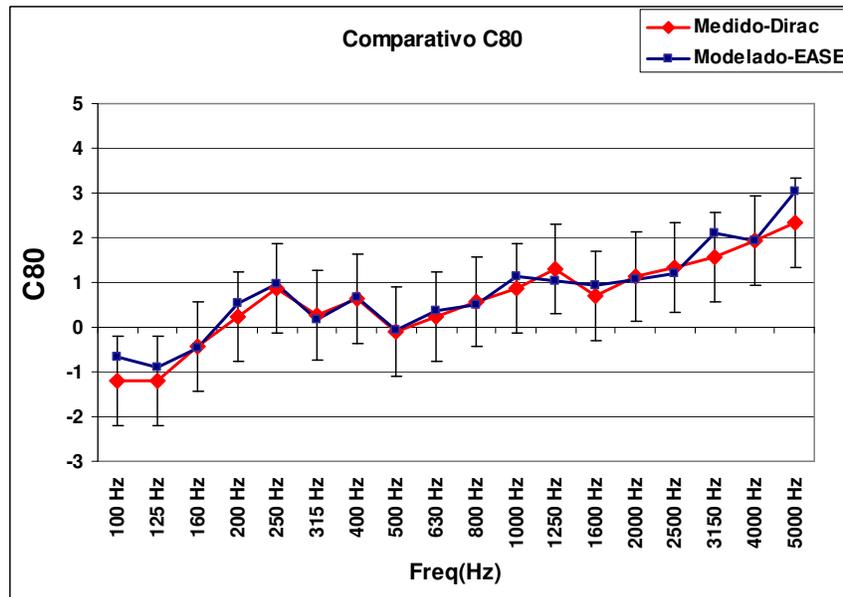


Figura 5.20. Comparativo entre valores de C80 calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

O novo valor do fator D50 foi comparado com os valores medidos e o gráfico comparativo entre os dois pode ser visto na Figura 5.21.

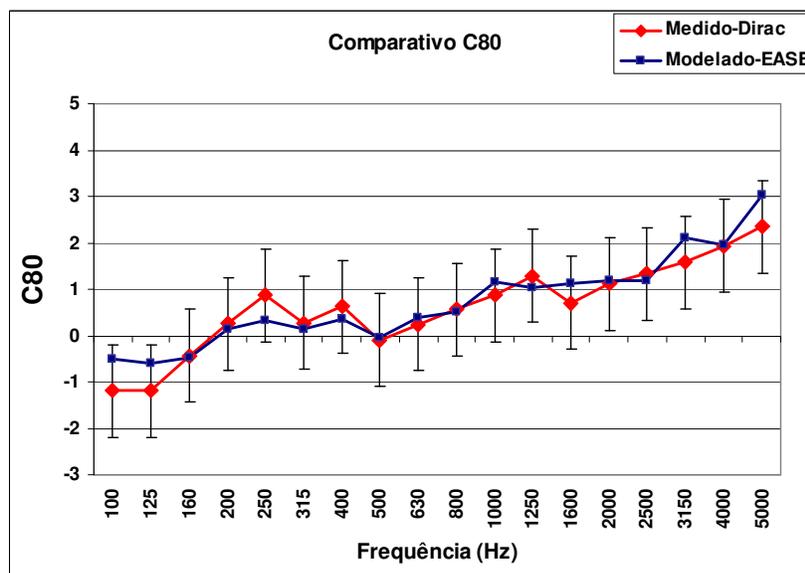


Figura 5.21. Comparativo entre valores de D50 calculados pelo programa computacional E.A.S.E. e medidos no auditório da ADUNICAMP.

Os valores de STI (Speech Transmission Index) e *Articulation Loss* (%ALC) encontrados com o novo modelo foram os mesmos que os anteriores da Tabela 5.1.

Com os novos cálculos realizados observa-se que os parâmetros T30, EDT, C80 e D50 resultaram dentro da faixa considerada como limite subjetivo, validando assim os valores dos parâmetros acústicos que foram calculados com o programa computacional E.A.S.E.

Com a utilização desta metodologia e a verificação de que os valores dos parâmetros de qualidade acústica apresentam uma certa discrepância aos valores medidos, verifica-se que esta metodologia depende da quantidade de lugares envolvidos. Para os exemplos apresentados pelos fabricantes de *softwares* as audiências representadas por planos modelados são audiências com uma grande quantidade de lugares, acima de 600, enquanto que para alguns casos, como o auditório da ADUNICAMP a menor quantidade de lugares faz com que seja necessário considerar a modelagem das poltronas como elementos de difração dentro do ambiente modelado.

Para a validação das respostas impulsivas criadas pelo programa computacional E.A.S.E., um comparativo foi realizado utilizando uma resposta impulsiva medida e uma resposta impulsiva criada pelo programa. A partir da convolução entre um sinal anecóico de um piano e a resposta impulsiva criada pelo programa computacional e medida, foram criados dois sinais com impressões espaciais. Estes dois sinais foram apresentados a um júri de 30 pessoas sem identificar qual sinal era o convoluído com a resposta medida e qual sinal era o convoluído com a resposta criada pelo programa. O teste foi realizado por um programa em Power Point ® com o qual se podia escolher qualquer um dos sinais resultantes classificando-o como sendo o sinal “X”, depois apresentava o sinal “A” e o sinal “B” sendo um o sinal convoluído com a resposta impulsiva medida e o outro com a resposta impulsiva criada pelo programa.

Os ouvintes que compuseram o júri passaram por uma triagem auditiva para verificar se não havia problemas de audição que comprometessem os testes, de acordo com procedimento de triagem auditiva consultado da ASHAE, baseado na norma OSHA 1910-95-App E.

As respostas obtidas da comparação entre os sinais auralizados das trinta pessoas avaliadas foram convertidas em um gráfico observado na Figura 5.22.

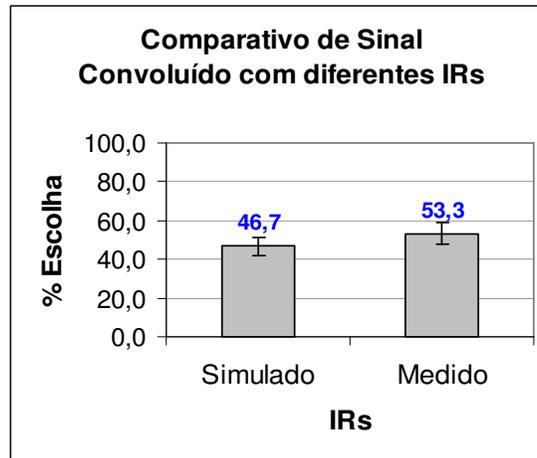


Figura 5.22. Percentual de escolha de sinal anecóico convoluído com sinal medido e sinal anecóico convoluído com sinal criado por programa de modelagem acústica.

Observando os erros obtidos para a escolha dos dois valores analisados, simulado e medido, verifica-se a equivalência entre eles pelo erro admissível de 10% dos valores percentuais. Sendo assim pode-se afirmar que a diferença entre os dois resultados foi pouco percebida pelos ouvintes.

5.5 Teste de percepção auditiva dos panoramas acústicos

Para os testes de percepção auditiva dos panoramas acústicos uma sala denominada sala de trabalho foi projetada para uma boa audibilidade para música. As proporções foram calculadas baseando-se no modelo de largura, comprimento e altura de Bolt, Beranek e Newman com o auxílio do Prof. Dr. José Augusto Mannis do Instituto de Artes da Unicamp. As dimensões finais foram de 6,5 m x 8 m x 5 m, cujos fatores de proporção são 1,3 x 1,6 x 1,0. A sala modelada no

programa computacional E.A.S.E. e o diagrama de Bolt, Beranek e Newman com a marcação da proporção da sala são mostrados na Figura 5.23.

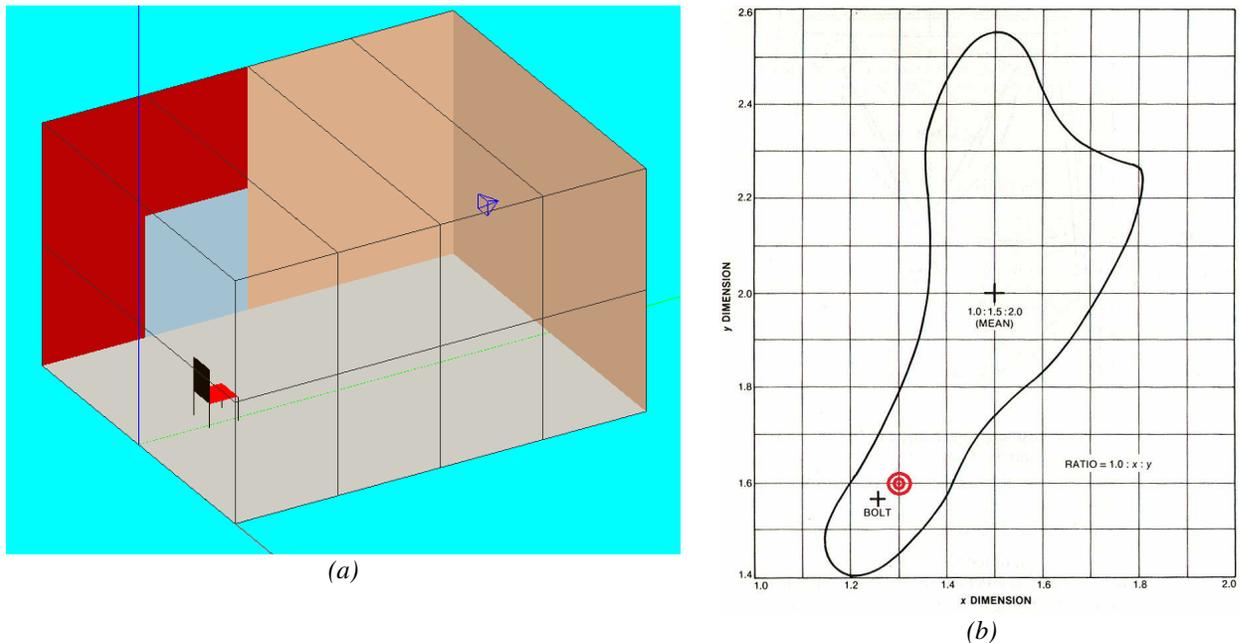


Figura 5.23 – Sala de trabalho projetada com as dimensões calculadas para uma boa audibilidade para música: a) modelo no programa computacional E.A.S.E. b) Diagrama de Bolt, Beranek e Newman para as proporções da sala, marcadas com um círculo vermelho.

A verificação da influência de posição das placas de difusores foi feita para difusores colocados próximos à fonte sonora e para os difusores colocados próximos ao receptor. Com relação à quantidade de difusão, os difusores colocados na lateral tiveram seus valores de coeficiente de espalhamento alterados de acordo com o material colocado. A sala foi projetada para ter um tempo de reverberação médio de 0,6 s. As alterações dos coeficientes de espalhamento para cada condição testada foram feitas sem alterar o tempo de reverberação médio da sala.

Durante os testes, o ruído de fundo local foi medido e verificado para garantir que este não influenciasse o resultado do teste. Para esta verificação, tomou-se como base os valores de nível de pressão sonora exigidos pelas recomendações de triagem auditiva da *American Speech-Language-Hearing Association* (ASHA), baseado na norma OSHA 1910-95-App E. Os níveis de pressão sonora foram medidos por um medidor de nível de pressão sonora da marca 01 dB,

modelo SLM, calibrado com precisão tipo 1. O gráfico com os valores máximos obtidos para todos os testes válidos, em bandas de terço de oitava, comparados aos valores máximos permitidos pela OSHA 1910-95-App E é mostrado na Figura 5.24.

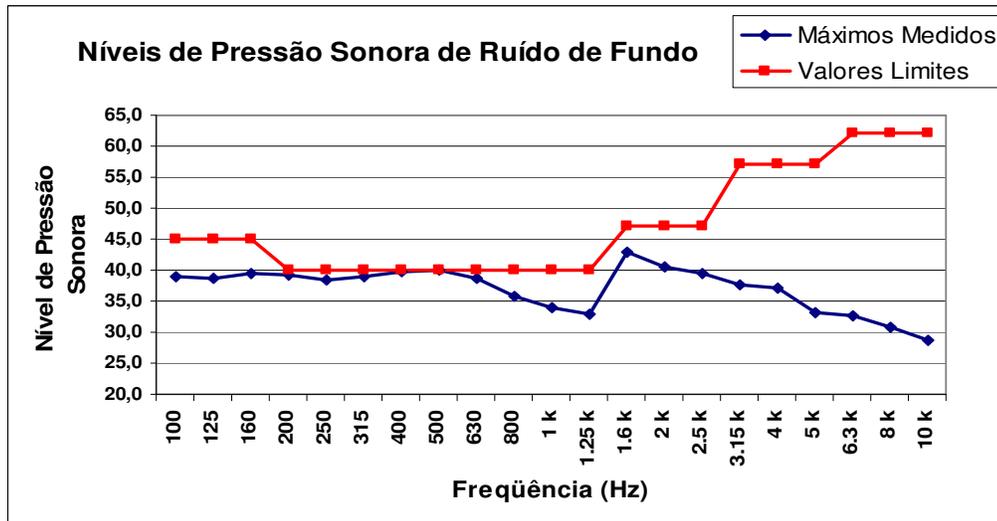


Figura 5.24. Gráfico comparativo dos Níveis de Pressão Sonora do ruído de fundo máximo medido nos locais de realização dos testes e valores limites permitidos de acordo com a OSHA 1910-95-App E.

