UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FÁBIO LEÃO FIGUEIREDO

***Parâmetros Acústicos Subjetivos:
Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de
Salas de Música***

Dissertação apresentada à área de concentração de Musicologia da Escola de Comunicações e Artes da Universidade de São Paulo, como exigência parcial para a obtenção do Título de Mestre em Musicologia, sob a orientação do Prof. Dr. Fernando Henrique de Oliveira Iazzetta.

São Paulo

2005

PÓS-GRADUAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

NOME DO CANDIDATO: Fábio Leão Figueiredo

TÍTULO DO TRABALHO: **Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música.**

CURSO: **Artes**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: **Musicologia**

COMISSÃO JULGADORA

RESULTADO

ASSINATURA

PRESIDENTE

Prof. Dr. Fernando Henrique de Oliveira Iazzetta
CMU/ECA

Aprovado

MEMBROS

Prof. Dr. Sylvio Reynaldo Bistafa
POLI-USP

Aprovado

Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes
UNICAMP

Aprovado

RESULTADO FINAL:

Aprovado

(Aprovado ou Reprovado)

São Paulo, 29 de setembro de 2005.

ASSINATURA DO PRESIDENTE

À Lila (in memorian)

Por toda a ternura, dignidade e nobreza...

Minha eterna gratidão.

Agradecimentos

Desejo expressar meus sinceros agradecimentos às pessoas abaixo, sem as quais esse trabalho jamais poderia ter sido realizado:

Prof. Dr. Fernando Iazzetta, pela competência, confiança e paciência; e por me permitir realizar esse trabalho com liberdade e satisfação. Mais do que um orientador, um grande amigo.

Prof. Dr. José Mannis, pela generosidade inestimável demonstrada na fase mais decisiva dessa trajetória: o seu início.

Prof. Dr. Sylvio Bistafa, pela atenção com que sempre me recebeu, e pelo incentivo e apoio oferecidos durante toda a pesquisa.

Engenheiro e colega Bruno Masiero, pela colaboração fundamental nas implementações.

Pedro Kohler, pela grande força nas medições, e por ceder gentilmente seu registro fotográfico dos teatros.

Prof. Dr. Angelo Farina (Universidade de Parma, Itália) pelos conselhos úteis sobre as medições e por demonstrar que a Ciência é um bem a ser compartilhado.

Prof. Dr. Carlos McDowell, pelas primeiras lições de Fourier.

Prof. Antônio Ribeiro, pelas aulas de Música.

Prof^a Elizabeth Camocardi, por ter me ensinado a escrever.

Aos Diretores Administrativos do Teatro Municipal de São Paulo, Teatro Sérgio Cardoso, Anfiteatro Camargo Guarnieri, Teatro Municipal de Diadema, Teatro São Pedro e Teatro do Memorial da América Latina, por autorizarem prontamente o nosso trabalho nesses estabelecimentos.

Aos meus pais, por tudo.

À FAPESP, pelo apoio financeiro ao Projeto AcMus e a todos os seus integrantes.

RESUMO

FIGUEIREDO, FÁBIO LEÃO **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.

Os parâmetros acústicos subjetivos são critérios que definem a qualidade acústica de uma sala de música. A apreciação musical dentro da sala é afetada por diversas impressões acústicas que ocorrem ao mesmo tempo. Cada uma dessas impressões é associada a um parâmetro acústico de natureza subjetiva que está correlacionado a uma grandeza física mensurável, constituindo um conjunto de parâmetros acústicos objetivos que formam uma base científica para a análise acústica das salas de música. Neste trabalho desenvolvemos pesquisa de âmbito teórico e experimental envolvendo a análise dos parâmetros acústicos subjetivos mais relevantes para a avaliação da qualidade acústica de salas de escuta musical. Fizemos um levantamento abrangente do material já publicado sobre o assunto, o que nos orientou a respeito das medições acústicas pertinentes à referida análise e nos permitiu formalizar as devidas conclusões. Implementamos e aplicamos a tecnologia necessária para a obtenção dos parâmetros. Determinamos a metodologia experimental mais adequada e efetuamos medições em seis importantes salas de concerto, comparando os resultados. Fizemos uma análise crítica a respeito dos parâmetros acústicos obtidos e aprofundamos a compreensão sobre seus significados e suas utilidades. Por fim, fizemos uma análise subjetiva de júri correlacionando os parâmetros acústicos medidos às respectivas impressões acústicas sobre amostras musicais gravadas nas salas.

Palavras-chave: Acústica. Parâmetros. Subjetivo. Reverberação. Música.

ABSTRACT

FIGUEIREDO, FÁBIO LEÃO Subjective Acoustical Parameters: Criteria for Evaluation of Acoustical Quality of Music Halls. 2005. 258p. Dissertation (Mestrado) – Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Acoustic parameters are the criteria that define the acoustic quality of a music hall. The musical audition inside a room is influenced by a group of acoustic impressions that occur at the same time. Each one of such impressions is associated with a particular subjective parameter that is correlated to a measurable physical value. These values are taken as a set of objective parameters that constitute a scientific basis for the acoustical analysis of a music hall. In this work we have conducted both a theoretical and an experimental investigation on the analysis of the most important acoustic parameters for the evaluation of the quality of a music hall. Also, we have done an extensive research on the related bibliography to support our measurement procedures and formal conclusions. We have implemented the necessary technology to obtain the acoustic parameters. We also have determined the most efficient experimental methodology to carry out acoustic measurements and we have applied this methodology to the measurement of six important concert halls. Then we have compared the data related to each hall and performed a critical analysis of this data, increasing our understanding on the meaning and the usefulness of the acoustic parameters. Finally, we have made a subjective jury analysis, correlating the measured acoustic parameters to the impressions about music samples recorded into those concert halls.

Keywords: Acoustics. Parameters. Subjective. Reverberation. Music.

SUMÁRIO

1 Introdução.....	10
1.1 Dos gregos a Sabine.....	11
1.2 De Sabine a Beranek.....	15
1.3 De Beranek em diante.....	19
1.3.1 As Pesquisas de Beranek.....	19
1.3.2 Pós 1962.....	34
1.3.2.1 Medições em salas de concerto.....	34
1.3.2.2 Criação e pesquisas de novos parâmetros.....	36
1.3.2.3 Correlação entre parâmetros subjetivos e objetivos.....	39
2 Fundamentos Teóricos.....	48
2.1 Resposta impulsiva em sistemas lineares.....	48
2.2 O Método de Schroeder.....	51
2.3 Obtenção da resposta impulsiva.....	55
2.3.1 Obtendo a resposta impulsiva através de MLS.....	56
2.3.2 Obtendo a resposta impulsiva através de varredura de senos.....	59
3 Metodologia Experimental.....	63
3.1 Circuito de Medição.....	63
3.2 Algoritmos de Processamento.....	65
3.3 Comparações Metodológicas.....	75
3.3.1 ACMUS x Aurora.....	75

3.3.2 MLS x varredura.....	78
3.3.3 Metodologia Estatística.....	86
3.4 Sobre a fonte sonora utilizada.....	92
3.4.1 Quanto à direcionalidade.....	92
3.4.2 Quanto à eliminação da influência da fonte.....	93
3.5 Os demais parâmetros.....	96
3.6 Padronização das posições de captação e dos métodos utilizados.....	96
3.7 Sobre os teatros onde realizamos as medições.....	98
 4 Resultados.....	 100
4.1 Teatro São Pedro.....	100
4.2 Anfiteatro Camargo Guarnieri.....	117
4.3 Teatro Municipal de Diadema.....	128
4.4 Teatro do Memorial da America Latina.....	140
4.5 Teatro Sérgio Cardoso.....	152
4.6 Teatro Municipal de São Paulo.....	166
 5 Análises e Conclusões.....	 185
5.1 Reverberação.....	188
5.1.1 Escuta dirigida para RT60.....	192
5.2 Equilíbrio entre graves e agudos.....	195
5.2.1 Escuta dirigida para BR e TR.....	198

5.3 Clareza ou Definição.....	200
5.3.1 Escuta dirigida para C80.....	212
5.4 Intimismo e proximidade.....	215
5.4.1 O parâmetro RDR.....	220
5.4.2 Escuta dirigida para ITDG e RDR.....	225
5.5 Espacialidade.....	227
5.6 Análise Subjetiva.....	230
5.6.1 Seleção das amostras gravadas a serem exibidas ao júri.....	230
5.6.2 O júri e o questionário.....	231
5.6.3 Roteiro do questionário.....	232
5.8 Síntese dos parâmetros.....	249
5.9 Considerações finais.....	250
 Referências Bibliográficas.....	 251
 Apêndice: A acústica de salas na História da Música.....	 256

1 Introdução

Mstislav Rostropovich, célebre concertista de nossa época, é categórico em afirmar que “*a good hall is as important as a good instrument*”¹. Charles Garnier, arquiteto da *Opera Garnier* em Paris, tentou considerar com a máxima atenção os principais fatores para uma boa acústica, mas confessa que no final foi obrigado a confiar na sorte, “... *like the acrobat who close his eyes and clings tho the ropes...*”² (Beranek, 2004: 491).

A acústica de salas sempre se viu entre esses dois extremos, encarregada da delicada tarefa de coadunar aspectos de dois universos - arte e ciência - que a cultura ocidental tratou de manter divorciados ao longo de séculos.

Durante muito tempo a acústica de salas se baseou no empirismo para tentar alcançar seus objetivos. Não havia mais que um aglomerado de conceitos nebulosos ou suposições carentes de um rigor maior.

Nas últimas décadas, entretanto, uma legião de dedicados pesquisadores tem se empenhado em elevar a acústica de salas ao *status* de ciência. Isso fica evidente quando se considera o bom número de periódicos científicos³ de alto nível que abrigam em suas páginas os resultados das pesquisas nessa área específica da acústica.

Hoje em dia há grandes centros de pesquisa, como o *IRCAM*⁴ em Paris, espalhados pelos continentes, determinados a ampliar e aprofundar o conhecimento científico sobre a acústica musical, construindo uma consciência renovada a respeito dos fenômenos físicos que envolvem a percepção sensorial e a apreciação estética do som.

¹ “uma boa sala é tão importante quanto um bom instrumento”

² “...como o acrobata que fecha os olhos e se agarra às cordas...”

³ *Journal of Acoustical Society of America, Applied Acoustics, Journal of Sound and Vibration, Acustica*, etc.

⁴ *Institute de Recherche et Coordination Acoustique/Musique*, dirigido pelo compositor Pierre Boulez.

Tal consciência, no entanto, está enraizada num passado remoto, brotando na memória ocidental a partir do celeiro helênico do qual herdamos tantas idéias.

1.1 Dos gregos a Sabine

A comunidade dos pitagóricos passou para a história como a primeira a se ocupar dos princípios filosóficos e científicos da música.

Figura 1.1.1: Os Pitagóricos

As idéias de Pitágoras (c.570-497 A.C.) chegaram até nós através da obra de Aristóteles (384-322), que também foi o autor de um pequeno tratado sobre a natureza do som, *De Anima De Audibilibus*, no qual esboça uma tentativa de sistematizar a compreensão dos fenômenos sonoros.

O primeiro registro histórico sobre a acústica arquitetônica (Lindsay, 1972) deve-se a Marcus Vitruvius Pollio, engenheiro e arquiteto romano. Foi engenheiro militar de Júlio César, e escreveu sobre a acústica dos teatros. Uma parte da sua obra *De Architectura Libri*

Decem escrita cerca de 50 A.C. trata das características acústicas dos teatros gregos e romanos em forma de semicírculo.

Boécio (480-524), filósofo romano conhecido pelas suas traduções e comentários da obra de Aristóteles, foi o principal transmissor da cultura musical greco-latina para a Idade Média. Escreveu *De Institutione Musica*, obra fundamental na história da música.

Galileo Galilei (1564-1642) publicou em 1638 um tratado em que expôs a dedução quantitativa da lei das cordas estabelecendo as relações entre frequência, comprimento, diâmetro, densidade e tensão. Abordou também a ressonância e a vibração por simpatia, e mostrou que os intervalos musicais podiam ser caracterizados pelas relações de frequências. Apresentou também uma explicação para a origem da consonância e da dissonância.

Outros nomes da época áurea da mecânica clássica como Isaac Newton e Leonhard Euler também publicaram estudos sobre os fenômenos sonoros.