A partir de um sinal gravado sem impressão espacial, convoluído com as respostas impulsivas de cada condição de sala, foram obtidos sinais representativos da impressão espacial de cada condição de sala. Foram escolhidos três sinais, denominados de amostras 1, 2 e 3. A amostra 1 é um sinal gravado de um violino tocando pausadamente com suavidade. A amostra 2 é um sinal gravado de um violino tocando com mais velocidade e ataque. A amostra 3 é um sinal gravado de um violino tocando em *pizzicato*.

As condições propostas para o estudo da percepção indicadas nos gráficos são determinadas de acordo com a quantidade de difusão e localização da mesma na sala e denominadas de:

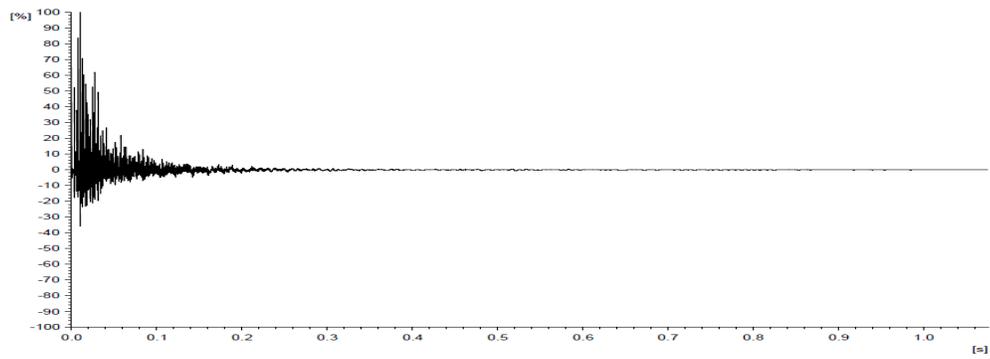
Condição 1 – Placas com difusores QRD utilizado de forma transversa colocados nas paredes próximas e atrás da fonte sonora;

Condição 2 – Placas com difusores QRD utilizado de forma transversa colocados nas paredes próximas e atrás do receptor;

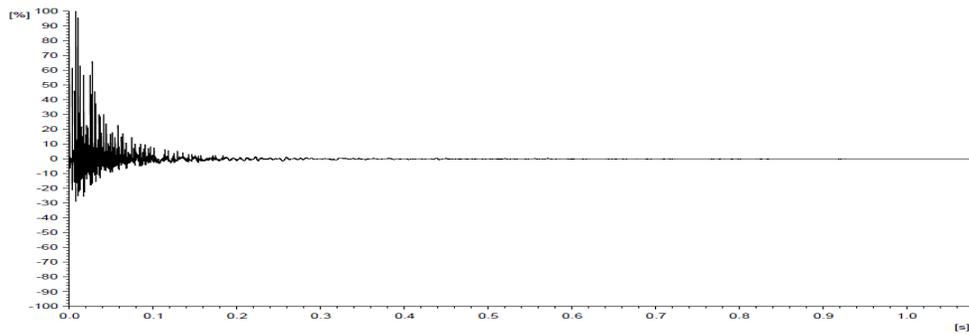
Condição 3 – Placas com difusores QRD transverso nas paredes laterais da sala;

Condição 4 – Placas com difusores QRD 2D colocadas nas paredes laterais da sala.

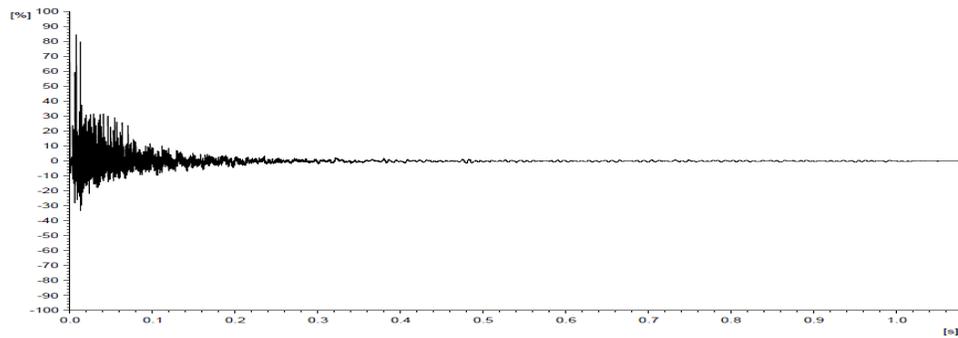
Os gráficos das respostas impulsivas modeladas pelo programa computacional E.A.S.E. das condições propostas para o estudo da percepção estão mostrados na Figura 5.25.



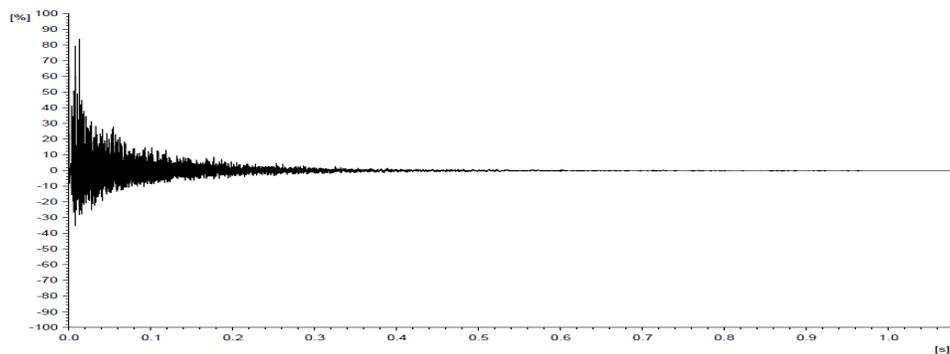
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.25 – Respostas Impulsivas obtidas pelo programa computacional E.A.S.E. para as condições propostas: a) condição 1; b) condição 2; c) condição 3; d) condição 4.

Para a condição 1, obteve-se uma resposta impulsiva com uma concentração de energia nas primeiras reflexões, o que criou uma sensação de maior intensidade sonora, quando comparada ao som sem impressão espacial.

Quando os difusores foram colocados próximos ao receptor (condição 2), a resposta impulsiva obtida da sala não apresentou a mesma energia nas primeiras reflexões que a apresentada na resposta impulsiva dos difusores colocados próximos à fonte sonora.

A condição 3, que é a condição de colocação dos difusores nas paredes laterais entre a fonte e o receptor, teve como resultado na resposta impulsiva uma aglomeração da energia nas primeiras reflexões. Foi observado também um aumento de energia na cauda reverberante da resposta impulsiva, comparando as repostas obtidas para os difusores atrás da fonte sonora e do receptor.

A colocação de difusores com valores de coeficientes de espalhamento maiores nas paredes laterais entre a fonte e o receptor, denominada condição 4, teve como resultado uma resposta impulsiva com aumento de energia nas primeiras reflexões e na cauda reverberante quando comparada com as respostas obtidas com as outras condições.

Para os panoramas acústicos auralizados de cada uma das condições, os ouvintes respondiam o quão próximo dos extremos de cada fator de avaliação de qualidade acústica de sala o sinal convoluído estava graduando subjetivamente de 0 a 100 unidades em uma barra de rolagem. O valor zero representa a amostra sem a impressão do fator de avaliação e 100 com perceptível influência do fator de avaliação.

Os resultados foram representados por histogramas em que a ocorrência de dez em dez unidades foi marcada para o eixo das abscissas do histograma. Os fatores de graduação utilizados para os extremos dos sinais são o dobro dos fatores recomendados pela ITU - BS 1666 para avaliação subjetiva de sistemas de qualidade de áudio. Segundo a técnica de comparativos entre extremos, os arquivos a serem comparados devem ser subjetivamente pontuados entre os extremos para verificação de condições de tendências existentes.

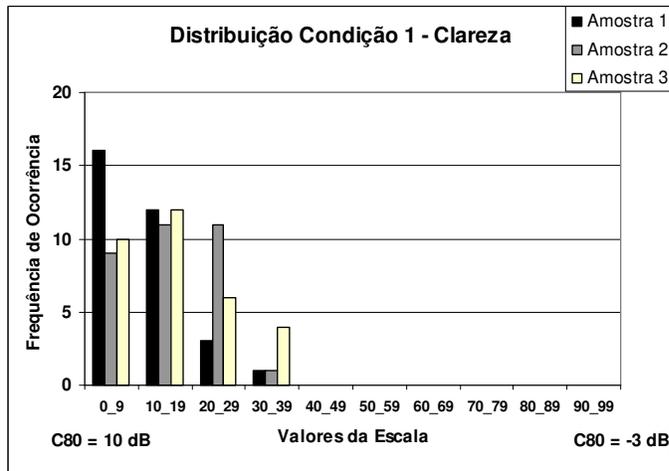
O procedimento completo de teste por indivíduo do júri levou de 40 a 80 min, incluindo a explicação inicial e as aferições dos níveis emitidos pelo sistema antes e depois de cada teste.

O total de indivíduos que fizeram parte do júri e responderam ao questionário foi de 35, dos quais foram validados 32 testes. Os testes que foram invalidados tiveram como motivo o ruído de fundo da sala utilizada para testes acima dos limites permitidos ou resultado negativo no procedimento de triagem auditiva.

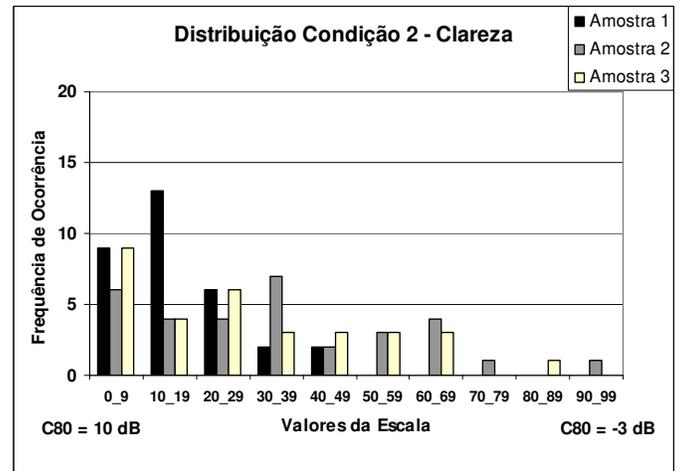
Para a definição do número de ouvintes que deveriam compor o júri, foi realizado o cálculo de número mínimo de amostra considerando as respostas como uma distribuição do tipo *t-student*, e obteve-se para a maior variância encontrada o valor mínimo de 30 amostras. Maiores detalhes com relação ao procedimento de cálculo do número mínimo de amostras estão mostrados no Apêndice B.

Os resultados dos testes de percepção da influência do coeficiente de espalhamento em cada atributo acústico subjetivo são mostrados a seguir.

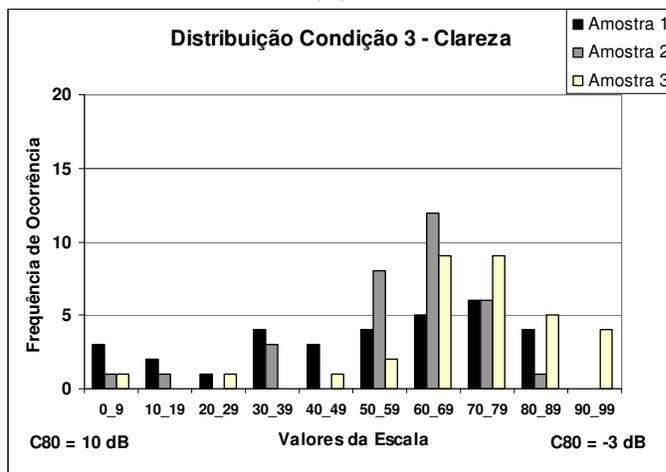
A Figura 5.26 mostra os resultados obtidos para as três amostras sonoras com a indicação de escolha de maior ou menor percepção do fator de avaliação no eixo x do gráfico para o fator de Clareza percebido no interior da sala de trabalho. Para avaliação dos resultados, uma clareza de 10 dB corresponde a uma ótima definição musical e uma clareza de -3 dB corresponde a uma definição musical ruim. Não devem ser confundidos o termo “definição” com o parâmetro de descrição subjetiva de definição utilizada para verificação da correlação entre a energia que chega nos primeiros 50 ms ao ouvinte.



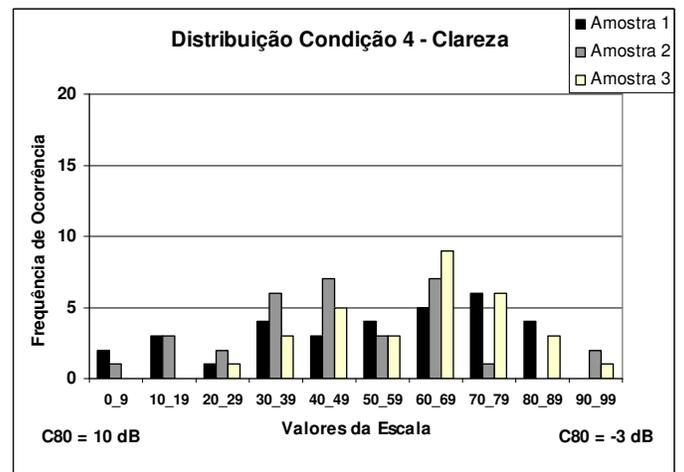
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.26 – Distribuição dos valores de clareza comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) na condição 4.

Analisando o parâmetro de clareza para a condição 1, observou-se uma correlação entre os valores obtidos das respostas dos ouvintes com uma boa clareza para as três amostras de música apresentadas. Considerando a relação da porção inicial de energia que chega ao ouvido com relação à energia das reflexões tardias, tomado como parâmetro o tempo de 80 ms, foi previsível a obtenção de uma boa clareza com a colocação dos difusores próximos à fonte sonora.

As respostas dos ouvintes para o fator de clareza na condição 2 mostrou um agrupamento nos valores de maior clareza para a amostra 1. Para as outras amostras, apesar de uma tendência de aglomeração para maior clareza, houve uma dispersão das respostas apontando apenas uma tendência de escolha de maior clareza.

Para a condição de colocação dos difusores nas paredes da sala de trabalho (condição 3) observou-se uma diminuição nas respostas dos ouvintes a respeito de valores de clareza. Sendo a clareza um fator inversamente dependente da reverberação de um local, quando aumentada a percepção da reverberação, com a colocação de difusores nas paredes laterais, diminui-se a sensação de clareza.

Com o aumento da energia na cauda reverberante, situação ocorrida na condição 3, a percepção de clareza acaba decrescendo para as amostras, comparada com os valores obtidos para as outras condições da sala de trabalho. A amostra 3 mostrou uma distribuição mais definida no sentido de diminuir a clareza observada nas outras condições.

A Figura 5.27 mostra os resultados obtidos para as três amostras sonoras comparadas nas quatro condições, com a indicação de escolha de maior ou menor percepção do fator de Lateralização dentro da sala. A lateralização de 10% significa a sensação de ouvir a fonte posicionada a frente do ouvinte com 10% da energia vindo do campo acústico lateral, enquanto que 60% de lateralização significa uma sensação de aumento da largura da fonte com relação ao receptor.

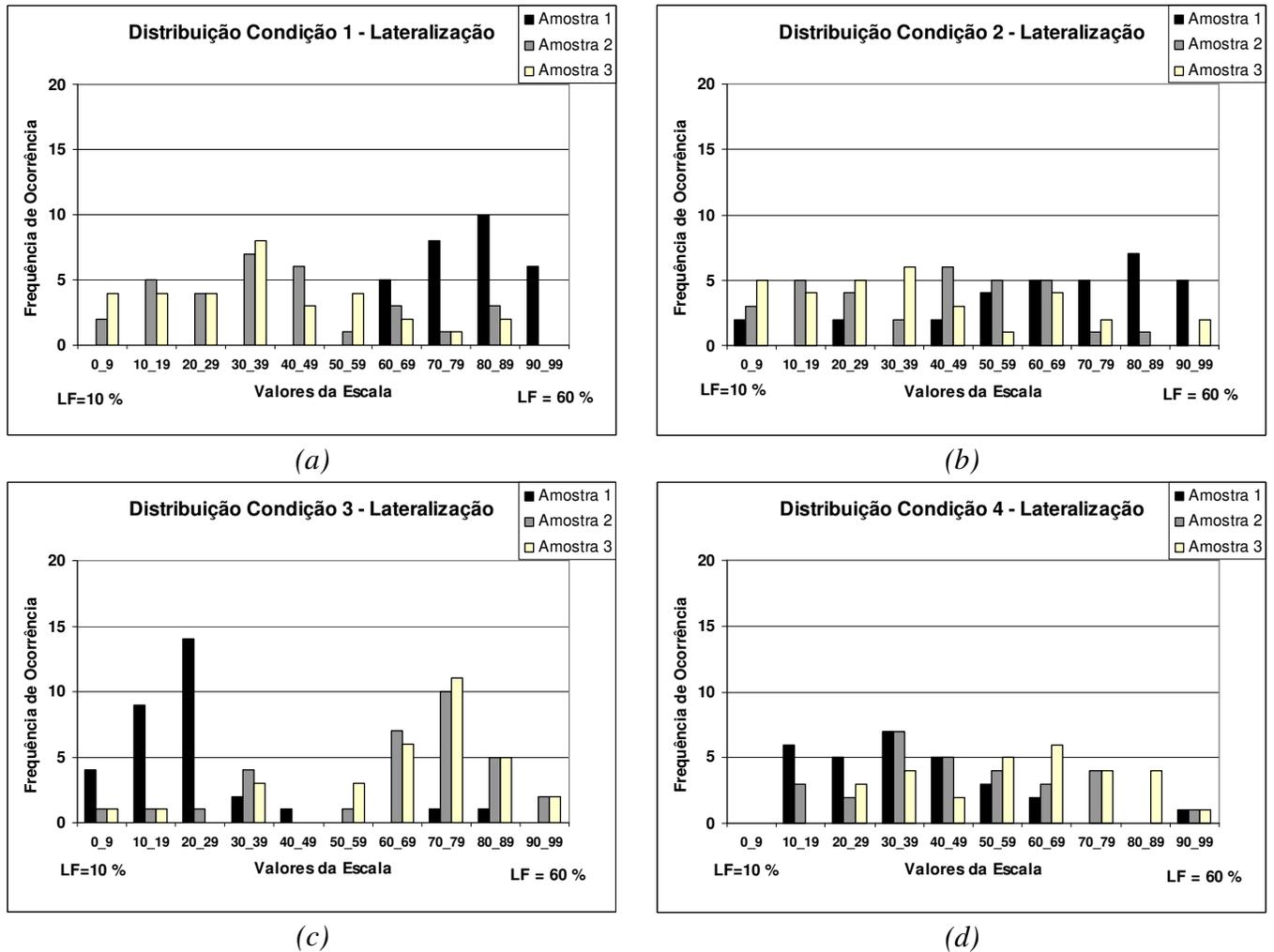


Figura 5.27 – Distribuição dos valores de lateralização comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) na condição 4.

A lateralização, considerando a condição de difusores próximos à fonte (condição 1), mostrou uma tendência de escolha dos ouvintes por uma sensação próxima a uma lateralização baixa. Isso ocorreu para as amostras com características de forte ataque na dinâmica de execução, no caso as amostras musicais 2 e 3. O resultado foi bem marcante e oposto para o caso da amostra musical 1 que tem uma dinâmica mais suave. Esta dinâmica poderia causar uma tendência a perceber uma expressão de preenchimento do ambiente o que faria com que os ouvintes não prestassem atenção à sensação de lateralização.

Para a condição 2 a lateralização mostrou fatores mais definidos para a amostra 1. Sendo esta amostra um som executado mais continuamente, pode ter ocorrido o mesmo fenômeno observado para a condição 1. Como a dinâmica de execução da amostra 1 é mais suave ela pode ter proporcionado uma sensação de preenchimento e, subjetivamente, um julgamento voltado para uma maior lateralização. As amostras 2 e 3, apesar de apresentarem uma tendência de distribuição para uma menor lateralização, mostraram uma dispersão muito grande para serem consideradas como parâmetro conclusivo.

O parâmetro de lateralização, na condição 3, mostrou que para amostras que dependem de uma dinâmica de execução mais rítmica e marcada, no caso amostras 2 e 3, foi observada na resposta dos ouvintes, uma percepção definida de lateralização, enquanto que para a amostra 1 que possui uma execução mais suave e contínua, há uma aglomeração da distribuição em valores baixos de lateralização.

Os difusores colocados nas paredes laterais tendem a criar uma noção de profundidade lateral o que explica o aumento da lateralização. Este aumento foi percebido por sinais de características impulsivas ou com mais ataque em sua dinâmica de execução, pois a sensação de localização foi percebida com a propagação dos sinais. Sinais mais contínuos confundem a sensação de localização por não terem pausa, ou queda do nível sonoro suficiente para verificação da propagação sonora.

A condição 4 apresentou a lateralização com uma dispersão com valores de desvio padrão que impossibilitam uma definição de tendência de percepção subjetiva para nenhuma das amostras apresentadas.

A Figura 5.28 mostra os resultados da ocorrência de escolha das amostras sonoras com relação às condições propostas. A reverberância tem como parâmetro objetivo o valor de EDT. A sensação de reverberação do ambiente utilizado é a mesma para o valor de EDT = 0,6 s. Para o caso do EDT = 1,2 s, a sensação de reverberação é o dobro daquela obtida com EDT = 0,6 s.

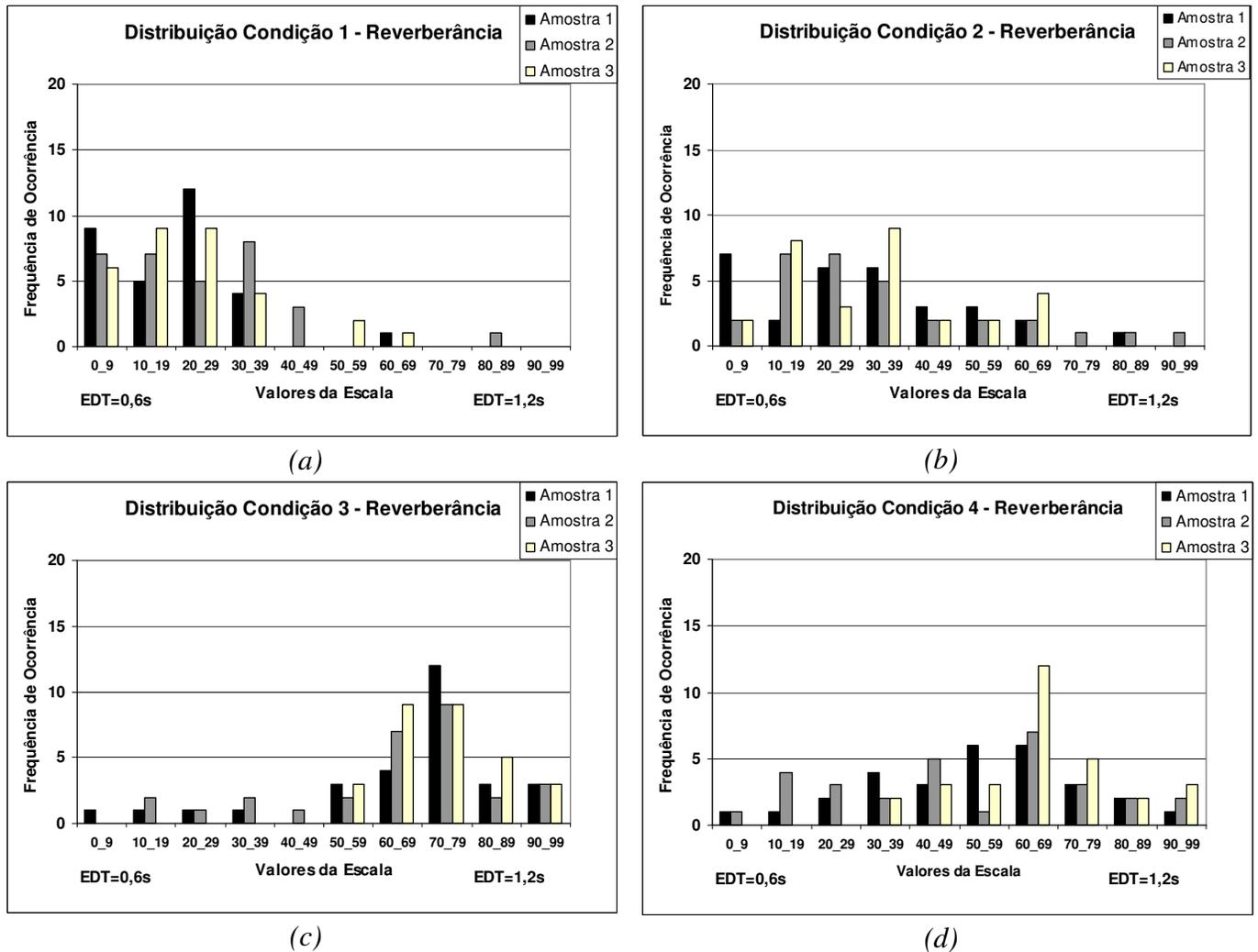


Figura 5.28 – Distribuição dos valores de reverberância comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) na condição 4.