Figura 1.1.2: Páginas de rosto dos trabalhos de Euler e Wheatstone

Em 1636, o padre francês Marin Mersenne (1588-1684) publicou *Harmonie Universelle* onde faz a descrição de vários instrumentos musicais existentes no século XVII. O padre Mersenne, como era conhecido, explorou as propriedades das cordas e dos tubos, tendo sido o primeiro teórico que baseou o estudo da harmonia no fenômeno da ressonância. Através da medição do tempo de retorno de um eco, Mersenne encontrou para a velocidade do som um valor com o erro aproximado de 10% do valor real.

Figura 1.1.3: Página de rosto do trabalho de Mersenne

Mersenne correspondia-se assiduamente com René Descartes (1596-1650), que escreveu um compêndio sobre música. Nessa obra, que trata da teoria de ressonância, Descartes formulou importantes conceitos estéticos que cem anos mais tarde exerceriam grande influência em Jean-Phillipe Rameau, autor das bases teóricas do sistema tonal em seu *Traité de l'harmonie réduite à ses principes naturels*, publicado no mesmo ano (1722) em que Johann Sebastian Bach trazia ao mundo o primeiro volume do “Cravo Bem Temperado”.

Um nome que deve ser destacado na história da acústica é o de Joseph Saveur (1653-1716). Apesar de ter sido surdo e mudo (Enciclopédia Britânica do Brasil, 1987, vol.11, p.5670), graças à sua extraordinária inteligência e excepcional intuição, além de grande matemático, foi o fundador da acústica musical (Lindsay, 1972). Em 1701 publica *Système General des Intervalles de Sons et Son Application à Tous les Système et à Tous les Instruments de Musique*.

Saveur é o primeiro a apresentar o conceito físico de harmônico e de som fundamental, a partir da vibração de uma corda tensa. Introduziu também a noção de nó e de ventre para caracterizar as ondas estacionárias nas cordas, e concluiu que uma corda pode vibrar com vários dos seus harmônicos simultaneamente. Estudou o fenômeno dos batimentos em tubos de órgão.

As observações de Saveur serviram de confirmação à teoria de Rameau, o qual após ter conhecido os estudos de Saveur, publica em 1736 o *Nouveau Système de Musique Théorique*, que é basicamente um reforço das suas concepções anteriores, porém agora fundamentadas não só nas regras matemáticas e na divisão da corda, mas também nas experiências de Saveur, que mostraram que nos harmônicos naturais de um som estão contidos os intervalos fundamentais da harmonia.

Jean Baptiste Fourier (1768-1830), físico francês, foi professor na *École Polytechnique* de Paris, tendo sido por algum tempo ministro de Napoleão no Egito. Publicou em 1822, a obra *Théorie Analytique de la Chaleur*, onde expôs as idéias que conduziram ao desenvolvimento das teorias hoje conhecidas por séries, integrais, e transformadas de Fourier. Embora criadas para uma finalidade específica, essas teorias são provavelmente as que encontraram maior diversidade de aplicações em toda a história da física-matemática. Como veremos no capítulo 2, boa parte dos fundamentos teóricos dos procedimentos utilizados em nosso trabalho está baseada na Transformada de Fourier.

Hermann Ludwig von Helmholtz (1821-1894) é considerado um dos maiores físicos alemães do século XIX, tendo sido também um notável médico fisiologista. Em 1862, publica o célebre *On the Sensation of Tone*, onde combina suas idéias sobre som, audição e instrumentos musicais. Muitos dos principais fenômenos da acústica musical foram abordados por Helmholtz, entre eles, a fisiologia da audição, a teoria de consonância e dissonância, o modelo de vibração das cordas friccionadas, e a invenção do ressoador que recebeu seu nome.

Na transição para o século XX, destaca-se o nome de Wallace Clement Sabine, que iniciou os conhecimentos científicos sobre a acústica de salas.

1.2 De Sabine a Beranek

Em 1895, a Universidade de Harvard abriu um novo auditório no *Fogg Art Museum*, considerado uma obra-prima da arquitetura, mas que apresentava um problema sério: acusticamente era tão ruim que os alunos mal podiam compreender o que os professores falavam (Henrique, 2002). Wallace C. Sabine, então membro do Departamento de Física, foi chamado para resolver o problema.

Os experimentos realizados no *Fogg Art Museum* mostraram que o seu maior problema era a grande confusão causada pelos sons que ficavam muito tempo ressoando, mesmo depois de desligada a fonte sonora. Como o som era refletido várias vezes, levando muito tempo para ser amortecido, as sílabas faladas, ou as notas musicais emitidas, misturavam-se umas com as outras.

Sabine observou que o tempo em que isso ocorria dependia da quantidade de energia sonora que era perdida devido aos materiais absorvedores. Foi a partir desta consideração que iniciou suas pesquisas para determinar o coeficiente de absorção de vários

materiais, desenvolvendo o primeiro método de medição do tempo de reverberação. Em suas experiências, além de um cronômetro e de seu próprio ouvido, Sabine utilizou um tubo de órgão acoplado a um soprador acionado por uma válvula.

Sabine iniciou uma série de medições do tempo de reverberação em várias salas diferentes, definindo o tempo de reverberação como o intervalo necessário para que um som não mais pudesse ser ouvido, após uma fonte sonora ter sido desligada. O instrumento utilizado para determinar esta condição foi a sua própria percepção do som e a de seus colaboradores.

Com o desenvolvimento do seu trabalho, chegou a uma expressão empírica que determina o tempo de reverberação da sala:

$$RT = 0,163 \frac{V}{A} \quad (1.2.1)$$

Sabine constatou que o tempo de reverberação RT é função do volume total V e da área equivalente de absorção A , correspondente à soma das áreas S_i que compõem a superfície total da sala, ponderadas pelo coeficiente de absorção α_i de cada área,

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad (1.2.2)$$

Embora não tenha conseguido melhorar substancialmente a acústica do auditório, Sabine desenvolveu um corpo de conhecimentos científicos fundamental sobre a acústica de salas, publicando-os numa série de artigos escritos entre 1900 e 1915.

Tais conhecimentos só foram postos verdadeiramente à prova na consultoria acústica de uma nova sala: *Boston Symphony Hall*. Foi na realização desse projeto que Sabine consolidou o uso de sua célebre equação. Apesar de não ter tido boa aceitação na época, a *Boston Symphony Hall* viria a ser considerada uma das melhores salas de concerto do mundo.

Figura 1.2.1: *The Boston Symphony Hall*

A partir de Sabine, o tempo de reverberação passou a ser definido como o intervalo de tempo necessário para que o nível sonoro diminua 60dB ⁵, tendo-se como referência o instante em que a fonte sonora é desligada.

Outros pesquisadores (Eyring, Norris) aperfeiçoaram e adaptaram a fórmula de Sabine, porém todos os métodos experimentais de obtenção do tempo de reverberação tornaram-se obsoletos em 1965, quando Manfred Schroeder, do *Bell Laboratories*, publicou o *Método do Impulso Integrado*, que será deduzido detalhadamente no capítulo 2.

Após a morte de Sabine, as pesquisas em acústica se concentraram em pontos mais específicos, como o cálculo da densidade modal das salas. No plano subjetivo, houve a descoberta do *efeito de precedência*, ou efeito *Haas*, segundo o qual percebemos a direção

⁵ A escala dB (decibéis) para nível sonoro será definida na equação 2.2.10.

de uma fonte sonora conforme a direção do som direto, e não das reflexões posteriores. Esse efeito será discutido mais adiante.

Pesquisas sobre difusão (Meyer, 1954) começam a ganhar força, bem como o estudo dos fenômenos perceptivos referentes aos primeiros instantes (80 ms) do decaimento da energia. No mesmo artigo em que estuda a difusão, Meyer discute uma fórmula matemática relacionada a uma impressão acústica que se convencionou chamar de “clareza” ou “definição”. Essa fórmula é exatamente a mesma que hoje se utiliza para o cálculo do parâmetro D50, como veremos mais adiante.

Isso já era um indício de um fato que vinha incomodando os pesquisadores em acústica há algum tempo: salas com tempos de reverberação semelhantes soavam de maneira muito diferente. Um exemplo grosseiro, comentado pelo próprio Meyer, é que algumas salas de concerto tinham um tempo de reverberação praticamente igual ao do banheiro de sua casa. Não é difícil imaginar que ouvir um Jascha Heifetz tocando em uma dessas salas deveria ser uma experiência auditiva bem diferente do que ouvir o próprio Heifetz tocando violino no banheiro.

Estava claro que além do tempo de reverberação outros parâmetros acústicos deveriam ser levados em consideração.

Leo Beranek, em 1962, abriu as portas para uma nova abordagem sobre a acústica de salas, propondo, além do tempo de reverberação, uma extensa família de parâmetros acústicos que deveriam caracterizar por completo a qualidade acústica de uma sala de música.

1.3 De Beranek em diante

1.3.1 As pesquisas de Beranek

Beranek foi o primeiro a tentar sistematizar um conjunto abrangente de critérios com o objetivo de classificar a acústica de salas de música. Seu primeiro livro sobre o assunto *Music, Acoustics and Architecture* (1962) foi um marco histórico para a acústica de salas.

Em sua época havia carência⁶ de uma comunicação bem articulada entre engenheiros, músicos, ouvintes, enfim, todas as pessoas que direta ou indiretamente pertenciam ao universo da audição musical. Percebendo essa lacuna, Beranek empenhou grande parte de seu tempo em questionar e ouvir o que maestros, instrumentistas e arquitetos tinham a dizer. Até então, para o projeto arquitetônico de uma sala de concertos, os acústicos não dispunham de elementos quantitativos suficientes para avaliar a qualidade acústica ou prever os efeitos da constituição arquitetônica de uma sala. A fórmula para o cálculo do tempo de reverberação, desenvolvida por Sabine, permanecia praticamente como o único auxílio numérico utilizado.

Para chegar à definição dos critérios, Beranek estudou nada menos do que 54 salas por toda a Europa. Com base nas semelhanças e nas diferenças acústicas observadas entre as salas e comparando com avaliações subjetivas realizadas mediante entrevistas com jüris qualificados, Beranek chegou a um conjunto de parâmetros que, mesmo com algumas modificações e ponderações, se consolidaram como fundamentais para a avaliação da qualidade acústica de salas até os dias atuais.

⁶ Infelizmente essa carência ainda é freqüente.

Beranek formulou um sistema de pontuação no qual cada parâmetro contribuiria parcialmente, respeitando-se um peso diferenciado para cada parâmetro. Esses pesos foram estimados após deliberação com base nos resultados das pesquisas, totalizando um máximo possível de 100 pontos. Foram formados também cinco grupos que classificavam as salas em termos de qualidade acústica, apresentando conceitos que iam de “A” a “E”.

Naquele estágio das pesquisas, Beranek enunciou os seguintes parâmetros:

Tabela 1.3.1: Parâmetros subjetivos de Beranek (1962)

Atributos Positivos Independentes	Atributos Negativos Independentes	Atributos Dependentes
Intimismo Vivacidade Calor Nível de Som Difusão Equilíbrio Conjunto	Eco Ruído Distorção Desuniformidade	Clareza Brilho Ataque Extensão dinâmica

Os parâmetros dependentes são combinações dos independentes.

Para a construção de uma escala numérica de qualidade acústica, através da qual as salas pudessem ser comparadas, era importante primeiramente identificar quais as variáveis mais relevantes. Segundo a maioria dos músicos, o tempo de reverberação, associado à vivacidade, e o volume da sala, associado ao intimismo, poderiam ser um bom ponto de partida para a análise. Logo se percebeu, porém, que o volume da sala não era uma grandeza determinante, pois algumas das melhores salas tinham volume bem próximo ao das piores. Entretanto, o volume da sala é um dos determinantes para o *initial time delay gap* (ITDG) que é a medida do intervalo de tempo entre a incidência do som direto em um ponto e a chegada da primeira reflexão. O ITDG geralmente é proporcional ao tamanho da sala, e estaria relacionado ao parâmetro intimismo, como veremos mais adiante.

O tempo de reverberação, idealmente, deveria ser ajustado conforme o estilo de música a ser apresentado na sala. No entanto sabemos que em nossos dias as salas devem servir a uma extensa gama de estilos, o que pode gerar discrepâncias nas avaliações subjetivas. O tempo de reverberação em médias frequências medido em 47 salas usadas para música sinfônica apresentou na categoria A (seis salas) valores entre 1.7s e 2.05s. Nas três categorias seguintes os valores variaram entre 1s e 2s.