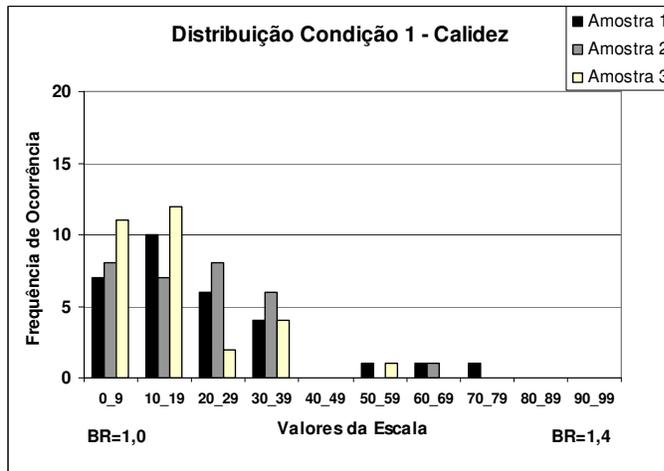
Os resultados dos questionários para os valores de reverberância, ou vivacidade, tenderam para a percepção de pouca reverberância para a condição 1. Este fato se deve à tendência de se ouvir em amostras auralizadas para a condição 1, difusores próximos a fonte sonora com mais clareza, o que é contrário a sensação de reverberação do ambiente.

Os gráficos obtidos para a reverberância na condição 2 mostraram uma tendência de escolha de valores com baixa percepção da reverberação. Os gráficos também mostraram uma grande dispersão dos valores, com altos valores de desvios padrão (Tabela 5.2).

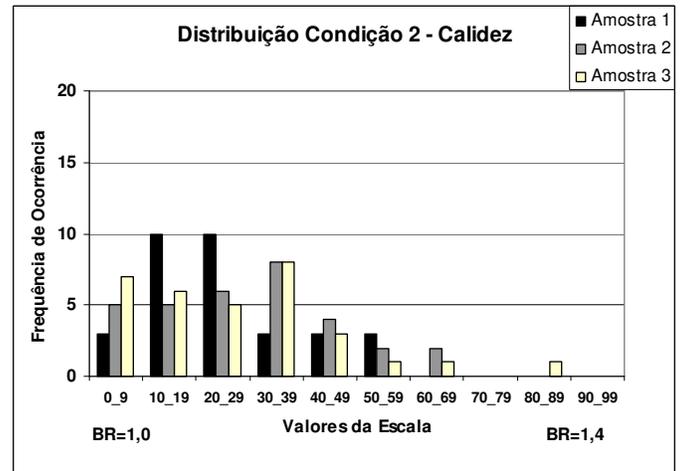
Devido à ocorrência do aumento de energia na cauda reverberante a sensação de reverberação tendeu a aumentar, conforme o que pode ser visto para a condição 3. Para as três amostras apresentadas, os ouvintes perceberam um aumento da sensação de reverberação na amostra.

O fator de reverberância para a condição 4 mostrou uma tendência de percepção dos ouvintes para a reverberação apenas para a amostra 3. As amostras 1 e 2 apresentaram uma dispersão nas respostas dos ouvintes, incapacitando a definição de uma tendência das avaliações subjetivas. A amostra 3, sendo uma amostra de característica impulsiva, possui características que permitiram uma maior percepção de reverberação, principalmente com a resposta impulsiva com energia nas primeiras reflexões e nas reflexões tardias. As amostras 1 e 2 sofrem uma indefinição em sua percepção causando a dispersão relatada.

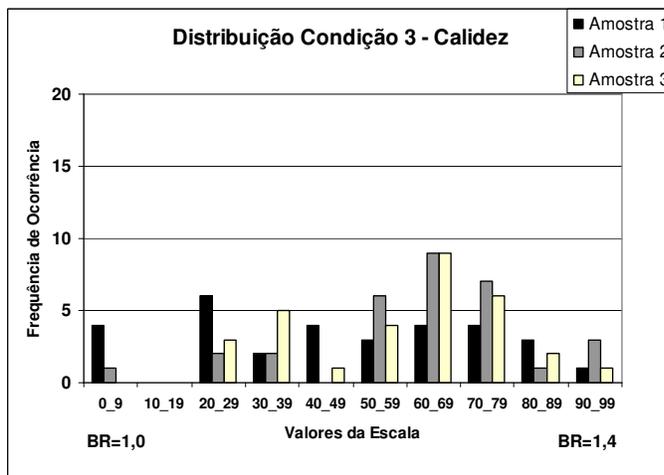
A Figura 5.29 mostra os resultados das respostas dos ouvintes para as três amostras sonoras comparadas nas condições de posicionamento de difusores e quantidade de espalhamento para o parâmetro de Razão de Graves. A Razão de Graves é expressa pela sensação de calidez, em que um valor de 1,0 não expressa impressão na amostra, enquanto que um valor de 1,4 cria uma sensação de calidez ou aumento de reverberação em baixas frequências.



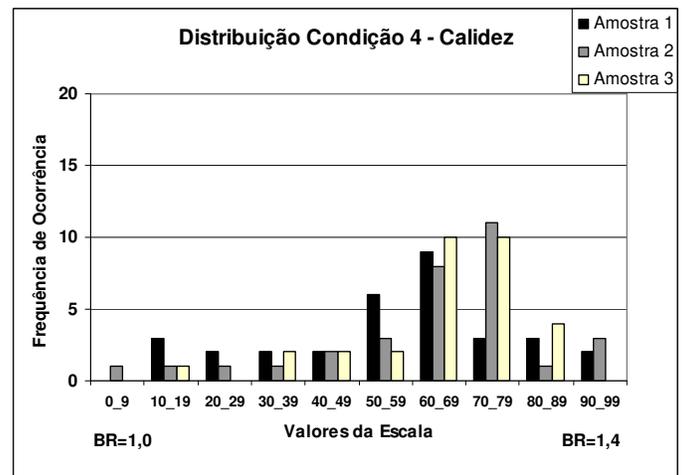
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.29 – Distribuição dos valores de Razão de Graves comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) no condição 4.

As respostas dos ouvintes da auralização da sala de trabalho para a condição 1 com relação aos fatores de Razão de Graves concentraram-se nos valores sem a impressão de ou para $RB = 1$. Esta tendência foi observada para as três amostras de som utilizadas. O Fator de Razão de Graves traz uma sensação de ganho nas baixas frequências devido ao aumento do tempo de reverberação nestas frequências. O reforço comentado a respeito do uso de difusores próximos à fonte trouxe também uma tendência de se optar pela amostra sem a sensação de calidez ou de Razão de Graves com um valor maior que 1.

Os valores obtidos para o fator de Razão de Graves para a condição 2 demonstraram uma tendência de escolha de valores próximos ao extremo sem impressão da Razão de Graves, ou calidez, na percepção dos ouvintes.

Na condição 3, o parâmetro de Razão de Graves apresentou uma aglomeração de respostas próxima da percepção de maior calidez para as amostras 2 e 3. Para a amostra 1 não foi percebida uma tendência ou definição de distribuição com um valor alto de desvio padrão.

A Razão de Graves mostrou uma tendência de aumento de percepção para as três amostras apresentadas aos ouvintes, na condição 4. Como a resposta impulsiva para esta condição denotou uma tendência a um campo reverberante e o aumento da Razão de Graves foi caracterizado pelo aumento do tempo de reverberação em baixas frequências, verificou-se a tendência subjetiva das respostas a favor da percepção de um tempo de reverberação maior.

A Figura 5.30 mostra a distribuição das respostas dos ouvintes para valores comparativos das condições apresentadas considerando a sensação de brilho. A sensação de brilho dada pela relação entre os EDTs, caracterizado com valores maiores em altas frequências, foi utilizada com os limites definidos por $Br=0,6$ como sendo o som sem a impressão de brilho, e $Br=1,1$ como sendo a sensação de brilho ou de maior EDT em altas frequências.

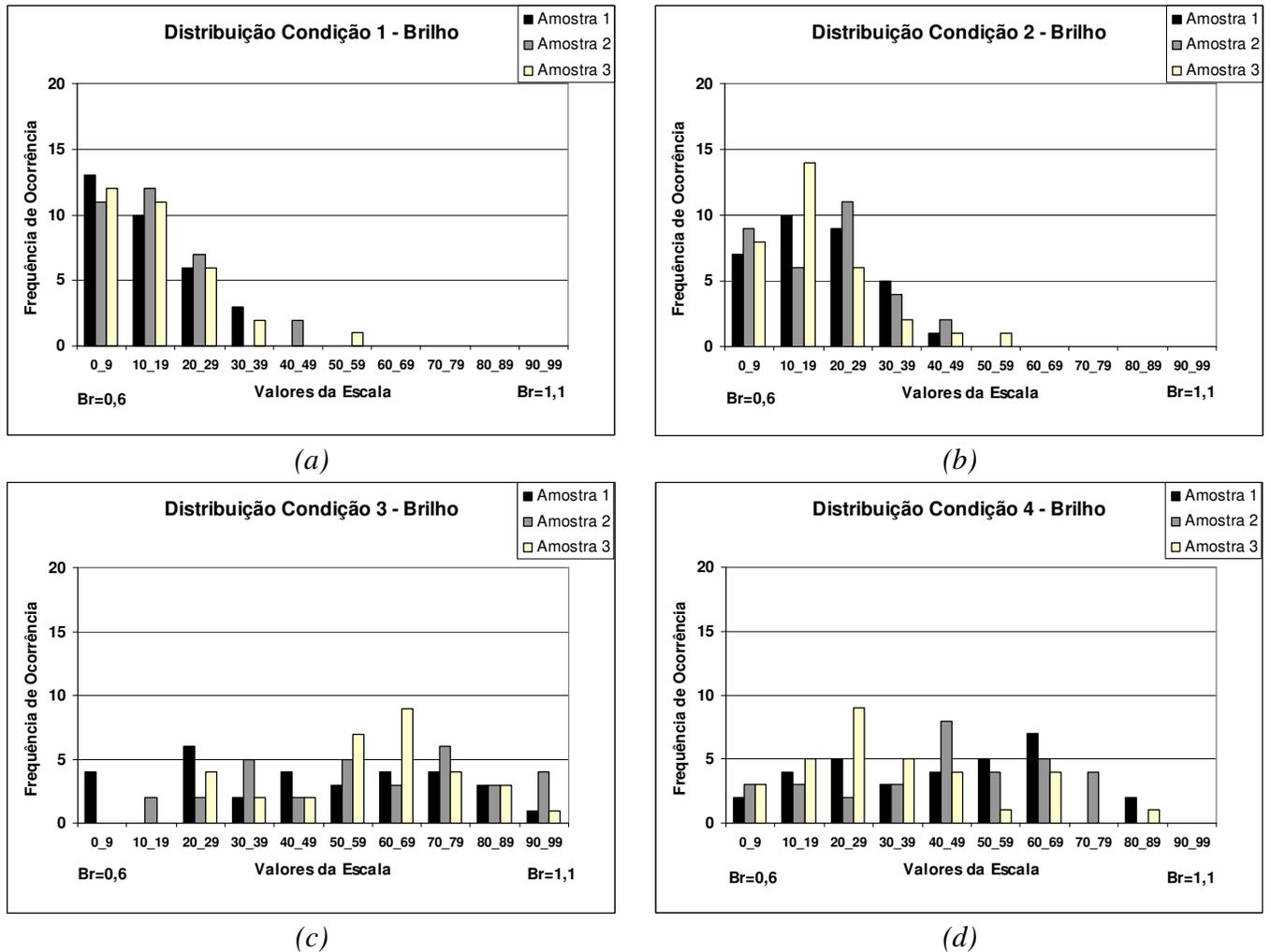


Figura 5.30 – Distribuição dos valores de brilho comparados com os difusores dispostos: a) na condição 1; b) na condição 2; c) na condição 3; d) no condição 4.

As respostas dos ouvintes da auralização da sala de trabalho para a condição 1 com relação aos fatores de Brilho concentrou-se nos valores sem a impressão. Esta tendência foi observada para as três amostras de som utilizadas. A tendência foi perceber as amostras com mais clareza e sem alteração no reforço em frequência dos extremos apresentados para Razão de Baixo e para o fator Brilho, quando são colocados difusores próximos da fonte sonora.

A condição 2 apresentou para o fator de Brilho uma tendência de escolha de valores próximos ao extremo sem impressão.

A indefinição de tendência foi evidenciada para a avaliação de brilho nas amostras 1 e 2 na condição 3. A amostra 3, que se trata de um violino tocando em *pizzicato*, mostra uma tendência ao brilho na resposta dos ouvintes à condição de difusores nas paredes laterais.

As respostas dos ouvintes em relação à percepção de brilho mostrou uma tendência de escolha da amostra 3 sem impressão espacial, para a condição 4. As amostras 1 e 2 tiveram maior dispersão dos valores obtidos, dificultando a definição de tendência das respostas obtidas. O mesmo fenômeno percebido para a reverberação, com relação à característica impulsiva da amostra 3, foi observado para este parâmetro.

As discussões dos resultados obtidos para cada condição, considerando os descritores subjetivos e as amostras de som, serão feitas no próximo item. Serão analisadas as respostas impulsivas obtidas para cada condição e a distribuição de energia destas respostas para verificação das respostas obtidas dos ouvintes.

A Tabela 5.2 mostra os valores de média da posição escolhida do questionário e o desvio padrão em unidades de escolha para cada amostra em cada condição apresentada.

Os valores descritos como média representam valores escolhidos pelos ouvintes da escala de variação de 0 a 100 pontos, correspondentes aos valores entre os extremos apresentados nos questionários e valores quantitativos dos gráficos de distribuição das respostas.

O desvio padrão descrito é o desvio verificado para a dispersão dos valores obtidos em torno do valor considerado como média. Portanto, para a amostra 1, por exemplo, no parâmetro de clareza e condições 1 e 2 os desvios mostram uma concentração dos valores escolhidos no questionário em torno do valor médio considerado. Para a discussão de relevância dos valores, segundo os cálculos de distribuição do Anexo B, valores iguais ou abaixo de 17, para o desvio padrão, são valores que com um bom grau de relevância, principalmente com a observação dos gráficos de distribuição apresentados.

Tabela 5.2 – Valores de médias e desvio padrão para cada parâmetro analisado e para cada amostra apresentada.

Condição 1										
	Clareza		Lateralização		Reverberância		Calidez		Brilho	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Amostra 1	9	8	81	10	19	12	20	17	13	10
Amostra 2	14	9	38	23	23	17	19	14	13	11
Amostra 3	14	10	35	21	20	15	15	14	13	12
Condição 2										
	Clareza		Lateralização		Reverberância		Calidez		Brilho	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Amostra 1	15	12	64	25	30	22	24	15	17	11
Amostra 2	33	24	38	23	33	23	28	17	19	12
Amostra 3	28	22	36	25	31	18	26	19	16	12
Condição 3										
	Clareza		Lateralização		Reverberância		Calidez		Brilho	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Amostra 1	51	25	23	17	65	23	47	28	57	23
Amostra 2	57	18	63	22	63	22	60	21	57	19
Amostra 3	68	19	65	21	72	11	57	19	61	18
Condição 4										
	Clareza		Lateralização		Reverberância		Calidez		Brilho	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Amostra 1	44	23	36	20	53	23	57	22	41	23
Amostra 2	46	21	46	21	50	26	61	21	42	22
Amostra 3	61	19	56	20	64	15	64	17	32	20

Os atributos subjetivos avaliados neste trabalho foram analisados tomando como base as quatro condições diferentes de posicionamento dos difusores. Cada condição modelada resultou em uma resposta impulsiva diferente para a convolução com as amostras de som.

A discussão dos resultados obtidos pela resposta dos ouvintes aos testes de auralização será dividida de acordo com as condições modeladas. Estas discussões serão delineadas de acordo com as respostas apresentadas nos histogramas e na Tabela 4 que apresenta as médias e desvios padrão dos dados obtidos.

6 Conclusões

Os trabalhos realizados para manufatura da câmara em escala para determinação do coeficiente de espalhamento de superfícies e a validação do campo acústico desta câmara foram descritos em artigos publicados em anais de congressos (SANTOS e BERTOLI, 2008). A realização dos ensaios para determinação do coeficiente de espalhamento de superfícies teve a importância de se obterem valores de coeficiente de espalhamento para uso em modelagem computacional.

A validação do programa computacional utilizado, a partir da metodologia de se utilizar a auralização de um espaço físico modelado com os valores dos coeficientes de espalhamento obtidos pelos ensaios em câmara reverberante em escala, mostrou a necessidade de se detalhar em elementos internos ao espaço.

O resultado comparativo da auralização utilizando uma resposta impulsiva modelada computacionalmente e uma resposta impulsiva medida mostrou uma equivalência de percepção entre estas duas auralizações.

Os resultados das auralizações apresentadas ao júri mostraram uma tendência de aumento de sensação de clareza para os difusores colocados próximos à fonte sonora. Esta condição diminui a sensação de vivacidade, dependente da reverberância, percebida pelos ouvintes. O mesmo ocorreu para a sensação de calidez e brilho. Considerando a estrutura de um local utilizado para audição musical pode-se avaliar que difusores no palco ajudam a aumentar a sensação de clareza. A vivacidade, a calidez e o brilho não tem o mesmo comportamento quando colocados difusores no palco.

A condição de colocação de difusores próximos ao ouvinte trouxe uma sensação de clareza apenas para a amostra de som contínuo. Os outros fatores analisados não evidenciaram uma tendência bem definida, considerando os resultados obtidos. Considerando a mesma

estrutura de análise de audição musical, difusores atrás da platéia salientam a continuidade dos sons produzidos.

Quando os difusores foram colocados nas laterais da sala de trabalho, observou-se uma diminuição da clareza, mas uma tendência de aumento da lateralização para amostras com características impulsivas.

O aumento do coeficiente de espalhamento nas laterais da sala estudada aumentou a percepção de calidez para as amostras sonoras apresentadas. A vivacidade apresentou percepção apenas para a amostra com característica impulsiva.

Pode-se considerar que o aumento dos coeficientes de espalhamento nas superfícies laterais das salas, ou nas laterais da platéia, aumenta a sensação de calidez na platéia.

Os resultados obtidos confirmam a dependência de caracterização da difusão de acordo com o tipo do sinal de excitação, sendo possível um aumento de coloração de acordo com o aumento de espalhamento lateral.

A percepção dos coeficientes de espalhamento obtidos experimentalmente, utilizando técnicas de auralização apresenta algumas tendências na percepção dos descritores de qualidade acústica de salas, como aumento de clareza com o uso de espalhamento próximo à fonte sonora; aumento de lateralização com a colocação de coeficientes de espalhamento nas paredes laterais; aumento de calidez com o aumento de coeficiente de espalhamento das paredes laterais. Estas tendências se mostraram consistentes a partir da verificação da resposta impulsiva obtida por modelagem computacional.

Como trabalhos futuros, a auralização de outros formatos de sala para as mesmas condições de alocação de difusores podem reafirmar as tendências de percepção obtidas com a sala estudada em formato retangular. Outras superfícies podem ser projetadas e seu uso verificado através da auralização.

Estas metodologias auxiliam no projeto de superfícies difusoras e auralização dos espaços pode ser utilizada para aprimorar o projeto acústico dos espaços, principalmente com a tendência de usos diferenciados dos espaços modernos.

Referências

- AES-4id-2001: AES Information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterization and measurement of surface scattering uniformity. J. Audio. Eng. Soc. Vol 49, 2001.
- AMERICAN SPEECH-LANGUAGE-HEARING ASSOCIATION (ASHA) OSHA 1910-95-App E., 1995.
- BARBO, M. N., PAIXÃO, D. X., VERGARA, E. F. Análise Do Comportamento Acústico de Uma Basílica Em Santa Maria-RS. Congreso Iberoamericano de Acústica . Proceedings - FIA 2008. Nov. 2008.
- BERANEK, Leo, L. Music, acoustics & architecture. New York: John Wiley & Sons. 585p , 1962
- BERG, J. Evaluation of Perceived Spatial Audio Quality, Systemics, Cybernetics and Informatics vol 4 - nbr 2. 2006.
- BISTAFA, S. R., Difusão Sonora em salas de concerto e difusores, Revista da Sociedade Brasileira de Acústica, no 36, Dez 2005
- BLAUERT, Jens. Spatial hearing : the psychoacoustics of human sound localization. Ed. rev. Cambridge (EUA): MIT Press. 494 p. , 1997.
- BORK, I. A comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation, ACTA Acustica united with Acustica. Vol. 86, 2000.
- BORK, I., Evaluation of Room Acoustic Simulation Software, CFA/DAGA'04, Strasbourg, 2004.
- BRÜEL & KJAER; Application of B&K Equipment to Acoustic Noise Measurements, p. 13. 1978.
- CAMPELO, V.E.S, BENTO, R.F. Teleaudiometria Automática: Um Método de Baixo Custo para Triagem Auditiva Arq. Int. Otorrinolaringol., São Paulo - Brasil, v.14, n.1, p. 82-89, Jan/Fev/Março, 2010

- CHOI, M.J. LEE, H. B., PARK, C. S., OH, S. H., PARK, K.S. PC-Based Tele-Audiometry. Telemedicine and e-Health. Vol 13, N 5, 2007
- CHOI Y-Ji., JEONG D-Up, Some issues in measurement of the random-incidence scattering coefficients in a reverberant room. ACTA Acustica united with Acustica. 94, 2008.
- CAMILO, T. S., TENENBAUM, R. A.: Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Teoria, Implantação Computacional e Validação Experimental, Acústica & Vibrações, 36, 2006.
- COX T. J., DALENBACK B.-I. L., D'ANTONIO P., EMBRECHTS J. J., JEON J. Y., MOMMERTZ E., VORLÄNDER M. A Tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustic Surfaces. ACTA Acustica united with Acustica. Vol 92. 2006.
- COX, T.J., D'ANTONIO P. Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application. Spon Press. ISBN 0-415-29649-8. 2004.
- DAGOL, "Características do acrílico", http://www.dagol.com/pt/html/prod_dibond.html, acessado em 16/09/2007.
- D'ANTONIO, P., COX, T. J., Diffusor application in rooms, Applied Acoustics, Vol 60, No 2, , pp 113-142, jun 2000.
- EVEREST, F. A., The Master Handbook of acoustics, 4a. Edição. McGraw-Hill. ISSN:0-07-136097-2, pp.600, 2001.
- EYRING, C.F., Reverberation time in dead rooms, J. Acoust. Soc. Am., vol-1 pp217, 1930.
- FAHY, F., WALKER, J. Fundamentals Of Noise And Vibration. Taylor & Francis Group. ISBN: 0419227008, 1998.
- FAHY, F., WALKER, J. Fundamentals Of Noise processing. Springer ISBN: 0456764008, 2004.
- FARIA, R.R.A. Auralização em ambientes audiovisuais imersivos, Tese de Doutorado apresentada na Poli-USP, 2005.
- FARINA, A. A new method for measuring the scattering coefficient and the Diffusion coefficient of panels. ACTA Acustica united with Acustica. Vol. 86, 2000.
- FARINA, A., TRONCHIN, L., Computer simulation of Binaural, Stereo-Dipole, B-format and Ambiophonics impulse responses, 17th ICA, Roma, Set 2001.

- FERNANDES JÚNIOR, A.C.L. Auralização: técnicas de modelagem e simulação binaural de ambientes acústicos virtuais. Dissertação de Mestrado, Unicamp, 2005.
- FIGUEIREDO, F.L. Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música . 2005. 258p. Dissertação de Mestrado. Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- FIGUEIREDO, F. L., MASIERO, B. e IAZZETTA F., Análise de parâmetros acústicos subjetivos: critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música. 4ª. Reunion Anual de la SACCoM, Mai, 2001.
- FIGUEIREDO, F. L., MASIERO, B. e IAZZETTA F., Parâmetros Subjetivos em Salas Destinadas à Prática Musical. Acustica 2004 – Guimarães, Portugal, paper ID: 083. 2004.
- GARADAT, S., LITOVSKY, R.Y., YU, G., ZENG, F. Role of binaural hearing in speech intelligibility and spatial release from masking using vocoded speech. The Journal of Acoustical Society of America. 126 (5), Nov. 2009.
- GODENBERG, L. A.: Inarmonicidade na afinação de pianos, *Acústica & Vibrações*, 36, 2005.
- GOMES, M. H. A., VORLÄNDER, M., GERGES, S.N.Y. Measurement and use of scattering coefficients in room acoustic computer simulations. Acustica 2004 – Guimarães, Portugal, 2004, paper ID: 061.
- GOMES, M.H.A, BERTOLI, S.R., DEDECCA, J.G. : Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas, *Revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES* no. 38, janeiro de 2007.
- HAAS H. Über den Einfluß eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache. *Acustica* 1951; 149.
- HAMEED S., PAKARINEN, J., VALDE, K., E PULKKI V., Psychoacoustics cue in Room Size Perception, 116th Convention of Audio Engineering Society, Mai 2004, pp 6084
- HAN, N., MAK, C. M. Improving speech intelligibility in classrooms through the mirror image model. *Applied Acoustics*. Vol. 69, 2008.
- 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.* 108 (2000) 1710–1720.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3741- Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision method for reverberations rooms. Switzerland, 1999.

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3746- Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Survey methods using an enveloping measurement surface over a reflecting plane. Switzerland, 1995.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9613- Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors. Switzerland, 1996.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION : 17497-1, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room. Switzerland, 2004.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: 3382, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters., 1997
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION : 354, Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. Switzerland, 2003.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. ITU-R (1996): Recommendation BS. 1116, Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems.
- JEON, J. Y., LEE, S.C., VORLÄNDER, M., Development of scattering surfaces for concert halls. *Applied Acoustics*. Vol. 65, 2004.
- KLEINER, M. DALENBACK B.-I., SVENSSON P.. Auralization - an overview. *J. Audio Eng. Soc.*, 41(11):861–875, nov 1993.
- KUTTRUFF, H.. Auralization of impulse responses modeled on the basis of raytracing results. *J. Audio Eng. Soc.*, 41(11):876–880, nov., 1993.
- KUTTRUFF, H. Room acoustics, third edition. Elsevier Applied Science, London and New York, 1991.
- LEHNERT, H., BLAUERT, J.. Principles of binaural room simulations. *Applied Acoustics*, 36:259–291, 1992.
- LEHNERT, H.. Systematic errors of the ray-tracing algorithm. *Applied Acoustics*, (38):207–221, 1993.
- LEWERS, T. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, 38:161–178, 1993.