Nada se pôde concluir sobre os efeitos da forma ou da idade das salas. As seis salas da categoria A apresentavam três desenhos diferentes e esses mesmos desenhos também eram encontrados em salas de categorias inferiores.

Analisando as deficiências entre as salas, Beranek concluiu que alguns fatores em particular podem acarretar uma queda maior na classificação das categorias, por exemplo:

- a) um tempo de reverberação relativamente curto
- b) deficiências sérias na razão de graves
- c) desequilíbrio sonoro
- d) distorções acentuadas

Beranek percebeu então que os outros parâmetros, além do volume da sala e do tempo de reverberação, teriam importância decisiva e se concentrou em estudá-los mais a fundo.

Intimismo

Vinte salas apresentaram tempos de reverberação iguais ou superiores a 1.7s e essas salas estavam distribuídas pelas cinco categorias. Em 17 dessas salas não havia nenhuma distorção aparente, o nível de ruído era baixo, equilíbrio e difusão adequados. Observou-se, porém, uma variação no ITDG dessas 17 salas. Esse parâmetro físico está relacionado a uma impressão acústica que os músicos chamaram de intimismo.

A tabela a seguir se refere às 17 salas citadas acima:

Tabela 1.3.2: classificação das salas segundo o ITDG

Categoria	Número de Salas	ITDG (ms)
A	6	8 a 21
B	8	22 a 34
C	2	35 a 46
D	1	47 a 58
E	0	59 a 71

Para as 47 sala estudadas o ITDG variou entre 8 e 71 milissegundos. Observou-se também que o parâmetro intimismo é fortemente influenciado pela disposição das superfícies refletoras mais próximas.

Os resultados apresentados na tabela acima são confirmados por duas pesquisas psicoacústicas que tratam dos efeitos do tempo de atraso das reflexões sonoras incidentes em determinado ponto. Entre 1951 e 1953, H. Haas na Universidade de Gottingen e Nickson (1964) na Austrália chegaram a resultados bastante semelhantes. Fizeram uma experiência com alto-falantes para um grupo de 20 ouvintes. Com o intuito de produzir um padrão de reflexão semelhante ao de uma superfície refletora, eles usaram um gravador de fita magnética que adicionava sobre o som original uma réplica idêntica com um determinado tempo de atraso. A intensidade e o intervalo de tempo do som atrasado podiam ser controlados. Duas passagens musicais de aproximadamente 14 segundos foram executadas por um quarteto de cordas. Durante o período entre as repetições, os ouvintes eram questionados sobre uma eventual perturbação causada pelas reflexões adicionadas. Em cada sessão uma amostra musical era repetida cerca de 18 vezes variando-se a intensidade e o tempo de atraso. Os ouvintes se sentiram perturbados principalmente por reflexões adicionadas a músicas de andamento rápido tocadas por instrumentos de corda.

Quando a intensidade da reflexão era 5 dB abaixo da intensidade do som direto, menos de 20% dos ouvintes foram perturbados por atraso de 15 a 30 milissegundos. Praticamente todos os ouvintes se sentiram perturbados quando as reflexões chegavam com um atraso próximo a 100 milissegundos. Quando o ITDG atingia 70 ms, 80 % dos ouvintes se sentiram incomodados. Concluiu-se então que um atraso (ITDG) de mais de 20 milissegundos comprometia a qualidade musical. Nesses experimentos os ouvintes não eram necessariamente freqüentadores de salas de concerto, nem músicos profissionais.

Até então, somente a primeira reflexão havia recebido atenção. E quanto à segunda? A essência do problema é que as reflexões tendem a ser percebidas como uma só se elas estiverem separadas por um intervalo de tempo menor que 20 ms, então Beranek desconsiderou qualquer nova reflexão que estivesse dentro desse intervalo. Quando duas reflexões estão separadas por mais de 70 ms, nós começamos a perceber a segunda reflexão como um eco. Segundo Beranek, uma separação intermediária tem efeito prejudicial, caracterizada pela sensação de desconforto alegada pelos ouvintes.

Vários outros experimentos mediram o padrão de reflexão diretamente nas salas. Thiele (1953), Meyer (1956) e Schodder (1956) exploraram métodos de medição dos padrões de reflexão em salas de concerto reais, além de estúdios de rádio, teatros e igrejas.

Vivacidade

Vivacidade é a impressão subjetiva relacionada à reverberação em médias frequências. Influenciando também em outros efeitos, a reverberação aumenta o "preenchimento" sonoro, contribui para a fusão dos timbres instrumentais, aumenta a faixa dinâmica e melhora a difusão.

Do ponto de vista dos músicos, a reverberação é um componente musical de grande importância. Ela desempenha um papel fundamental para a performance, podendo contribuir agradavelmente ou prejudicar seriamente o resultado final.

Conforme o estilo ou gênero musical, os músicos preferem salas de concerto com determinados tempos de reverberação. Quando a reverberação é mais longa do que a ideal, os parâmetros clareza e conjunto ficam prejudicados e a precisão da percepção do nível de som em cada instante também é comprometida.

Do ponto de vista físico, a vivacidade de uma sala é determinada pelo tempo de reverberação em médias frequências. Particularmente para baixas frequências a reverberação está associada ao parâmetro subjetivo "calor", que será discutido mais adiante.

Vivacidade é provavelmente o parâmetro com o qual os músicos têm maior contato em sua rotina de trabalho. Uma sala com baixo grau de vivacidade é usualmente descrita como "seca" ou "morta". Beranek mediu o tempo de reverberação em 1KHz para salas consideradas secas:

Orchestra Hall, Chicago: 1.3s

Academy of Music, Philadelphia: 1.4s

Kresge Auditorium, Cambridge: 1.47s

Royal Festival Hall, Londres: 1.5s

Sir John Barbirolli, Eugene Ormandy, Fritz Reiner, Pierre Monteux, entre outros foram unânimes em expressar seu descontentamento com relação à vivacidade daquelas salas. Para o repertório tradicional de orquestra sinfônica, regentes e ouvintes treinados levaram Beranek a considerar um tempo de reverberação de 1.6s como um patamar mínimo para que sua vivacidade fosse considerada razoável.

As salas listadas abaixo apresentaram alguns dos tempos de reverberação mais atraentes.

Grosser Musikvereinssaal, Viena: 2.05s

Tanglewood Music Shed, Lenox: 2.05s

Concertgebouw, Amsterdam: 2.0s

Symphony Hall, Boston: 1.8s

Teatro Colón, Buenos Aires: 1.8s

Carnegie Hall, New York: 1.7s

Os tempos acima foram medidos com as salas ocupadas.

Beranek descreve algumas declarações de maestros eminentes a respeito das salas citadas.

Herbert von Karajan: “A sonoridade da *Musikvereinssaal* é tão plena que torna nítido e preciso o ataque dos instrumentos. As notas parecem emergir umas das outras, mas eu considero a *Symphony Hall* um pouco melhor do que a sala de Viena.”

Igor Markevich: “ Eu prefiro a reverberação da *Symphony Hall*. A *Musikvereinssaal* tem uma reverberação mais longa que a sala de Boston, mas eu não apreciaria uma sala com o tempo de reverberação maior que o de Viena. A *Conertgebouw* tem uma acústica muito boa, e o *Teatro Colón* também é uma ótima sala. Eu acho o *Carnegie Hall* um pouco mudo.”

Dimitri Mitropoulos: “A *Musikvereinssaal* soa demais. *Carnegie Hall* é boa, não reverbera muito. Gosto muito da *Symphony Hall*.”

Pierre Monteux: “A *Concertgebouw* tem uma acústica maravilhosa. A *Musikvereinssaal* também é muito boa. Eu acho o *Carnegie Hall* um pouco seco quando está ocupado. Adoro a *Symphony Hall*, *Tanglewood* também é extremamente boa.”

Charles Munch: “*Musikvereinssaal* tem uma belíssima qualidade de som. *Carnegie* poderia ter uma reverberação melhor.”

Isaac Stern: “*Concertgebouw* é maravilhosa para violino. A sala inteira soa quando se toca uma nota. *Carnegie* é melhor nos ensaios do que com o público. *Tanglewood* tem brilho e calor. A melhor sala é a do *Teatro Colón*.”

Hermann Scherchen: “*Musikvereinssaal* é muito boa para música romântica, mas não para Bach.”

Depois de consultar músicos, engenheiros de som, críticos e solistas, Beranek concluiu que para a música romântica o tempo de reverberação ideal gira em torno de 2.2s, para um repertório com orquestra de tamanho médio esse tempo cai para 1.9s, para música barroca 1.5 s e para clássica o ideal é cerca de 1.7s.

Hermann Scherchen questionou: “Com uma faixa tão larga do tempo de reverberação ideal, que depende do tipo de música, como eu posso dizer o que é uma sala boa?” Beranek não fornece uma resposta satisfatória para essa pergunta, mas na inviabilidade de se construir um tipo de sala para cada estilo de música uma tentativa contemporânea tem sido criar salas onde seja possível ajustar os parâmetros acústicos através de dispositivos mecânicos que variam as características físicas do auditório, como é o caso da Sala São Paulo.

Embora o tempo reverberação em médias frequências tenha se mostrado valioso para a determinação da vivacidade da sala, o tempo de reverberação em altas frequências mostrou ter pouca relação com a vivacidade. Uma comparação entre tempos de reverberação em 2KHz, 4KHz e 6KHz com os de médias frequências (500 Hz a 1 KHz) mostra que as razões entre os tempos de reverberação de altas para médias frequências é praticamente o mesmo em salas com alto ou baixo grau de vivacidade.

Calor

Um depoimento de Leopold Stokowsky é suficiente para dar uma boa idéia da importância do parâmetro calor acústico: “Na minha opinião, um dos problemas acústicos mais sérios nas modernas salas de concerto é a fragilidade dos sons graves. Os instrumentos que trabalham nessa tessitura, por natureza, precisam de muito mais energia para produzirem o mesmo nível de som que instrumentos de média e alta frequência. As pessoas precisam respeitar o fato de que em música as frequências são divididas em cinco faixas: muito baixas, baixas, médias, altas e muito altas. Eu tenho sérios problemas com as muito baixas, algum problema com as baixas, nenhum problema com as médias e altas, e as muito altas soam com extrema facilidade. Vou dar o exemplo da *Royal Festival Hall*, em Londres. Nessas salas os contrabaixos simplesmente não podem ser ouvidos. Durante os ensaios, eu andei pela sala, pedi que os baixos tocassem o mais forte possível, e ainda assim não consegui ouvi-los. O som como um todo é muito metálico e brilhante, mas não há sensação de calor sonoro.” Barbirolli compartilhava da opinião de Stokowski.

O parâmetro físico que descreve o calor acústico é denominado razão de graves (BR) e é calculado dividindo-se o tempo de reverberação (RT) nas baixas frequências (67Hz, 125Hz e 250Hz) pelo tempo de reverberação nas médias frequências (500Hz e 1KHz). W. A. McNair, do *Bell Laboratories*, já em 1930 publicou no *Journal of the Acoustical Society of America* um artigo que advertia para a importância da razão de graves. Posteriormente, muitos outros escritores também enfatizaram a relevância desse parâmetro.

A tabela a seguir mostra valores da razão de graves em diversas salas.

Tabela 1.3.3: Valores de razão de graves para algumas salas

SALAS	BR 250	BR 125	BR 67
Tonhale,Zurich	1,12	1,31	1,44
Symphony Hall,Boston	1,11	1,22	1,28
Tanglewood,Lenox	1,22	1,27	sm
Stadt Casino,Basel	1,18	1,29	1,29
Binyanei Ha Oomah,Jerusalém	1,14	1,25	1,37
Musikvereinssaal,Viena	1,07	1,12	1,17
Carnegie Hall,New York	1,05	1,05	1,35
Academy of Music,Philadelphia	1,21	1	sm
St. Andrew's Hall,Glasgow	0,95	0,95	0,84

Sendo $BR_{250}=RT(250)/RT_{med}$, $BR_{125}=RT(125)/RT_{med}$, $BR_{67}=RT(67)/RT_{med}$.

A indicação “sm” significa que não houve medição considerável para aquela sala.

Os grupos visíveis na tabela anterior constituem uma classificação das salas segundo o parâmetro calor. A partir dessa classificação, Beranek chegou aos valores médios das razões de grave associados aos critérios de mérito:

Tabela 1.3.4: Critério de mérito para BR

Categoria	BR250	BR125	BR médio	Pontos
Excelente	1,14	1,27	1,21	15
Boa	1,06	1,03	1,05	9
Regular	0,97	0,95	0,96	5
Pobre	0,9	0,86	0,88	2

Sendo que $BR \text{ médio} = (RT_{250} + RT_{125}) / (RT_{500} + RT_{1000})$.

Que fatores contribuem para a perda de graves numa sala de concerto? Observou-se que as salas com um bom grau de calor acústico dispunham de pouca ou nenhuma superfície de madeira fina no auditório, e que as salas mais deficientes apresentavam maiores quantidades daquele material. O problema se agrava quando existe um espaço livre por trás da madeira permitindo uma mobilidade que dissipa energia em baixas frequências,

causando assim a perda dos graves. Numa sala de concertos de tamanho médio, uma onda sonora reflete-se nas superfícies aproximadamente dez vezes em um segundo. Em salas onde o teto e as laterais dispõem de madeira, após 10 segundos, uma onda de 125Hz tem sua intensidade sonora reduzida a $1/35$ da original. No caso de superfícies rígidas, como alvenaria por exemplo, a intensidade, nas mesmas condições, seria reduzida a $1/3$. Isso significa que em 125Hz (aproximadamente um Dó 2) a intensidade se perde dez vezes mais rápido numa sala repleta de madeira fina do que numa sala com revestimento rígido.

Em 1KHz essa taxa de dissipação já é praticamente a mesma nos dois casos. É interessante observar que este problema se reduz bastante no caso da madeira apresentar espessuras maiores, o que traz um certo alívio pois este material é amplamente utilizado em salas de música.

Nível de som direto

Para uma boa acústica o som que viaja diretamente dos músicos para os ouvintes deve apresentar um nível de audibilidade confortável. Se a intensidade do som direto for insuficiente, ela pode ser mascarada pelo ruído ambiente ou pelo som reverberante. O nível de som direto depende de vários fatores: distância entre os músicos e os ouvintes, padrão de reflexão sonora, tamanho da sala, entre outros.

Geralmente os ouvintes preferem se sentar no centro da platéia. Essa preferência em parte se deve a impressões visuais, mas essa localização pode apresentar algumas vantagens acústicas. O ouvinte percebe o som com um nível de audibilidade satisfatório, a percepção da difusão é propícia e a relação entre o nível de som direto e reverberante é equilibrada. A distância entre a posição do maestro e o centro da platéia é listada a seguir para algumas importantes salas:

Symphony Hall: 19.52m

Tanglewood: 20.74m

Carnegie Hall: 18.30m

Teatro Colón: 21.96m

Musikvereinssaal: 17.08m

Concertgebouw: 14.64m

Após analisar as melhores salas, Beranek chegou ao valor médio de 60 pés (18.3m), atribuindo a essa distância a pontuação máxima para o parâmetro nível de som direto: 10 pontos. A sala pior classificada apresentava um distância de 48 m.

Uma maneira objetiva de se estimar o nível de som direto é observar a amplitude do primeiro pico no gráfico da resposta impulsiva medida⁷, pois esse pico representa justamente a chegada do som direto no ponto de captação sonora.

Nível de som reverberante

Tanto o som direto quanto o som reverberante contribuem para o nível sonoro total dentro de uma sala. O padrão de reverberação também interfere em alguns outros parâmetros, como vivacidade e clareza.

Lothar Cremer (1978) chegou a uma fórmula empírica que expressa o nível de som reverberante em função do volume da sala, do tempo de reverberação e da energia sonora.

A relação de Cremer é:
$$L_r = NT / V \quad (1.3.1)$$

Onde L_r é o nível de som reverberante, N é proporcional à energia do som, T é o tempo de reverberação e V é o volume da sala.

O tempo de reverberação da maioria das salas está entre 1 e 2 segundos e o volume varia entre 300.000 e 1.500.000 pés cúbicos (8.490 e 42.450 m³). Dentro dessa estimativa,

⁷ O conceito de resposta impulsiva será abordado em capítulos posteriores.

para efeito de se criar uma escala mais confortável, Beranek multiplicou a razão (T/V) pelo fator 1.000.000, chegando a uma extensão numérica aproximada que variava de 1 a 6. Considerando como padrão as salas melhores qualificadas subjetivamente no atributo nível de som (Boston, Philadelphia, Glasgow, Amsterdã, Bruxelas e Buenos Aires) Beranek chegou a um valor ótimo (3) para o parâmetro numérico acima.

Clareza ou Definição

Quando a música tocada numa sala soa bem definida, com articulações sonoras límpidas e precisas independentemente do andamento, dizemos que a sala apresenta bom grau de clareza. Caso contrário, o som se apresenta confuso e indefinido, principalmente em passagens mais rápidas.

Estudos psicoacústicos revelaram que os primeiros 50ms e os 80ms, a contar a partir da chegada do som ao ouvido, são particularmente importantes para certas propriedades da percepção sonora. Isso foi levado em consideração para a definição do parâmetro objetivo associado à clareza. Fisicamente, clareza é a razão da energia que chega nos primeiros 80ms pela energia remanescente do respectivos sinal.

O grau de definição de uma sala é função do padrão de reflexão de suas superfícies, da distância entre o ouvinte e músico e das dimensões da sala. Mais do que qualquer outro, a reverberação parece ser o atributo decisivo para o parâmetro clareza.

Na época em que definiu os critérios de qualidade acústica, Beranek não incluiu o parâmetro clareza no quadro das pontuações, mas hoje em dia esse parâmetro é considerado um dos mais importantes, sendo indicado nas normas internacionais (ISO 3382) mais modernas.

Brilho

Uma expressão muito comum no vocabulário de músicos e de ouvintes é "som brilhante". O som brilhante de uma sala deriva da proeminência dos harmônicos superiores e do relativo baixo decaimento para essas frequências. É afetado pelo intervalo entre a chegada do som direto e das primeiras reflexões, e também está relacionado com a rapidez da chegada da porção significativa da energia nas primeiras frações de segundo (clareza).

O brilho está para altas frequências, assim como o calor está para as frequências mais baixas. Esses dois parâmetros são determinados pela razão entre os tempos de reverberação nas respectivas faixas de frequência em relação ao tempo de reverberação nas frequências médias.

Difusão

Há uma preferência subjetiva dos ouvintes para os casos em que a informação sonora parece chegar igualmente de todas as direções. Essa qualidade é chamada difusão.

Para que a difusão ocorra é preciso haver uma reverberação suficiente e também é importante que o ambiente apresente superfícies irregulares para espalhar as reflexões sonoras por toda a sala. Muitas das melhores salas de música do mundo apresentam colunas, elevações ou depressões em relevo, estátuas e tantos outros elementos que auxiliam no processo de difusão.

Antes de atingir os ouvidos dos espectadores, boa parte das ondas sonoras são refletidas muitas vezes dentro da sala. Caso haja excesso de materiais absorvedores no ambiente, não haverá um número suficiente de reflexões para que o ouvinte tenha a sensação de difusão.

Beranek não criou nenhum vínculo objetivo para determinar o parâmetro difusão.

Equilíbrio

Refere-se ao grau de unidade musical percebido pelo ouvinte, de tal forma que o som do conjunto musical pareça harmonioso para esse ouvinte. Obviamente, esse grau depende da disposição da orquestra, mas também depende fortemente do desenho do teto sobre o palco e da presença de paredes oblíquas que "misturem" harmoniosamente o som, projetando-o ao público.

Esse parâmetro lida com o equilíbrio sonoro entre as seções ou naipes de uma orquestra. Para um bom equilíbrio deve haver uma combinação entre requisitos acústicos e musicais. O ambiente de palco deve apresentar dimensões apropriadas, superfícies internas irregulares e superfícies refletoras estrategicamente dispostas. Daí em diante, o equilíbrio dependerá da sensibilidade artística dos músicos.

Conjunto

Trata-se do grau de facilidade de escuta entre os músicos de modo que cada um execute a sua linha ouvindo equilibradamente todas as outras. O desenho do palco é de fundamental importância e deve ser estabelecido de tal forma a conduzir o som uniformemente de uma parte do palco para todas as outras. Pode ser entendido como um equilíbrio interno entre os músicos.

1.3.2 Pós 1962

Após a publicação desse primeiro trabalho de Beranek, o cenário estava montado e os acústicos agora tinham muito o que fazer. Uma quantidade volumosa de publicações não tardou em surgir.

As pesquisas desde então concentram-se em três grandes grupos:

- Medições das salas de concerto em função dos parâmetros conhecidos.
- Criação e pesquisa de novos parâmetros.
- Verificação da correlação entre o resultado das medições (parâmetros objetivos) e as impressões subjetivas.

1.3.2.1 Medições das salas de concerto em função dos parâmetros conhecidos

Na entrada da década de 60 as técnicas de medição de tempo de reverberação e resposta impulsiva ainda eram precárias. Soma-se a isso a insuficiência de critérios a serem considerados para uma boa acústica.

Ao final da década de 70, tais parâmetros já estavam estabelecidos e já havia ocorrido um avanço admirável nas técnicas de medição tanto da resposta impulsiva, quanto do tempo de reverberação e dos demais parâmetros.

Os responsáveis por esse progresso foram Beranek (1962), com seus novos parâmetros e Schroeder pela nova técnica de medição de tempo de decaimento (1965) e de resposta impulsiva (1979).

O terceiro responsável não foi uma pessoa, mas um evento histórico: o avanço notável da capacidade e da velocidade de processamento dos computadores, dando vazão a

novos algoritmos que permitiram a implementação de novas técnicas que revolucionaram a produção científica.

Após todos esses eventos, os cientistas acústicos já sabiam *o que* medir, *como* medir e tinham em mãos os *instrumentos* de que necessitavam.

Foram publicados trabalhos que traziam resultados dos parâmetros medidos em diversas salas de concerto. Schroeder (1966 e 1974), aplicando suas próprias técnicas, Angelo Farina⁸, estudando vários teatros italianos, além do próprio Beranek, que em 2004 publicou uma obra monumental trazendo resultados detalhados dos parâmetros atualizados medidos nas cem mais conceituadas salas de concerto do mundo.

Name of Hall	No. of Seats	Cubic Volume, m ³	sec			dB				
			RT _{ave}	RT _{ave}	EDT _{ave}	BQI	G _{ave}	G ₁₂₅	ST1	LF
			Occ.	Unocc.	Unocc.	(3-Band) (Early)	(Euro) Unocc.	(Euro) Unocc.	(4-Band) (Early)	(4-Band) (Early)
Amsterdam, Concertgebouw	2,037	18,780	2.00	2.59	2.63	0.54	5.4	4.7	-17.8	0.18
Aspen, Benedict Music Tent	2,050	19,830	2.50	—	—	—	—	—	—	—
Athens, Megaron, Concert Hall	1,962	18,100	1.85	2.30	—	—	3.1	—	—	—
Baden-Baden, Festspielhaus	2,300	20,100	1.92	2.09	1.82	—	3.4	-0.3	—	—
Baltimore, Meyerhoff Symphony Hall	2,467	21,530	2.00	2.34	2.31	0.56	3.8	3.0	-12.2	0.17
Basel, Stadt-Casino	1,448	10,500	1.78	2.31	2.29	0.62	6.9	7.9	-13.7	—
Bayreuth, Festspielhaus	1,800	10,308	1.65	—	—	—	—	—	—	—
Belfast, Waterfront Hall	2,250	30,800	2.15	2.35	—	—	—	—	—	—
Berlin, Kammermusiksal (Philharmonie)	1,138	11,000	1.82	2.13	2.10	—	—	—	—	—
Berlin, Konzerthaus (Schauspielhaus)	1,575	15,000	2.00	2.47	2.43	0.64	5.7	7.1	-18.8	—
Berlin, Philharmonie	2,218	21,000	1.90	2.20	2.01	0.47	3.7	3.0	-16.8	—
Birmingham, Symphony Hall	2,211	25,000	1.85	2.52	2.00	—	—	—	—	—
Bonn, Beethovenhalle	1,407	15,730	1.65	1.80	—	—	—	—	—	—
Boston, Symphony Hall	2,625	8,750	1.90	2.52	2.37	0.61	4.2	2.9	-13.7	0.22
Brussels, Palais des Beaux-Arts	2,150	12,520	1.60	1.76	1.86	—	—	—	—	—

Figura 1.3.2.1.1: Resultados de Beranek (2004) para algumas salas

⁸ <http://www.angeloofarina.it>

1.3.2.2 Criação e pesquisa de novos parâmetros

Logo depois da publicação do trabalho de Beranek, ocorreu uma explosão de sugestões de novos parâmetros.