- LOKKI, T., SVENSSON, P., SAVIOJA, L.. An efficient auralization of edge diffraction. In AES 21st International Conference, pp 166–172, ST. Petersburg, Russia, Jun., 2002.
- LOKKI, T. Physically-based Auralization - Design, Implementation, and Evaluation. PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, nov., 2002.
- MELO, V.S.G.; TENENBAUM, R.A.; CAMILO, T.S.; TORRES, J.C.B.; PIMENTEL, I.A. Aperfeiçoamento do software RAIOS para simulação numérica de acústica de salas com inclusão de modelo modal para baixas frequências. *Acústica e Vibrações*.no. 38, Jan., 2007.
- METHA, M., JOHNSON, J., ROCKAFORD, J.; *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice-Hall Inc, ISBN:0-13-793795-4, 1999.
- MILLINGTON, G. A modified formula for reverberation. *The Journal of the Acoustical society of America*. Jul. 1932.
- MOMMERTZ E., MÜLLER S. Measuring Impulse Responses with Digitally Pre-emphasized Pseudorandom Noise Derived from Maximum-Length Sequences. *Applied Acoustics*, vol 45, 1995.
- MÜLLER, S., MASSARANI P., Transfer Function Measurements with Sweeps. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 49, no 6, p.443, 2001.
- NASCIMENTO, R. L. X., ZINDELUK, M., Scale-Model Reverberation Chamber for Teaching and Scaled Absorption Material Development. 12th International Congress on Sound and Vibration, 2005, Lisboa. *Proceedings 12th ICSV*, 2005.
- PAUL, S. Binaural Recording Technology: A Historical Review and Possible Future Developments. *Acta Acustica United With Acustica*. Vol. 95 (2009) 767 – 788.
- RIOUX, V. Sound Quality of Flue Organ Pipes An Interdisciplinary Study on the Art of Voicing. Department of Applied Acoustics Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, 2001.
- RINDEL, J. H., CHRISTENSEN, C. L.. Room acoustic simulation and auralization how close can we get to the real room? WESPAC 8, The Eighth Western Pacific Acoustics Conference, 2003.
- SANTOS, C., BERTOLI, S. R.; Construção de câmara reverberante em escala para realização de ensaios acústicos. *Congreso Iberoamericano de Acústica . Proceedings - FIA 2008*. Nov. 2008.

- SANTOS, C., BERTOLI, S. R.; Tópicos construtivos de câmara reverberante em escala e problemas encontrados em ensaios de absorção. X Encontro nacional de conforto no ambiente construído, Natal, 2009
- SANTOS, C. Investigação dos métodos de determinação de potencia sonora visando programas para etiquetagem de furadeiras elétricas de uso domestico. Dissertação Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil FEC/UNICAMP, Campinas, 2004.
- SANTOS, N. A., SIMAS, M.L.B. Função de Sensibilidade ao Contraste: Indicador da Percepção Visual da Forma e da Resolução Espacial. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 14(3), pp. 589-597, 2001.
- SAVIOJA, L. Modeling Techniques for Virtual Acoustics. PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, 2000.
- SCHOROEDER, M.R. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion. *The Journal of Acoustical Society of America*. Vol 65 n.4 Abr. 1979.
- SCHOROEDER, M.R. New Method of Measuring Reverberation Time. *The Journal of Acoustical Society of America*. Vol 37 pp409. 1965.
- SCHULTZ, T.J. Difusion in reverberation rooms. *Journal of Sound and Vibration*.Vol.16, p. 17-28,1971.
- SUMARAC-PAVLOVIC, D., MIOMIR, M; KURTOVIC, HUSNIJA, A simple impulse sound source for measurements in room acoustics. *Applied Acoustics*, 69, 378–383. 2008.
- STEPHENSON, U. M. Comparison of the mirror image source method and the sound particle simulation method, *Applied Acoustics*, 29, p. 35-72, 1990.
- STEPHENSON, U. M. Quantized pyramidal beam tracing - A new algorithm for room acoustics and noise immission prognosis, *Acta Acustica*, 82, p. 517-525, 1996.
- SVENSSON, P., NIELSEN, J. L. “Errors in MLS Measurements Caused by Time Variance in Acoustic Systems”, *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 47, pp. 907-927, nov 1999.
- THADEN, R..Auralisation in building acoustics. Doctoral thesis, RWTH Aachen University, Germany, 2005.

- TORRES, R. R., KLEINER M., B.-I. DALENBACK Audibility of “Diffusion” in Room Acoustic Auralization: An Initial Investigation. ACTA Acustica united with Acustica. Vol. 86, pp. 919, 2000.
- VALADARES, V. M. Acústica de salas de concerto. 1º SEMEA, 2004.
- VIVEIROS, E. B. Acústica de Salas & Técnicas Impulsivas, III Encontro Nacional - I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Gramado, 1995.
- VORLÄNDER M., BIETZ H.. Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time. Acustica Vol. 80. pp. 205–215, 1994.
- VORLÄNDER, M., EMBRECHTS, J.-J., GEETERE, L.D., VERMEIR, G., GOMES, M.H.A., Case studies in measurement of random incidence scattering coefficients. ACTA Acustica united with Acustica. Vol. 90, 2004.
- VORLÄNDER, M., MOMMERTZ, E., Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients Applied Acoustics. Vol 60, 2000.
- VORLÄNDER, M. International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. Proc. da 15ª ICA, Trondheim, Noruega, pp 943, 1995.
- VORLÄNDER, M. Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. 1st edition, Springer, Berlin, 2007.
- WATERHOUSE, R.V. Interference Patterns in reverberant sound fields. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 27, n.2, p. 247–258, 1955.
- YOKOTA T., SAKAMOTO, S., TACHIBANA, H.. Visualization of sound propagation in rooms, Acoustic Science & Technology. N.23, Vol.1, 2002.
- ZENG, X., CHRISTENSEN, C.L., RINDEL, J.H. Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. Applied Acoustics, Vol 67, pp 771, 2006.
- ZWICKER E, FASTL H. Psychoacoustics, fact and models, 2nd ed. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1999.

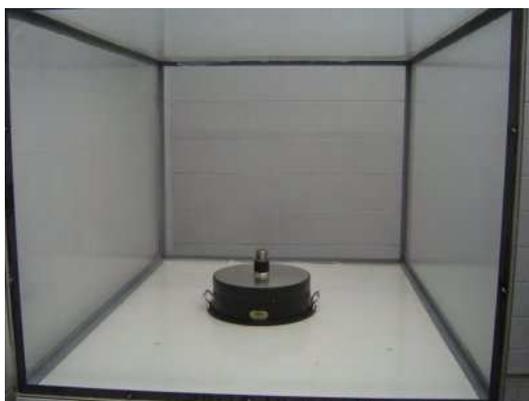
Apêndice A – Construção e validação da câmara reverberante em escala

A escala de 1:5 foi escolhida por ser a mesma escala de câmaras utilizadas nos ensaios de determinação do coeficiente de espalhamento em algumas das literaturas adotadas como referência (GOMES et al, 2004), (VORLÄNDER et al, 2004), (COX et al, 2006). Com esta escala a maior banda de medição de 1/3 de oitava foi a de 4 KHz que é suficiente para caracterização do coeficiente de espalhamento de material uma superfície, segundo a ISO 17497:2004.

Placas de acrílico foram utilizadas para a construção da câmara reverberante em escala, como as placas de acrílico utilizadas apresentaram uma baixa resistência a flambagem uma estrutura metálica foi criada para obter uma resistência estrutural. A Figura A.1a mostra a estrutura metálica utilizada, A.1b a câmara em escala pronta e a A.1c o conjunto de câmara, mesa giratória e mesa de apoio.



(a)



(b)



(c)

Figura A.1. a) Estrutura metálica da câmara reverberante em escala; b) visão frontal da câmara com mesa giratória dentro; c) vista geral do conjunto.

A.1 Isolação de vibração da câmara

A câmara em escala foi montada sobre uma mesa adaptada para suportar seu peso estimado total de 82 kg. O acoplamento da mesa com sua tampa superior foi realizado com coxins de borracha para quatro pontos de apoio.

A determinação dos modos de vibração das paredes da câmara foi feita para cada uma das placas de acrílico por meio de uma excitação dos modos de ressonância a partir de um impacto. Cuidados foram tomados para que não houvesse uma diferença muito grande na amplitude dos impactos dados. As médias calculadas da aceleração foram de três medições de

impacto para cada placa de acrílico e os resultados estão mostrados na Figura 87 para cada placa. Como observado na Figura A.2, os picos de ressonâncias encontrados para as placas estão abaixo da faixa de frequência de trabalho que será de 500 a 20000 Hz, na escala real.

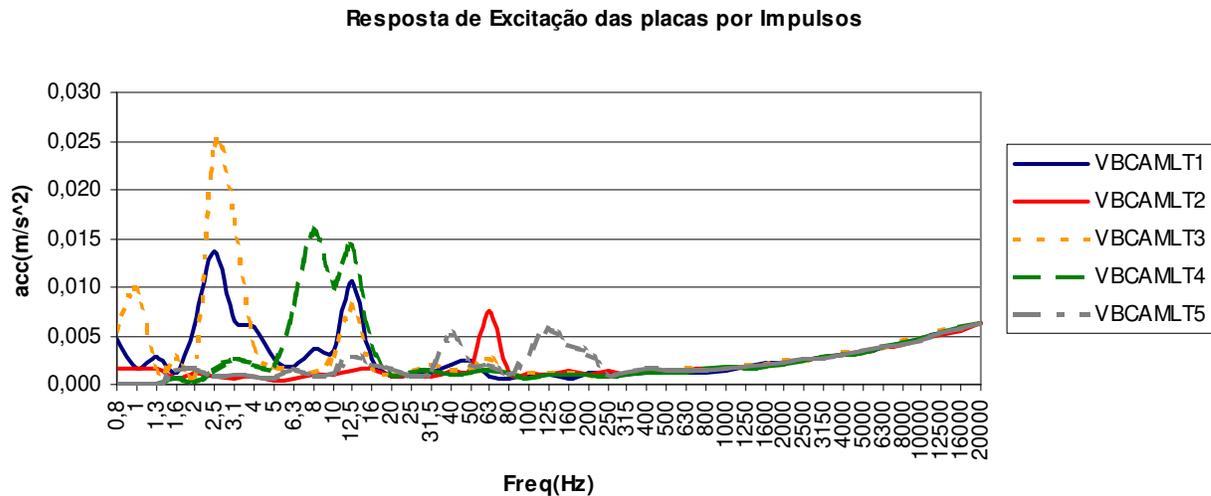


Figura A.2 – Resposta de excitação a impacto das placas que formam a câmara reverberante em escala.

Para verificar a isolamento dos coxins utilizados para o desacoplamento da câmara à estrutura de apoio, foi utilizada uma fonte de vibração e esta foi fixada à estrutura de apoio da mesa. A fonte escolhida, uma furadeira do tipo “*hobby*”, foi ligada para operar na função de alto impacto, gerando assim mais vibração.

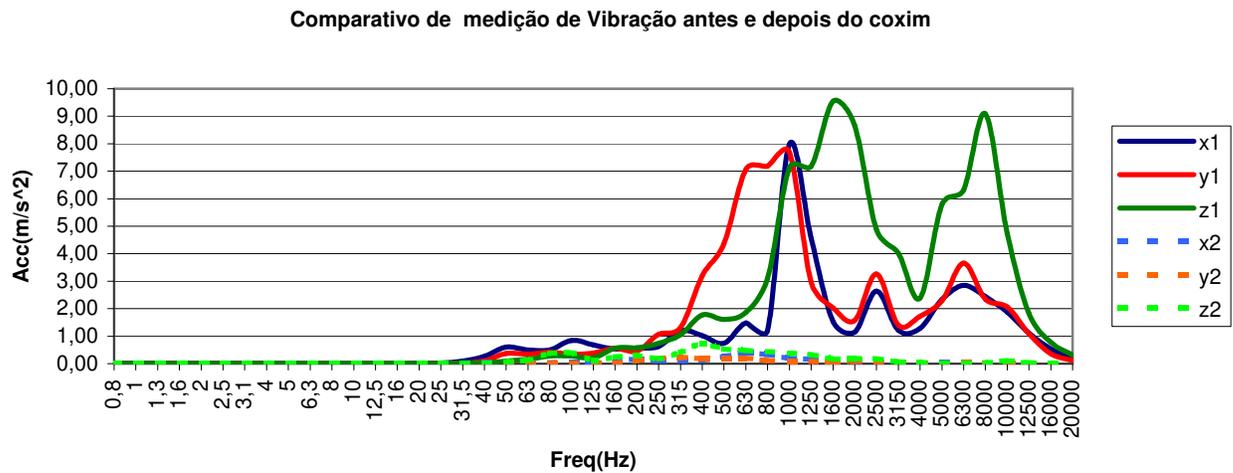
A Figura A.3 mostra o detalhe do acoplamento da fonte de vibração na estrutura de apoio.



Figura A.3. Detalhe do acoplamento da fonte de vibração (furadeira) na estrutura de apoio.

As medições de vibração foram realizadas para um período de observação de 60 s e os resultados das medições, antes e depois do coxim estão mostrados na Figura A.4.

As linhas contínuas na Figura A.4 representam a aceleração medida antes do coxim na parte inferior da mesa e as linhas tracejadas representam a aceleração medida na parte superior do coxim. Observa-se que o coxim de borracha promoveu a atenuação das vibrações geradas pela furadeira na mesa de apoio da câmara.



A.2 Isolação Sonora Aérea

Para a avaliação do isolamento sonoro aéreo das paredes da câmara foi calculada a diferença de nível de pressão sonora entre o lado interno e o lado externo das paredes, considerando uma fonte sonora em um dos lados. A fonte utilizada foi um dodecaedro emitindo ruído branco do lado externo da câmara. Foram feitas três medições para caracterização da média espacial do nível de pressão sonora do lado externo e interno da câmara em escala. As medições de nível de pressão sonora foram realizadas simultaneamente. Para a faixa de frequência de interesse das medições em escala, tem-se o gráfico da Figura A.5 mostra os resultados das diferenças de níveis de pressão sonora.

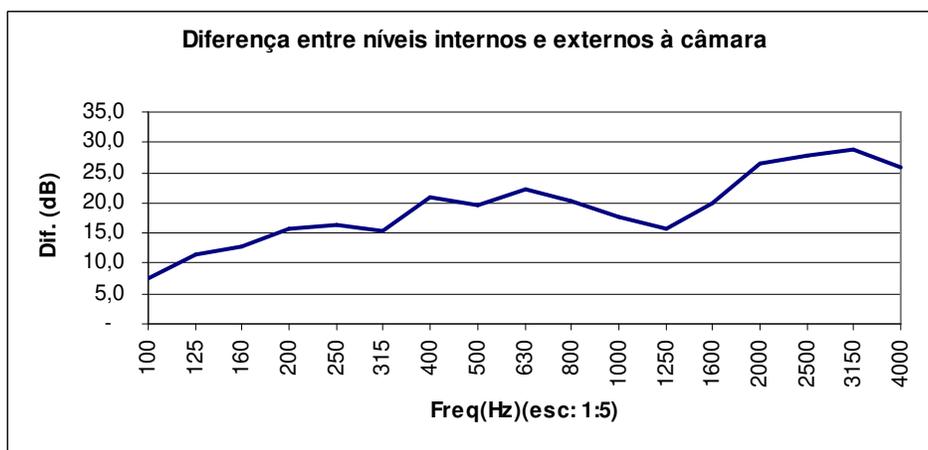


Figura A.5 - Resultados da diferença calculada de medições de Nível de Pressão sonora interna e externamente à cabine em escala para as frequências de interesse do modelo em escala 1:5.

Na Figura A.5 os valores obtidos foram calculados para as frequências em bandas de terço de oitavas de 500 a 20000 Hz, o que na escala 1:5 é representado pelas frequências de 100 e 4000 Hz, respectivamente. A partir destes valores foi calculado o valor de R_w para as paredes da Câmara em escala e o resultado encontrado foi $R_w = 19$ dB.

A.3 Fonte sonora

As fontes sonoras utilizadas para os ensaios devem permitir a reprodução satisfatória de sons na faixa de frequências de interesse. Para os ensaios a serem realizados na câmara foi necessário construir também uma fonte sonora omnidirecional em escala 1:5, com transdutores capazes de reproduzir sons em altas frequências.

O material utilizado para a fabricação da fonte foi uma placa de aglomerado de madeira. O formato utilizado para a manufatura da fonte foi o dodecaedro seguindo a distribuição espacial proposta para a fonte sonora da marca Brüel & Kjaer em escala real. O material foi cortado em

cortador Laser do Laboratório de Maquetes da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

O dodecaedro foi construído em duas partes, cada uma com seis altofalantes o que facilita o acesso interno para a realização de uma futura manutenção. Os altofalantes utilizados foram *tweeters* da marca Bravox modelo Neo Tech 25 A, devido a sua resposta em frequência que vai de 4 a 30 kHz.

Devido à possibilidade de realizar vincos no material foi possível dobrar e montar cada uma das partes do dodecaedro utilizando fita adesiva de alumínio e massa de colagem. A fita adesiva proporcionou um auxílio no isolamento eletromagnético do dodecaedro, pois ela formou uma trama que foi aterrada com a blindagem do cabo de conexão. Na Figura A.6 está demonstrada a montagem de uma das duas partes que formam o dodecaedro.

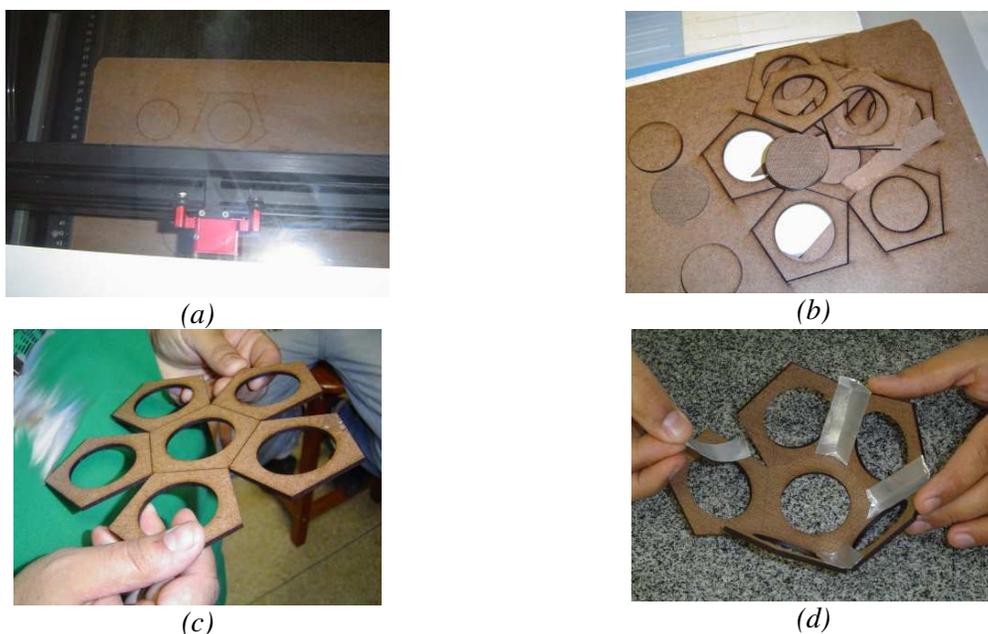


Figura A.6 – Corte a laser de material para a construção de dodecaedro para medições em escala: (a) material em corte; (b) material cortado; (c) corte e vinco do material para a montagem do dodecaedro; (d) fixação com fita de alumínio adesivada para montagem.

Os *tweeters* foram interligados de modo a obter uma carga de $6\ \Omega$ de resistência que é a mesma do dodecaedro utilizado como fonte sonora no tamanho real. Esta mesma carga foi adotada para que o amplificador utilizado para as medições possa ser o mesmo utilizado no dodecaedro em tamanho real. A Figura A.7 mostra o esquema elétrico de ligação dos *tweeters*.

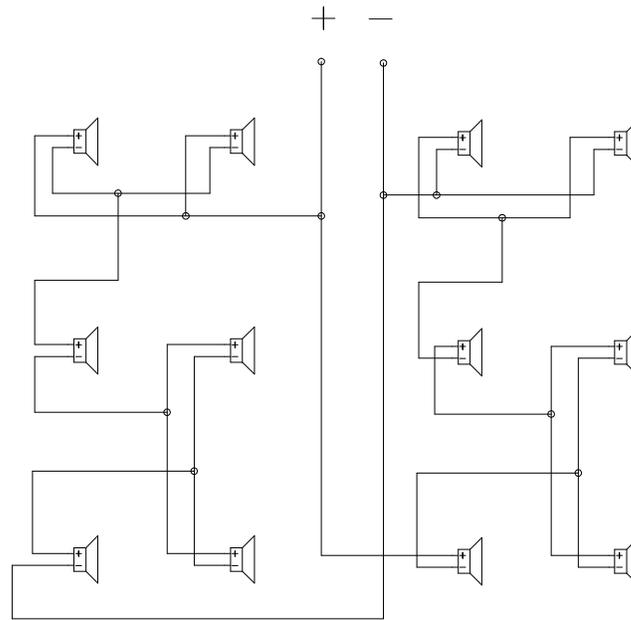


Figura A.7 – Esquema de interligação elétrica dos tweeters utilizados no dodecaedro.

O teste de diretividade exigiu a utilização de um ambiente de campo livre qualificado segundo a ISO 3746:2004. O ambiente utilizado foi a própria câmara reverberante revestida com um material altamente absorvente, este material é uma espuma com valores de coeficiente de absorção maiores que 0,7 para frequências acima de 500 Hz. Segundo a ISO 3746:2004 a relação entre a área equivalente de absorção (A) pela área da superfície de medição (S) deve ser maior que 1. O método utilizado para se obter a área equivalente de absorção, segundo a ISO 3746:2004, foi o de medição do tempo de reverberação. O gráfico da Figura A.8 mostra os valores obtidos para a razão entre a área equivalente de absorção e área da superfície de medição em função da frequência e a comparação com o valor “1”.

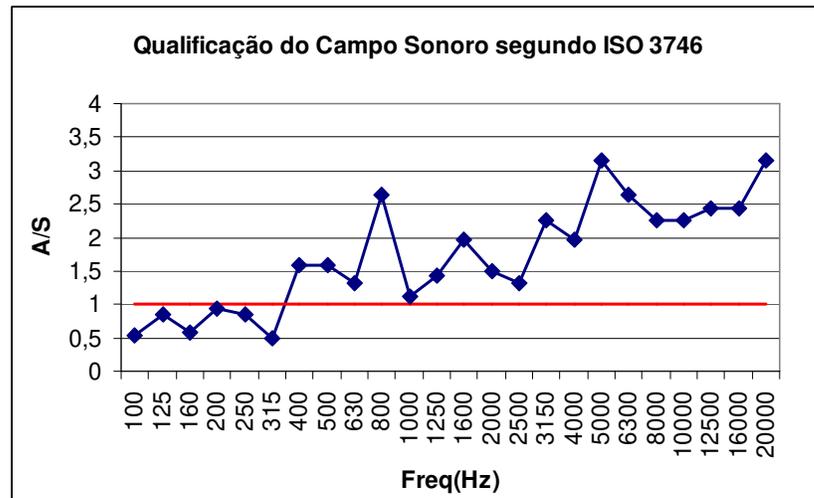


Figura A.8. Qualificação do campo sonoro utilizado para determinação da diretividade da fonte sonora segundo a ISO 3746.

Para valores de frequência compreendidos na faixa de interesse, que é de 500 a 20000 Hz, os valores da relação A/S estão acima de 1. Qualificando, portanto, o campo sonoro segundo a ISO 3746:1995.

A diretividade da fonte sonora foi verificada com o auxílio da mesa giratória, a uma distância de 40 cm resultando no gráfico apresentado na Figura A.9. O eixo “y” do gráfico (eixo representativo do ângulo 0°) representa o nível de pressão sonora medido.

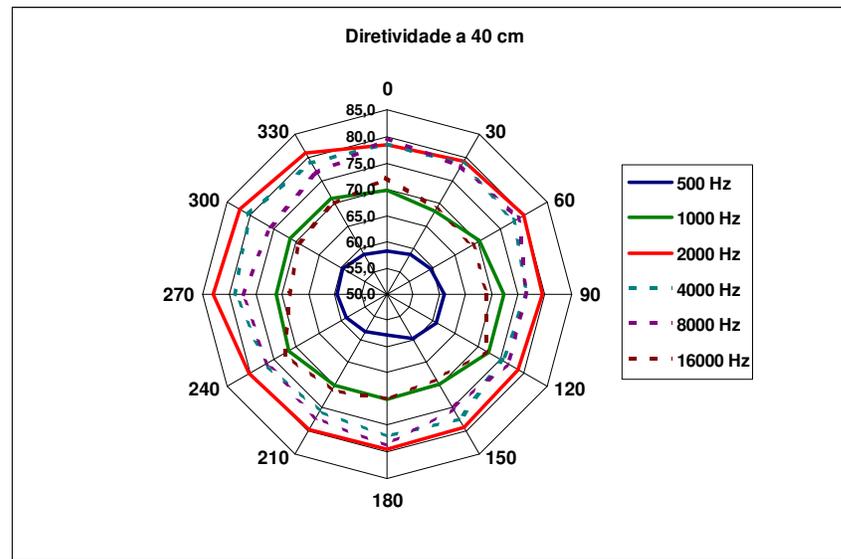


Figura A.9 – Diretividade do dodecaedro para bandas de frequência de medição e níveis de pressão sonora no eixo y.