Figura 1.3.2.2.1: Excesso de parâmetros

No entanto vários desses parâmetros se mostraram insignificantes ou bastante dependentes entre si. Somente os que de fato eram mais importantes foram permanecendo, como em um processo de seleção natural.

Diversos artigos trazem discussões e análises dos critérios objetivos para se caracterizar a acústica de uma sala de música (Nickson, 1964; Jordan, 1970 e 1981; Baxa, 1980; Hulbert, 1982). Todos eles giram em torno dos parâmetros propostos por Beranek.

Uma das principais classes de novos parâmetros diz respeito à impressão acústica de espacialidade. Trata-se do efeito psicoacústico causado pelas reflexões sonoras que atingem o ouvinte a partir de várias direções (Barron, 1971). Embora não chegue a distinguir tais direções, o ouvinte cria mentalmente uma sensação acústica espacial do ambiente.

Este parâmetro está obviamente relacionado com o fenômeno da difusão, mas também é influenciado decisivamente por outras propriedades dentre as quais a mais importante é a *dissimilaridade biauricular*. Essa grandeza é uma medida da diferença entre o que é captado em cada um dos ouvidos ao longo do tempo de exposição. Fisicamente, a impressão espacial é inversamente proporcional ao grau de correlação entre os sinais biauriculares, e está associada ao parâmetro objetivo IACC (*interaural cross correlation*).

Para que haja uma boa impressão de espacialidade também é necessário que uma boa parcela da energia sonora chegue aos ouvidos pelas laterais. Estudos psicoacústicos (Schroeder 1979) confirmam que a impressão de espacialidade é inversamente proporcional ao grau de simetria espacial do sinal que está chegando aos ouvidos. Um sinal que chega do plano frontal à cabeça oferece pouca informação de espacialidade, enquanto que um sinal que chega pelas laterais tende a aumentar essa impressão. Com base nesse fato foi criado o parâmetro LFC (fração lateral) que é a razão entre a energia que chega pelas laterais e a energia omnidirecional⁹.

O parâmetro IACC tem sido um dos mais relevantes do ponto de vista da análise subjetiva, além de apresentar a interessante propriedade de ser um dos parâmetros com menor grau de dependência em relação aos outros.

⁹ Energia que chega de todas as direções.

Um depoimento interessante é dado por Schroeder (1980). Ele se refere aos experimentos de Gottlob e Siebrasse, nos quais utilizaram uma cabeça artificial de captação biauricular e gravaram concertos ao vivo em várias salas européias. Posteriormente, executaram os sons gravados em uma câmara anecóica¹⁰ dotada de um sofisticado sistema de reprodução, na qual Schroeder entrou como ouvinte. Ele mesmo descreve sua experiência:

I will never forget the moment when, comfortably seated in the Göttingen “free-space-room”, I first switched myself from Vienna’s famed Musikvereinssaal to Berlin’s Philharmonie. The acoustical differences of these two halls stood out in a manner so vivid that it is difficult to put into words.

Dentre os outros parâmetros que se firmaram como os mais importantes, destacam-se o parâmetro G (*strength*) e o parâmetro ST1 (*support factor*).

O parâmetro G está associado à impressão acústica de nível sonoro (geralmente ligada à acepção subjetiva dos termos força, volume, ou intensidade). Uma característica interessante desse parâmetro é que ele é definido como uma medida absoluta dada pela diferença entre o nível sonoro da fonte (que se pressupõe conhecido) e o nível sonoro medido num ponto de captação. Essa característica o coloca como um parâmetro bastante indicado para a comparação entre salas.

O parâmetro ST1 está ligado à impressão acústica de “conjunto” proposta por Beranek. Trata-se de um indicador especialmente formulado para corresponder à *performance* conjunta dos músicos no palco. É calculado a partir da resposta captada por um microfone distante 1 m de uma fonte sonora omnidirecional, ambos no palco.

¹⁰ Sala que não produz reverberação.

1.3.2.3 Correlação entre parâmetros acústicos subjetivos e objetivos

Na tabela a seguir, associamos cada parâmetro acústico subjetivo à expressão matemática do seu respectivo parâmetro acústico objetivo (ISO 3382):

Tabela 1.3.2.3.1: Parâmetros acústicos subjetivos e objetivos

Parâmetro Subjetivo	Parâmetro Objetivo	Expressão Física
Reverberação	RT 60	Schroeder (1965)
Calor	BR	$\frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}}$
Brilho	TR	$\frac{RT_{2000} + RT_{4000}}{RT_{500} + RT_{1000}}$
Razão D/R	RDR	$10 \log [E_d / E_r]$
Intimismo	ITDG	$t_d - t_r$
Clareza	C80	$10 \log \left[\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{t_f}^{80ms} p^2(t) dt} \right]$
Definição	D50	$\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{t_f}^{80ms} p^2(t) dt}$
Impressão espacial	IACC LFC	$\max \left \left[\int p_e(t) p_d(t + \alpha) dt \right] \cdot \left[\int p_e^2(t) dt \int p_d^2(t) dt \right]^{-1/2} \right $ $\frac{\int_0^{80ms} p_{lat}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p_{omni}^2(t) dt}$

Sendo que:

RT 60 é o tempo de reverberação, ou seja, o intervalo de tempo que o sinal sonoro leva para diminuir 60 dB. Esse parâmetro será obtido através do método de Schroeder.

O tempo de reverberação pode ser obtido a partir dos primeiros 30 dB de decaimento, extrapolando-se linearmente para 60dB. Caso a extrapolação seja feita a partir dos primeiros 10dB, então esse parâmetro recebe o título de EDT (*early decay time*).

RT_{125} , RT_{250} , RT_{500} , são os tempos de reverberação nas frequências 125 Hz, 250Hz, 500Hz e assim respectivamente.

BR é razão de graves (*bass ratio*) e TR é razão de agudos (*treble ratio*).

t_d é o instante em que o som direto chega em determinado ponto de captação, t_r é o instante em que chega a primeira reflexão, e t_f é o instante em que o sinal da resposta impulsiva cai ao nível do ruído ambiente (esse instante é determinado por um cálculo de truncamento nos processamentos implementados) .

A diferença entre t_d e t_r é o ITDG ou *inicial time delay gap*.

RDR (dB) é a razão logarítmica entre a energia de som direto e a energia de som reverberante. Também pode ser calculado como RDR (%), sendo a razão linear entre a energia de som direto e a energia total.

$p(t)$ é o valor da resposta impulsiva num dado instante.

$p_{lat}(t)$ é a resposta impulsiva obtida com um microfone figura 8 (que capta os sons laterais) e $p_{omni}(t)$ é a resposta impulsiva obtida com o mesmo microfone, porém em modo de captação omnidirecional.

LFC é a razão entre a energia de som lateral e a energia de som omnidirecional.

A expressão física da clareza C80 (dB) é a razão logarítmica entre a energia que chega nos primeiros 80 milissegundos e a energia remanescente. Essa razão também pode ser tomada nos primeiros 50 milissegundos (C50).

A expressão física da definição D50 é a razão linear entre a energia que chega nos primeiros 50 milissegundos e a energia total. Essa razão também pode ser tomada nos primeiros 80 milissegundos (D80).

IACC (*interaural cross correlation*), é o valor máximo do coeficiente de correlação entre os sinais obtidos no ouvido esquerdo (p_e) e direito (p_d), e mede a dissimilaridade entre o sinal que chega em um ouvido com relação ao sinal que chega ao mesmo tempo no outro.

O parâmetro G é dado por:

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\tau} p^2(t) dt}{\int_0^{\tau} p_s^2(t) dt} \right] \quad (1.3.2.3.1)$$

onde $p(t)$ é a resposta impulsiva em determinado ponto de captação na sala e p_s é a resposta impulsiva da fonte numa situação de captação em campo livre a uma distância de 10m do microfone. Ou seja, o denominador no logaritmo é um valor constante para a fonte.

Alguns fabricantes de fontes omnidirecionais fornecem uma especificação L_w que facilita a medição do parâmetro G, que nesse caso pode ser obtido por (ISO 3382):

$$G = L_p - L_w + 31dB \quad (1.3.2.3.2)$$

onde L_p é o nível sonoro (SPL) medido em determinado ponto da sala.

O parâmetro ST1 é dado por:

$$ST1 = 10 \log \left[\frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_0^{10ms} p^2(t) dt} \right] \quad (1.3.2.3.3)$$

onde $p(t)$ é a resposta impulsiva obtida num ponto de captação do palco distante 1m da fonte omnidirecional. Os limites de integração foram definidos a partir de experiências psicoacústicas.

Os resultados gerais dos parâmetros medidos foram comparados às avaliações subjetivas, de modo a compor um conjunto de valores tidos como preferenciais para os diversos parâmetros:

Conditions	sec			dB*					
	RT _{scc}	EDT _{mscc}	BQI	G _{mid*}	G _{125*}	ITDG	SDI	C _{ac,3*}	ST1
	Av .5-1 kHz	RT		Av .5-1 kHz	125 Hz	(msec) Mid-Floor	visual	Av .5-1-2 kHz	(dB) stage
Symphonic Repertoire, Over 1,400 Seats	1.8 to 2.1	2.2 to 2.6	0.65 to 0.71	1.5 to 5.5	3.0 to 6.0	<25	>0.8	-3.0 to 0	> -14
Chamber Music, Under 700 Seats	1.6 to 1.8	1.9 to 2.3	0.7 to 0.76	9.0 to 13	9.0 to 13	<20	>0.8	-2.0 to 2.0	> -12
Opera, Over 1,200 Seats	1.4 to 1.6	1.5 to 1.9	0.6 to 0.71	-1.0 to 2.0	-1.05 to 2.3	<23	>0.5	1.0 to 3.0	—

Figura 1.3.2.3.1: Valores preferencias dos parâmetros (Beranek, 2004)

No caso do tempo de reverberação, os valores preferenciais de RT60 obedecem a um compromisso que diz respeito ao volume da sala e ao propósito para o qual a sala será usada:

Figura 1.3.2.3.2: Valores preferenciais para RT60 (Ginn, 1978)

Como já comentamos, dois dos principais problemas para o estudo da acústica das salas são identificar as experiências subjetivas associadas a uma boa acústica e estabelecer as relações entre essas impressões subjetivas e os parâmetros físicos apropriados para descrevê-las. Parte fundamental desse processo é a realização de análises subjetivas de júri.

Hawkes (1971) e um grupo da *University College London* empregaram técnicas estatísticas para reduzir o grande número de variáveis correlacionadas em busca de um conjunto de parâmetros acústicos independentes associados às qualidades subjetivas mais diversas avaliadas por um júri de ouvintes. Numa primeira abordagem almejaram chegar a um conjunto de parâmetros acústicos que cobrissem razoavelmente bem um universo de impressões subjetivas descritas pelo júri, escaladas conforme abaixo:

- agradável / desagradável
- vivo / morto
- quente / frio
- limpo / sujo
- opaco / brilhante
- linear / explosivo
- distante / próximo
- seco / reverberante
- misturado / separado
- equilibrado / desequilibrado
- evasivo / íntimo
- responde bem / não responde bem
- grande extensão dinâmica / curta extensão dinâmica
- definido / indefinido
- claro / confuso

Toda essa variedade de impressões foi propiciada por uma escolha bem diversificada do repertório utilizado na audição das salas, indo de Bach a Stravinsky, na tentativa de explorar ao máximo as potencialidades acústicas do ambiente.

Hawkes também investigou as variações acústicas em diferentes posições dentro de uma mesma sala (*Royal Festival Hall*) e em diferentes salas. Esse estudo permitiria que se chegasse a conclusões sobre a relação entre os efeitos subjetivos e as características físicas das salas. O primeiro estudo, comparando resultados entre diferentes posições, possibilitava que todas as respostas do júri pudessem ser obtidas durante um mesmo concerto, enquanto

que analisar resultados de diferentes salas propiciava maior diversificação das qualidades a serem comparadas. Procedimentos experimentais realizados durante concertos têm a desvantagem de sofrer certas limitações técnicas, mas a vantagem óbvia é que uma situação real jamais pode ser simulada perfeitamente em laboratório.

No *Royal Festival Hall*, várias posições foram selecionadas, distribuídas igualmente pelo auditório cada uma delas consistindo num bloco de 4 ouvintes. Ao júri foi solicitado que qualificassem a acústica segundo os critérios citados, tanto durante quanto depois da audição. Como era de se esperar, alguns parâmetros variaram bastante conforme a posição. A definição decrescia conforme aumentava a distância entre o ouvinte e a orquestra, entretanto a reverberação, no caso da sala mencionada, foi razoavelmente constante para todas as posições. Outros parâmetros como intimismo e equilíbrio também apresentaram considerável variação.

O efeito do tamanho e da forma da sala sobre as considerações subjetivas foi investigado mediante a comparação de resultados entre as diferentes salas. As outras três salas avaliadas foram *Queen Elizabeth Hall*, *Swiss Cottage Odeon* e *Fairfield Hall*. Quatro posições foram escolhidas em cada sala, com quatro ouvintes para cada posição, durante quatro concertos, assim 16 ouvintes assistiram a 16 concertos. Primeiramente, as observações de cada sala foram analisadas separadamente. Os quatro conjuntos obtidos apresentaram suficiente semelhança para justificar a conjunção dos dados e a extração de um conjunto comum de fatores classificatórios. Os seis parâmetros que se mostraram estatisticamente mais relevantes foram: reverberação, intimismo, equilíbrio, nível de som, brilho e definição ou clareza.

Para a comparação entre diferentes salas, um mesmo tipo de repertório foi escolhido para cada circuito de avaliação subjetiva do júri, ou seja, as salas eram avaliadas na execução de peças clássicas, posteriormente peças românticas, etc. Tal procedimento é justificável pelo fato de que a percepção de parâmetros como “clareza” ao se ouvir uma sinfonia de Haydn, pode ser experimentada de maneira bastante diferente na audição de uma sinfonia de Mahler, por exemplo.

Outros pesquisadores como Wilkens (1974) e Barron (1988) também utilizaram questionários semelhantes para a avaliação subjetiva:

	1	2	3	4	5	6	
1 small	---	---	---	---	---	---	large
2 pleasant	---	---	---	---	---	---	unpleasant
3 unclear	---	---	---	---	---	---	clear
4 soft	---	---	---	---	---	---	hard
5 brilliant	---	---	---	---	---	---	dull
6 rounded	---	---	---	---	---	---	pointed
7 vigorous	---	---	---	---	---	---	muted
8 appealing	---	---	---	---	---	---	unappealing
9 blunt	---	---	---	---	---	---	sharp
10 diffuse	---	---	---	---	---	---	concentrated
11 overbearing	---	---	---	---	---	---	reticent
12 light	---	---	---	---	---	---	dark
13 muddy	---	---	---	---	---	---	clear
14 dry	---	---	---	---	---	---	reverberant
15 weak	---	---	---	---	---	---	strong
16 emphasised treble	---	---	---	---	---	---	treble not emphasised
17 emphasised bass	---	---	---	---	---	---	bass not emphasised
18 beautiful	---	---	---	---	---	---	ugly
19 soft	---	---	---	---	---	---	loud
Name:	Date:					Item no.:	

CLARITY	Muddy			Clear			
REVERBERANCE	Dead			Live			
ENVELOPMENT	Expansive			Constricted			
INTIMACY	Remote			Intimate			
LOUDNESS	Loud			Quiet			
BALANCE:							
	Weak		Loud				
Treble re. mid-frequencies							
Bass re. mid-frequencies							
Singers/Soloists re. orchestra							
BACKGROUND NOISE:							
	Inaudible	Acceptable	Tolerable	Intolerable			
OVERALL IMPRESSION:							
	Very poor	Poor	Mediocre	Reasonable	Good	Very good	Excellent
N.B.: scale extremes refer to experience limits							

Figura 1.3.2.3.3: Questionários usados por Wilkens (acima) e Barron (abaixo)

Diversos resultados sobre análise subjetiva foram publicados nos últimos trinta anos (Schroeder, 1974; Cremer 1978; Ando, 1979; Chian, 1999; etc.). As análises variavam conforme o tipo de exposição (em laboratórios, ou na salas de concerto) e a metodologia estatística empregada para a interpretação dos resultados. De um modo geral, os pesquisadores encontraram coeficientes de correlação satisfatórios entre os parâmetros subjetivos e objetivos tidos como mais importantes, alguns dos quais vamos analisar nos próximos capítulos.

Figura 1.3.2.3.4: Vienna Musikvereinssaal – tida por muitos como a melhor sala de concertos do mundo

2 Fundamentos teóricos

Nesta seção apresentaremos as bases teóricas para a obtenção da resposta impulsiva de salas e para o processamento dos parâmetros acústicos.

Vamos iniciar com alguns breves comentários sobre sistemas lineares e seguiremos o curso cronológico das teorias. Discutiremos o método de Schroeder para a obtenção da curva de decaimento sonoro, e as técnicas de obtenção de resposta impulsiva através de MLS e de varredura de senos.

Para a compreensão desse capítulo é necessário que o leitor esteja familiarizado com os conceitos básicos de física dos processos estocásticos.

2.1 Resposta impulsiva em sistemas lineares

Um sistema linear apresenta duas importantes propriedades: proporcionalidade e aditividade. A primeira garante que, para um dado estímulo, o sistema responderá sempre de maneira proporcional, e a segunda garante o princípio da superposição. Segundo esse princípio, se introduzirmos no sistema um sinal de excitação que é a soma de vários sinais, o sinal de resposta obtido é igual à soma das respostas que seriam obtidas se as excitações fossem introduzidas isoladamente. Verifica-se também que o sinal de resposta só tem energia nas mesmas frequências do sinal de excitação.

Os fenômenos acústicos dentro de uma sala de música comportam-se como um sistema linear. Uma das principais características de um sistema linear é sua resposta impulsiva, isto é, a reação do sistema a um estímulo impulsivo.

Figura 2.1.1: Esquema de resposta impulsiva de um sistema linear

Ao excitarmos uma sala com um estímulo impulsivo, um tiro de pistola por exemplo, o sinal captado por um microfone é a resposta impulsiva do sistema. A resposta impulsiva pode ser entendida como um histórico da pressão acústica entre dois pontos: o de excitação e o de captação.

Quando um som é produzido no interior de um ambiente contornado por paredes ou contendo obstáculos, as ondas sonoras se espalham num padrão difuso de reflexões. A maneira como essas ondas interagem com a superfície e como elas se distribuem pelo espaço estará marcada na resposta impulsiva da sala. A Transformada de Fourier da resposta impulsiva é a resposta em frequência, ou função de transferência.

Vamos imaginar não um só impulso, mas uma seqüência de impulsos sendo produzidos dentro de uma sala. Como se trata de um sistema linear, a resposta da sala será a soma ao longo do tempo de cada uma das respostas causadas por cada um dos impulsos.

Vamos considerar agora que esses impulsos estejam infinitamente próximos. Essa situação é equivalente à de um som contínuo sendo produzido como estímulo à sala. O sinal resultante captado em determinado ponto será dado por:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_0^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (2.1.1)$$

sendo que $x(t)$ é o sinal gerado, $y(t)$ é o sinal captado e $h(t)$ é a resposta impulsiva do sistema.

A equação acima é um conhecido resultado da física de processos estocásticos e enuncia que o sinal resultante de um sistema linear é dado pela convolução entre o sinal de estímulo e a resposta impulsiva do sistema.

No domínio das frequências, um resultado equivalente à equação (2.1.1) é dado por:

$$Y(w) = X(w).H(w) \quad (2.1.2)$$

Onde $Y(w)$, $X(w)$ e $H(w)$ são as Transformadas de Fourier (também conhecidas como *funções de transferência*) do sinal captado, do sinal gerado e da resposta impulsiva, respectivamente.

Um sistema físico é chamado *invariante no tempo*, se suas variáveis físicas (temperatura, pressão, umidade, etc.) permanecerem constantes ao longo do tempo. Nesse caso, a resposta $h(t)$ do sistema será a mesma para qualquer instante.

2.2 O Método de Schroeder

Em 1965, Manfred Schroeder estabeleceu um novo paradigma na obtenção do tempo de reverberação. Até aquela época, as técnicas de medição do tempo de reverberação sofriam com a natureza aleatória do decaimento da pressão acústica. Eram necessárias cansativas horas de trabalho para captação de várias curvas de decaimento, bastante diferentes entre si, para a partir daí calcular-se a média chegando-se assim a um resultado estatístico para o decaimento.

Em seu artigo, Schroeder comenta tais dificuldades apontando a falta de precisão, o excesso de trabalho e a impossibilidade de uma interpretação detalhada como os principais obstáculos para o desenvolvimento dessa área da acústica.

Baseado na física de processos estocásticos, Schroeder propõe um método capaz de obter, com uma só medição em determinado ponto, um resultado equivalente à média conjunta de 'n' medições naquele ponto. As vantagens imediatas desse método consistem num notável aumento da precisão das curvas de decaimento, permitindo assim interpretações mais confiáveis, além é claro de uma redução drástica do volume de trabalho.

O método considera a utilização de um ruído branco $r(t)$ com espectro plano de energia. Este sinal deve excitar a sala até que se chegue a uma situação estacionária após a qual o sinal é abruptamente desligado. O som remanescente deve-se exclusivamente à reverberação na sala.

O sinal captado na sala é resultado, ao longo de toda a excitação, da convolução entre o sinal gerado e a resposta impulsiva do sistema (sala + aparelhos de reprodução e gravação). O momento em que o sinal de excitação é desligado é tomado como o instante

zero, a partir do qual a integral de convolução se anula, já que o sinal de excitação que está no seu integrando também se anula:

$$h(t) = \int_{-\infty}^0 r(z)g(t-z)dz \quad (2.2.1)$$

Na integral acima, $h(t)$ é o sinal resultante captado na sala, $r(t)$ é o sinal de excitação e $g(t)$ é a resposta impulsiva do sistema. A indicação de menos infinito no limite inferior de integração quer dizer apenas que a integral está sendo tomada desde um instante bastante anterior ao desligamento do sinal. Na prática esse instante corresponde a alguns segundos.

Fazendo uma troca de variáveis,

$$t - z = x \quad dz = -dx \quad z = 0, x = t \quad z \rightarrow -\infty, x \rightarrow \infty$$

chegamos a:

$$h(t) = \int_t^{\infty} g(x)r(t-x)dx \quad (2.2.2)$$

Vamos utilizar agora o conceito de *média conjunta* que é definido como a função de auto-correlação de uma variável aleatória $f(t)$ tomada em dois instantes:

$$\langle f(t_1).f(t_2) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f^k(t_1)f^k(t_2) \quad (2.2.3)$$

A média conjunta é obtida somando-se o produto $f(t_1)f(t_2)$ tomado n vezes e dividindo-se pelo próprio valor n . A auto-correlação, à qual a média conjunta está associada, é uma medida de quanto uma função se preserva no tempo. Quando a função é bastante aleatória, a auto-correlação tende a zero para dois diferentes instantes.

Elevando $h(t)$ ao quadrado,

$$h^2(t) = \int_t^{\infty} g(x)r(t-x)dx \int_t^{\infty} g(y)r(t-y)dy \quad (2.2.4)$$

e aplicando a média temos:

$$\langle h^2(t) \rangle = \left\langle \int_t^\infty g(x)r(t-x)dx \int_t^\infty g(y)r(t-y)dy \right\rangle = \int_t^\infty g(x)dx \int_t^\infty g(y)dy \langle r(t-x)r(t-y) \rangle \quad (2.2.5)$$

A média conjunta recai apenas sobre o sinal aleatório de excitação, pois a resposta impulsiva não é uma variável aleatória, mas sim uma função característica definida da sala, isto é, se não houver mudança na forma ou no tamanho da sala, no revestimento acústico, ou nas variáveis físicas, então a resposta impulsiva também não mudará o seu comportamento nas diversas tomadas. Sendo assim, a resposta impulsiva não é afetada pelo operador de média conjunta.

O termo

$$\langle r(t-x)r(t-y) \rangle$$

é a auto-correlação de um ruído branco tomada nos instantes $(t-x)$ e $(t-y)$.