Para complementar a faixa de frequência necessária para os ensaios, considerando os transdutores utilizados tem limitações abaixo de 4 kHz (em escala 800 Hz), foi acoplada uma pequena caixa acústica representando um reproduzidor de baixas frequências para a realização dos ensaios. O sistema pode ser visualizado na Figura A.10.



Figura A.10. Reprodutores sonoros utilizados nos ensaios.

O sinal utilizado para a reprodução necessita de uma pré-ênfase para que os níveis sejam equivalentes em amplitude para todas as frequências. Para separar as frequências dos reprodutores e realizar a pré-ênfase do sinal foi utilizado um equalizador (Figura A.11).

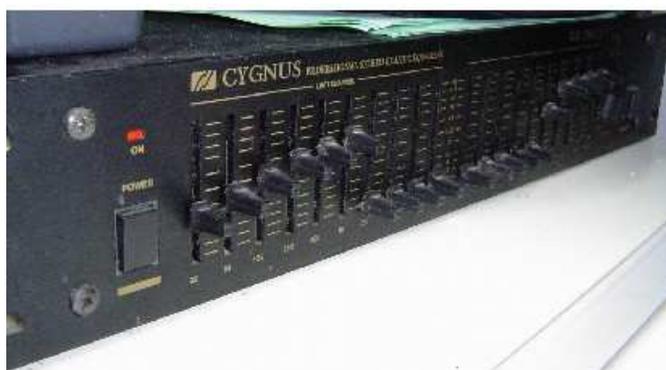


Figura A.11. Equalizador gráfico utilizado para separar os sinais dos reprodutores e equalizar o sinal de saída.

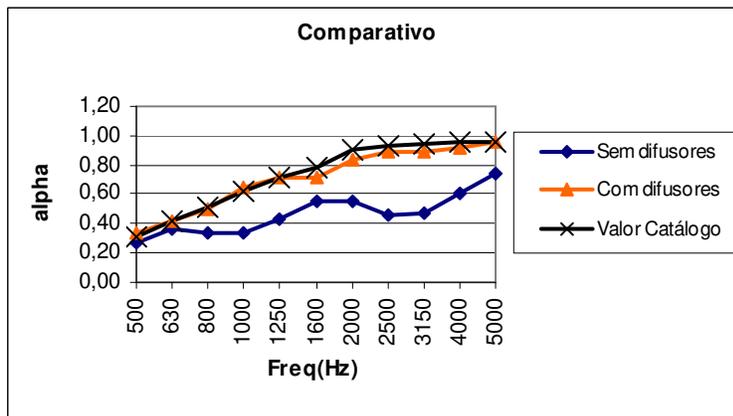
A.4 Aquisição de dados e aparelhagem de medição

Para a realização das medições de tempo de reverberação com a técnica de Resposta Impulsiva foi utilizado o sistema DIRAC da Brüel & Kjaer do Laboratório de Conforto Ambiental da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, conectado a uma placa de som em um *Lap Top* que contém o programa DIRAC da Brüel & Kjaer. O microfone escolhido foi o modelo 40 BE da G.R.A.S. de ¼ de polegada pré polarizado que possui a resposta em frequência de 100 a 40 kHz. Foram utilizados ainda o pré-amplificador modelo 26 CB e a mesa giratória adquirida da Brüel & Kjaer modelo 9640.

A.5 Qualificação do campo reverberante

As câmaras reverberantes em geral exigem difusores para promover um campo difuso uniforme. O procedimento utilizado para a colocação de difusores foi conforme descrito na norma ISO 354:2003. Este procedimento consiste em medições dos Tempos de Reverberação da câmara com e sem material para determinação de seu coeficiente de absorção sonora. Depois os resultados são comparados com o coeficiente de absorção conhecido do material. Caso os resultados da determinação do coeficiente absorção sonora sejam diferentes dos resultados esperados, deve-se acrescentar uma certa quantidade de difusores a fim de modificar o campo reverberante da câmara até que os resultados de determinação dos coeficientes de absorção fiquem o mais próximo possível dos coeficientes conhecidos.

Uma espuma foi utilizada como material de referência e os difusores metálicos foram instalados na câmara. Observou-se que, na faixa de frequência em bandas centrais de 1/3 de oitava de 500 a 5000 Hz, os difusores apresentaram um ótimo resultado, comparando o coeficiente calculado com o obtido em catálogo do fornecedor do material, como visto na Figura A.12.



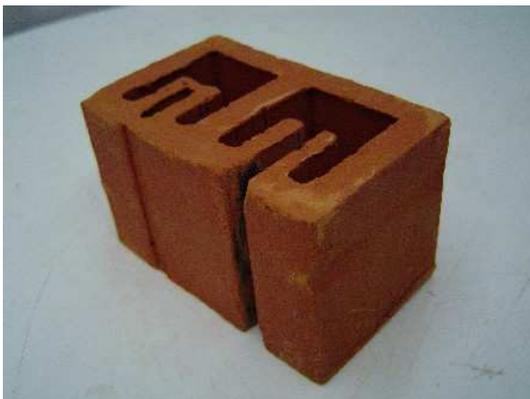
(a)



(b)

Figura A.12. a) Gráfico comparativo dos resultados da determinação do coeficiente de absorção sonora com difusores, sem difusores e valores de catálogo do material medido; b) foto do material medido dentro da câmara.

Em seguida, foi realizado ensaio de determinação do coeficiente de absorção sonora de tijolos ressoadores sintonizados construídos em escala 1:5 na Universidade Estadual de Maringá e gentilmente cedidos para a realização destes ensaios. Estes resultados podem ser observados na Figura A.13.



(a)



(b)

Figura A.13. a) Tijolo sintonizado (ressoador) produzido; b) arranjo para ensaio de absorção em câmara em escala.

O resultado da determinação do coeficiente de absorção sonora do tijolo ressonador para todas as frequências de medição é apresentado na Figura A.14. Os valores apresentados devem ser considerados a partir da banda de 1/3 de oitava de 500 Hz, o que equivale aos 100 Hz na escala de 1:5 da câmara.

Para comparar os resultados obtidos com o tijolo em escala de 1:5 com os resultados do modelo real, foi realizado o ajuste de escala para as respostas impulsivas do programa DIRAC 3.1 da Brüel&Kjaer. A partir deste procedimento foram comparados os valores medidos em escala com os valores medidos em tamanho real, a partir dos dados obtidos de Lisot e Soares (2008). Os valores comparados podem ser observados na Figura A.14.

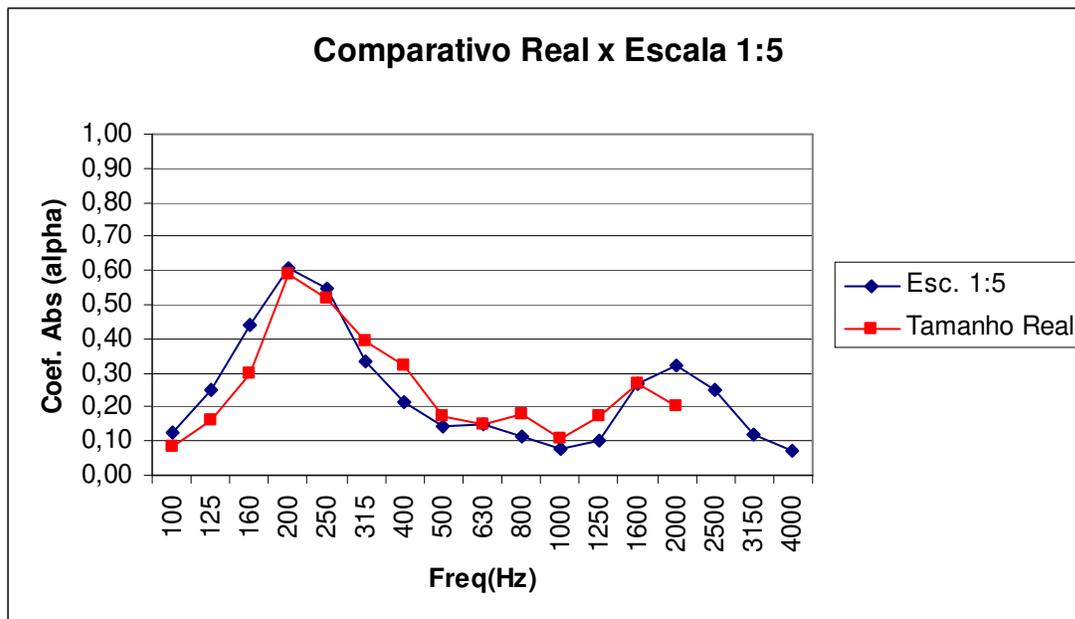


Figura A.14. Comparativo de determinação do coeficiente de absorção sonora de tijolo sintonizado em tamanho real e em escala 1:5.

Os ensaios realizados com a amostra em escala e o comparativo com a amostra em tamanho real confirmam a proximidade do fenômeno de ressonância nas duas amostras e a caracterização próxima das duas curvas.

Com os resultados apresentados pode-se confirmar a utilização da câmara para ensaios acústicos em escala de 1:5.

Apêndice B – Cálculos estatísticos

B.1 Escolha do número de amostras

A escolha do número mínimo de amostras para realização dos testes subjetivos envolveu fatores referentes ao erro de percepção visual relativo a escolha de uma posição para descrever a percepção do ouvinte. O erro de percepção visual, segundo Santos e Simas (2001) é dependente de fatores da acuidade visual para dois pontos muito próximos. Para computadores, segundo Fernandes (2009), o erro admissível é considerado para dois elementos alocados lado a lado.

Para uma barra de rolagem pode-se considerar o tamanho do botão de seleção da barra, que fica proporcional de acordo com a quantidade de posições definidas na barra. A largura do botão de seleção da barra de seleção utilizada no programa para teste de auralização foi de 10 unidades.

Segundo Morettin e Bussab (2006), o cálculo para determinação do número de amostras parte da fórmula do intervalo de confiança de uma distribuição normal, visto na Equação (B.1).

$$\bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{B.1})$$

onde: \bar{x} = média amostral

z = z-score para distribuição normal

σ = desvio padrão amostral

n = número de elementos da amostra

O erro máximo admitido para o intervalo de confiança pode ser descrito pelo segundo elemento da Equação B.2.

$$e = z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{B.2})$$

Desta equação obtém-se:

$$n = \left(z \frac{\sigma}{e} \right)^2 \quad (\text{B.3})$$

Para valores de número de amostra menores que 80, recomenda-se por praticidade o uso da distribuição t-student (Moretim e Bussab, 2002). Dessa forma, substitui-se o z-score da Equação (B.3) pelo *t-score* da distribuição *t-student*.

$$n = \left(t \frac{\sigma}{e} \right)^2 \quad (\text{B.4})$$

Os cálculos realizados utilizaram como base o desvio padrão dos valores obtidos da seleção da barra de rolagem, que foi correlacionada com a percepção do ouvinte. O valor do erro máximo admitido foi assumido como o valor da largura do botão de seleção da barra de rolagem. O valor de t-score foi escolhido com base no intervalo de confiança que se deseja obter. O valor foi de 0,99 para 30 graus de liberdade com um intervalo de confiança de 99%.

Pela fórmula B.4 observa-se que quanto maior o desvio padrão, maior será o número de amostras necessárias. Para demonstração de cálculo será tomado o maior desvio padrão encontrado de 27,6 para a primeira amostra para verificação do fator de Razão de Graves na condição 3.

$$n = \left(t \frac{\sigma}{e} \right)^2 = \left(0,99 * \frac{27,6}{5} \right)^2 = 30 \text{ amostras}$$

Os cálculos de número de amostra com todos os outros valores de desvio padrão resultaram em valores menores de número de amostra.

Apêndice C – Termo de Esclarecimento

ESCLARECIMENTO AO USUÁRIO DE PROGRAMA DE AURALIZAÇÃO

Objetivos da pesquisa: Observar as alterações existentes no coeficiente de espalhamento das superfícies e analisar a resposta da sensação auditiva a amostras influenciadas pela variação deste coeficiente de espalhamento.

O usuário será exposto a amostras sonoras com características auditivas dentro do previsto como conforto segundo NBR 10152 e OSHA 1910_95-App E.

Riscos ao usuário: O usuário não sofrerá risco decorrente a exposição do aparelho auditivo às amostras de ruído existentes no programa.

Identidade: A identidade do usuário não será divulgada em nenhum momento.

Para demais esclarecimentos segue contato do pesquisador:

Nome: Christian dos Santos (Aluno de Doutorado da Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas).

Telefone: 11 9864 8778

CONSENTIMENTO PÓS-ESCLARECIMENTO

Eu _____ portador do RG _____ declaro que após o esclarecimento realizado pelo pesquisador, autorizo a utilização dos dados resultantes para estudo da pesquisa em questão, e consinto em participar da mesma.

Local:

Data:

Assinatura do sujeito da pesquisa

Assinatura do pesquisador
MSc. Eng. Christian dos Santos