Um sinal de ruído branco é extremamente aleatório e sua auto-correlação é zero a menos que os instantes sejam iguais (em $x = y$). O delta de Dirac expressa perfeitamente essa característica:

$$\langle r(t-x)r(t-y) \rangle = \delta(x-y) \quad (2.2.6)$$

Uma maneira mais rigorosa de se chegar a esse resultado é recorrendo ao *Teorema de Wiener – Khintchine*, segundo o qual a função de auto-correlação é a Transformada de Fourier da função densidade espectral de energia, e vice-versa.

O sinal de ruído branco apresenta espectro de energia constante, e a Transformada de Fourier de uma função constante é o delta de Dirac, portanto segundo o teorema, a auto-correlação de um ruído branco é um delta de Dirac.

Fazendo a substituição na equação (2.2.5) temos:

$$\langle h^2(t) \rangle = \int_t^\infty g(x)dx \int_t^\infty g(y)\delta(x-y)dy \quad (2.2.7)$$

Recordando a propriedade da função delta de Dirac:

$$\int_t^{\infty} g(y)\delta(x-y)dy = g(x) \quad (2.2.8)$$

chegamos a:

$$\langle h^2(t) \rangle = \int_t^{t_{\infty}} g^2(x)dx \quad (2.2.9)$$

Esse resultado é conhecido como o *Método do Impulso Integrado* e através dele podemos calcular a média de $h^2(t)$ diretamente da integral da resposta impulsiva ao quadrado.

O nível sonoro em dB é dado por:

$$SPL(t) = 10 \log \left[\frac{P_e^2(t)}{P_{ref}^2} \right] \quad (2.2.10)$$

onde P_e é o valor efetivo da pressão acústica e P_{ref} é um valor de referência que pode ser, por exemplo, o limiar de audição ($20\mu Pa$).

Lembramos que a função $h(t)$ é propriamente uma medição de pressão acústica. Portanto, o nível SPL é obtido diretamente de $h^2(t)$, sendo que a referência para zero dB pode assumir o valor de $\langle h^2(0) \rangle$, que é a média de $h^2(t)$ calculada no instante inicial.

Tendo os valores da média de $h^2(t)$ para cada instante, teremos também os respectivos valores de SPL equivalentes aos que seriam obtidos a partir de n tomadas de decaimento. Logo, basta conhecermos a resposta impulsiva e será possível determinar com grande precisão o decaimento da energia acústica, e a partir dele o tempo de reverberação RT60, além dos demais parâmetros.

Figura 2.2.1: Em cima, as curvas de decaimento obtidas pelos métodos antigos, e em baixo, pelo método de Schroeder (retirado de Kuttruff, 1991)

2.3 Obtenção da Resposta Impulsiva

Como vimos na seção anterior, o método de Schroeder pressupõe que se conheça a resposta impulsiva da sala. Entretanto, até a década de 70, os métodos de obtenção da resposta impulsiva eram relativamente precários.

Uma das técnicas disponíveis consistia na captação da resposta da sala a um estímulo impulsivo produzido por um tiro de pistola. Uma outra técnica empregava um ruído branco para a excitação da sala e uma vez atingido o estado estacionário interrompia-se esse sinal de excitação e imediatamente iniciava-se a gravação da reverberação da sala.

Todas essas técnicas apresentavam as mesmas desvantagens: relação sinal/ruído freqüentemente insatisfatória, espectro energético de freqüências irregular e baixo grau de repetibilidade.

Em 1979, o mesmo Manfred Schroeder propõe uma técnica que buscava eliminar todas essas desvantagens. Em seu artigo, Schroeder sugere a utilização de seqüências MLS como sinal de excitação da sala. O MLS é tema de várias referências citadas na bibliografia. A seguir, vamos expor brevemente algumas de suas principais características.

2.3.1 Obtendo a resposta impulsiva através de MLS

O sinal MLS (*Maximum Length Sequence*) é uma seqüência periódica de pulsos unitários (positivos e negativos) construída sistematicamente para satisfazer algumas propriedades que serão aqui analisadas. Apesar de suas características determinísticas, o sinal de MLS soa como um ruído branco, sendo chamado sinal pseudo-aleatório.

Figura 2.3.1.1: Um período de seqüência MLS

O comprimento de uma seqüência MLS é dado por:

$$N = 2^p - 1 \quad (2.3.1.1)$$

sendo p inteiro e positivo.

A seguir temos um exemplo de uma pequena seqüência ($p = 3$):

$$-1, +1, +1, -1, +1, -1, -1$$

Observamos que a somatória dos termos é igual a -1, fato constante em todo período de seqüência MLS.

Uma das mais importantes propriedades de MLS diz respeito à sua auto-correlação.

No domínio discreto, a auto-correlação é dada por:

$$R_{aa}(l) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a(k)a(k+l) \quad (2.3.1.2)$$

sendo N o número de termos da sequência e ‘a’ o valor de cada termo da sequência.

Utilizando o exemplo anterior da curta sequência de sete termos, é fácil verificar que:

$$l=0, \quad R_{aa}(l) = 1 \quad (2.3.1.3)$$

$$l \neq 0, \quad R_{aa}(l) = -\frac{1}{N}$$

Para N bastante grande, a auto-correlação praticamente se anula quando l é diferente de zero e permanece igual a um quando l é igual a zero. Normalmente empregam-se valores de N da ordem de 10^4 ou maiores.

Logo, a auto-correlação da sequência MLS é representada por um delta de Dirac.

A seguir, mostramos o gráfico da auto-correlação de uma sequência MLS gerada em MatLab:

Figura 2.3.1.2: Auto-correlação de uma sequência MLS

Vale notar que essa propriedade satisfaz a equação (2.2.6), tornando o MLS propício para ser utilizado em combinação com o método de Schroeder. Segundo o já mencionado *Teorema de Wiener – Khintchine*, concluímos também que a densidade espectral de energia do MLS é constante.

Vamos provar a seguir que a resposta impulsiva da sala pode ser obtida efetuando-se a correlação cruzada entre o sinal captado na sala e o sinal MLS gerado.

Recorrendo mais uma vez à teoria de sinais temos que, para um sistema linear a correlação cruzada entre o sinal gerado $x(t)$ e sinal captado $y(t)$ está vinculada à auto-correlação do sinal $x(t)$ através de uma convolução com a resposta impulsiva:

$$R_{xy}(t) = h(t) * R_{xx}(t) \quad (2.3.1.4)$$

No entanto, como já vimos, a auto-correlação do sinal $x(t)$ (MLS) gerado é um delta de Dirac:

$$R_{xx}(t) = \delta(t) \quad (2.3.1.5)$$

Ficamos então com:

$$R_{xy}(t) = h(t) * \delta(t) \quad (2.3.1.6)$$

A propriedade de convolução da Transformada de Fourier diz que:

$$\mathfrak{F}\{p(t) * q(t)\} = P(w).Q(w) \quad (2.3.1.7)$$

Ou seja, convolver no domínio do tempo é o mesmo que multiplicar no domínio da frequência. Entretanto, a transformada de Fourier de um delta de Dirac é igual a 1, portanto o delta de Dirac é neutro para a operação de convolução. Isso quer dizer que, para uma função $f(x)$ qualquer:

$$f(x) * \delta(x) = f(x) \quad (2.3.1.8)$$

Sendo assim:

$$R_{xy}(t) = h(t) * \delta(t) = h(t) \quad (2.3.1.9)$$

Conforme queríamos demonstrar, a equação anterior comprova que a correlação cruzada entre o sinal MLS gerado e o sinal captado na sala é a própria resposta impulsiva que se desejava obter.

A operação de correlação cruzada entre MLS e sinal captado garante que, com a repetição de vários ciclos periódicos de MLS, o valor da correlação entre o sinal gerado e o captado seja muito maior do que a correlação entre o sinal gerado e o ruído aleatório presente na sala. Com isso, a relação sinal/ ruído através de MLS é muito maior do que a das técnicas antigas de obtenção da resposta impulsiva.

O algoritmo de processamento da correlação cruzada entre MLS e sinal captado foi otimizado pela introdução da FHT, ou *Transformada Rápida de Hadamard* (Chu, 1990; Sampaio, 1998).

Em suma, a obtenção de resposta impulsiva através de MLS garante um espectro aproximadamente plano de energia, um ótimo grau de repetibilidade e uma relação sinal ruído satisfatória.

Convém lembrar que as algumas equações através das quais deduzimos as aplicações de MLS só são válidas para sistemas lineares invariantes no tempo. Caso essas condições não sejam cumpridas, poderão surgir algumas ineficiências no uso dessa técnica.

2.3.2 Obtenção da resposta impulsiva através de varredura de senos (*sweep sine*)

A partir da década de 60, o avanço na capacidade e na velocidade de processamento de dados permitiu que fossem criados novos algoritmos de aplicação de teorias matemáticas conhecidas há bastante tempo.

Um desses algoritmos, criado em 1965, é a *Transformada Rápida de Fourier* (FFT) que tem por mérito o grande aumento na agilidade de processamento da Transformada Discreta de Fourier.

A acústica de salas lucrou bastante com esses progressos tecnológicos, graças aos quais a obtenção de resposta impulsiva através de varredura de senos pode ser hoje facilmente processada em um computador pessoal.

As varreduras são senóides que têm sua frequência variando no tempo. Tal variação pode ser linear ou logarítmica:

Figura 2.3.2.1: Varreduras linear e logarítmica

A varredura linear é chamada por alguns cientistas de “*time stretched pulse*”, que pode ser traduzido por “*impulso espalhado no tempo*”, uma vez que sua densidade espectral de energia é constante, como a de um impulso. Sua frequência aumenta a uma taxa constante por unidade de tempo.

$$\frac{f_2 - f_1}{T_2 - T_1} = cte \quad (2.3.2.1)$$

A varredura logarítmica possui um espectro rosa, ou seja, sua amplitude decai 3dB/oitava. Isto significa que cada oitava do sinal possui a mesma energia. A frequência dobra de valor numa taxa fixa de unidade de tempo.

$$\frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T_2 - T_1} = cte \quad (2.3.2.2)$$

Uma varredura linear tem um valor fixo adicionado à sua fase:

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin(\varphi) \\ \varphi_{i+1} &= \varphi_i + \Delta\varphi + Inc\varphi \end{aligned} \quad (2.3.2.3)$$

Já a varredura logarítmica é gerada multiplicando-se o incremento de fase por um fator fixo:

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin(\varphi) \\ \varphi_{i+1} &= \varphi_i + \Delta\varphi \cdot Mul\varphi \end{aligned} \quad (2.3.2.4)$$

O valor de φ_i para a primeira amostra é zero, enquanto que o valor inicial de $\Delta\varphi$ corresponde ao valor desejado de frequência inicial da varredura:

$$\Delta\varphi_{inicial} = 2\pi \frac{f_{inicial}}{f} \quad (2.3.2.5)$$

O fator $Inc\varphi$ usado na varredura linear depende das frequências inicial e final do sinal, da taxa de amostragem f_s e do número de amostras a serem geradas N :

$$Inc\varphi = 2\pi \frac{f_{final} - f_{inicial}}{f_s \cdot N} \quad (2.3.2.6)$$

Para a varredura logarítmica, o fator $Mul\varphi$ é calculado por:

$$Mul\varphi = 2^{\frac{\log_2(f_{final} - f_{inicial})}{N}} \quad (2.3.2.7)$$

Figura 2.3.2.2: Espectrograma de uma varredura logarítmica

Para obtermos a resposta impulsiva basta aplicarmos a Eq. (2.1.2), como segue:

$$Y(w) = X(w) \cdot [G(w) \cdot L(w)] \quad (2.3.2.8)$$

Na equação acima, $Y(w)$ é a função de transferência do sinal captado na sala, $X(w)$ é a função de transferência do sinal emitido (varredura), $G(w)$ e $L(w)$ são as funções de transferência da sala e do alto-falante, respectivamente. A técnica de sweep nos dá a vantagem de poder eliminar a influência do alto-falante (L) na resposta final da sala (G), a qual de fato nos interessa, mediante uma simples operação de divisão no domínio da frequência (deconvolução no domínio do tempo):

$$G(w) = \frac{Y(w)}{X(w)L(w)} \quad (2.3.2.9)$$

Essa possibilidade de eliminar as influências externas à resposta impulsiva da sala coloca a técnica de varredura em vantagem com relação à técnica de MLS. Um outro ponto a favor da técnica de varredura é que ela é bem menos sensível às variações temporais do sistema, além de permitir que se visualize as eventuais distorções harmônicas produzidas pelo circuito eletrônico ou pelos alto-falantes.

3 Metodologia Experimental

3.1 Circuito de Medição

O esquema a seguir mostra o fluxo dos sinais nas medições:

Figura 3.1.1: Esquema de medição

Utilizamos um laptop, uma interface de áudio *Edirol Fa-101*, os microfones *Behringer ECM 8000* e *Neumann U-87*, e os alto-falantes amplificados *EV Sx200a*.

Figura 3.1.2: Resposta em frequência e direcional do microfone Behringer ECM 8000

Tanto o microfone quanto a placa de áudio apresentam resposta plana dentro da faixa de frequência (125 Hz – 4K Hz) considerada no processamento dos parâmetros acústicos, desta forma a interferência deles no processamento é mínima. Quanto ao alto-falante, implementamos um filtro inverso baseado na resposta impulsiva obtida em campo livre, minimizando assim a sua influência, como será descrito mais adiante.

O laptop é conectado via *fireware* à interface de áudio. O sinal gerado é transmitido por uma das saídas da interface e vai para os dispositivos de alto-falante. Outra saída conduz o mesmo sinal para um dos canais de entrada da interface. Este sinal serve de referência sincronizada ao sinal do microfone que chega à interface por um outro canal de entrada. Assim, o sinal de referência que irá para a deconvolução já carrega a influência dos circuitos elétricos mediantes, de tal forma que a resposta impulsiva obtida fica livre da influência daqueles circuitos.

Um exemplo de gravação dos sinais que chegam aos canais de entrada 1 (captado) e 2 (original) da interface é mostrado a seguir:

Figura 3.1.3: Varredura (esq) e MLS (dir), sinal original (em baixo) e sinal captado (em cima)

3.2 Algoritmos de Processamento

Todos os processamento de sinais foram feitos através do MatLab. O Matlab (de MATrix LABoratory) é um programa produzido pela *The Mathworks, Inc.* que trata matrizes e números complexos da mesma forma que uma calculadora trata números reais. Esse *software* também possui recursos de programação, agindo como uma linguagem interpretada, semelhante a C ou Pascal, porém voltada para processamento numérico intensivo.

Além das funções já contidas no MatLab, outras funções específicas para o nosso trabalho foram criadas pelo colega Bruno Masiero, da Escola Politécnica da USP, como parte de seu trabalho (Masiero, 2004) dentro do Projeto Temático ACMUS.

O algoritmo de processamento pode ser sintetizado como segue:

- Geração dos sinais MLS ou varredura
- Conversão dos sinais para o formato *wave*
- Execução e gravação dos sinais através de um editor de áudio
- Conversão dos sinais gravados para o formato MatLab
- Obtenção da resposta impulsiva
- Processamento dos parâmetros acústicos

O primeiro passo dentro do algoritmo por nós utilizado, é a geração dos sinais MLS e varredura. O sinal MLS é gerado juntamente com os vetores que alimentarão a FHT no processo de obtenção da resposta impulsiva, e permite a escolha do número de seqüências que se quer utilizar. Como vimos no capítulo anterior, quanto maior o número de ciclos

seguidos gerados, melhor a relação sinal/ ruído. Em nossa pesquisa padronizamos o número de vinte ciclos.

O sinal de varredura é gerado por uma função no MatLab (*chirp.m*) para a qual entramos com as variáveis de frequência inicial, frequência final e intervalo de tempo que se quer levar de uma a outra. O sinal de varredura que utilizamos é logarítmico e vai de 20Hz a 20 KHz em 6 segundos.

Já dispondo dos sinais MLS e varredura gerados em MatLab, convertemo-los para o formato *wave* de modo que possam ser tocados por um *software* de edição de áudio. Esse passo é feito através da função *wavwrite* no MatLab.

Passamos então a trabalhar no editor de áudio, através do qual executamos o sinal gerado (MLS ou varredura) ao mesmo tempo que gravamos o sinal captado pelo microfone em algum ponto da sala. Como resultado, temos um arquivo de áudio em dois canais, sendo que no canal 1 está o sinal que veio do microfone e no canal 2 está a referência sincronizada que partiu da própria placa, como já explicamos na seção 3.1.

Convertemos esse arquivo em dois canais para o formato MatLab através da função *wavread*. A partir dele obtemos a resposta impulsiva.

Se o sinal gerado foi a varredura, aplicamos uma deconvolução via FFT:

```
function ir = dechirp(gravacao,B,A,n)
ir = real(ifft(fft(gravacao(:,1),n)./fft(gravacao(:,2),n))));
ir = filter(B,A,ir);
```

A sintaxe acima é linguagem computacional baseada na fórmula já vista de deconvolução:

$$G(w) = \frac{Y(w)}{X(w)}$$

Na equação anterior, $Y(w)$ é a função de transferência do sinal captado, $X(w)$ é a função de transferência do sinal emitido, e $G(w)$ é a transformada de Fourier da resposta impulsiva da sala. Em outras palavras, fazemos a FFT do sinal captado, dividimos pela FFT do sinal emitido e calculamos a FFT inversa (IFFT) desse quociente, obtendo assim a resposta impulsiva.

Os vetores A e B dizem respeito aos filtros de oitava implementados segundo a norma IEC 1260.

Se o sinal gerado foi o MLS, utilizamos a implementação da FHT para a obtenção da resposta impulsiva (Masiero, 2004).

A seguir, um exemplo de resposta impulsiva:

Figura 3.2.1: Exemplo de resposta impulsiva

Os traços finos de grande amplitude representam a chegada das frentes de onda sonora, sendo que o primeiro e maior é o som direto, o segundo é a primeira reflexão, e os demais são as outras reflexões.

O eixo x é dado em amostras, sendo que a frequência de amostragem que utilizamos foi sempre de 44100Hz. O eixo y representa a pressão acústica, porém os valores absolutos desse eixo no gráfico acima são resultados de diversas fases de conversões (microfone - editor de áudio – MatLab) e tais valores absolutos não têm significado físico. Esse fato é irrelevante pois todos os parâmetros medidos e analisados em nossa pesquisa têm caráter relativo e dependem apenas da forma de onda e do comportamento temporal da resposta impulsiva. Os parâmetro RT60 e EDT indicam o intervalo de tempo de decaimento e não dependem dos valores absolutos das amplitudes da resposta impulsiva. Os parâmetros C80, D50, RDR e LFC são razões de energia tomadas ao longo do tempo e também não

dependem dos valores absolutos das amplitudes. O parâmetro ITDG depende apenas do instante da captação do som direto e do instante da chegada da primeira reflexão.

Portanto, para que apresentem os mesmos valores dos parâmetros acústicos citados, basta que as respostas impulsivas guardem relações constantes de semelhança ou proporcionalidade.

A curva de decaimento de energia é obtida a partir da resposta impulsiva da sala pelo método da Integração de Schroeder:

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau$$

Na equação acima, 'p' é a resposta impulsiva.

A partir da manipulação desta integral podemos obter a maior parte dos parâmetros acústicos. A seguir, exibimos exemplos gráficos do processamento em MatLab dessa integral, referentes a medições que realizamos em auditórios. O ponto amarelo no gráfico de decaimento representa o instante de truncamento obtido pela técnica de Lundeby (Masiero, 2004). Esse truncamento indica o instante em que o processamento reconhece que o nível sonoro da sala voltou ao patamar do ruído de fundo após uma excitação impulsiva.

Figura 3.2.2: Exemplo de curva de Schroeder

Figura 3.2.3: Exemplo de curva de decaimento sonoro

Observamos que o decaimento segue uma linha reta descendente na escala do eixo y em dB (logarítmica), o que equivale a um decaimento exponencial numa escala linear.

A função implementada (Masiero, 2004) para a obtenção dos parâmetros obtém valores discriminados em faixas de oitava relativos àqueles parâmetros indicados na norma ISO 3382, conforme o exemplo a seguir:

Tabela 3.2.1: Exemplo de parâmetros calculados e discriminados em bandas de frequências.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-0,580	-7,330	-1,950	-0,080	6,220	9,100	9,480
C80	[dB]	0,740	-5,820	0,300	1,250	7,140	9,730	10,650
D50	[%]	46,650	15,610	38,950	49,510	80,720	89,040	89,890
D80	[%]	54,230	20,730	51,750	57,150	83,830	90,380	92,080
CT	[ms]	121,320	194,360	112,820	94,730	31,930	18,040	14,450
EDT	[s]	2,322	2,181	1,655	1,377	1,422	1,367	1,277
T20	[s]	2,932	2,189	1,749	1,531	1,414	1,296	1,060
T30	[s]	2,954	2,267	1,639	1,532	1,460	1,315	1,088
T40	[s]	2,963	2,437	1,650	1,562	1,475	1,341	1,107

Os valores T20, T30 e T40 são os RT60 calculados a partir de uma extrapolação linear tomada nos primeiros 20 dB, 30dB ou 40dB de decaimento, respectivamente. O parâmetro CT (*center time*) pode ser entendido, fazendo-se uma analogia com a Mecânica, como o ‘centro de gravidade’ da resposta impulsiva, e seu valor é uma indicação do estado de concentração da resposta impulsiva ao longo do eixo temporal.

Os demais parâmetros calculados não estão discriminados em bandas de oitava. Os parâmetros BR e TR são calculados a partir da média entre T20, T30 e T40.

O parâmetro ITDG é calculado através da observação direta de cada resposta impulsiva:

Figura 3.2.4: Aferindo o ITDG

No caso o anterior o eixo x é dado em segundos.

O parâmetro RDR é calculado tendo como referência o respectivo valor de ITDG, como podemos observar na sintaxe de sua função criada em MatLab:

```
function [ITDG,L,R] = ratios(ir,Fs,ponto1,ponto2,fim)

ITDG = (ponto2-ponto1)/Fs;

L = 10*log10(sum(ir(ponto1:ponto2).^2)/sum(ir(ponto2:(Fs*fim)).^2));

R = sum(ir(ponto1:ponto2).^2)/sum(ir(ponto1:(Fs*fim)).^2);
```

Sendo que 'ir' é a resposta impulsiva em questão, 'Fs' é frequência de amostragem, 'ponto1' é o instante de captação do som direto (em amostras), 'ponto 2' é o instante de

captação da primeira reflexão (em amostras) e ‘fim’ é o ponto de truncamento de Lundeby. O valor ‘L’ é a razão logarítmica da energia direta pela energia reverberante, sendo dado em dB; e o valor ‘R’ é a razão linear da energia direta pela energia total, e é dado em porcentagem.

O último parâmetro medido e analisado foi a fração lateral (LFC), conforme a seguinte sintaxe de sua função criada em MatLab:

```
function [A] = latfc(ir8,ir,Fs)
A= sum(ir8(round(5/1000*Fs):round(80/1000*Fs)).^2)/(sum(ir(1:round(80/1000*Fs)).^2));
```

A função acima expressa a razão entre a energia da resposta impulsiva captada com o microfone em figura 8 pela energia da resposta impulsiva captada com o microfone em modo omnidirecional, no mesmo ponto de captação, para os mesmos níveis de amplificação, nos primeiros 80 ms. É interessante comparar essas duas respostas impulsivas:

Figura 3.2.5: Resposta impulsiva captada com microfone em modo omnidirecional

Figura 3.2.6: Resposta impulsiva captada com microfone em figura 8

Em ambos os casos a chegada do som direto se dá na amostra de número 1500 e a primeira reflexão aproximadamente na amostra 1850.

No caso da resposta impulsiva captada pelo microfone em figura 8, o som direto frontal aparece bastante atenuado em relação à primeira reflexão, que nesse caso é evidentemente lateral. Isso era esperado já que o microfone figura 8 é bem menos sensível aos sons frontais que aos laterais.

Em nossa pesquisa utilizamos o microfone *Neumann U-87* que apresenta a opção de se empregar os dois modos direcionalidade.

3.3 Comparações Metodológicas

3.3.1 ACMUS x Aurora

O Aurora é um *plug-in*, pertencente ao *software Cool Edit* (ou *Adobe Audition*), desenvolvido pelo engenheiro Angelo Farina da Universidade de Parma, Itália. Esse *plug-in* realiza, entre outras coisas, o cálculo dos mesmos parâmetros acústicos que utilizamos em nossa pesquisa.

Tomamos algumas respostas impulsivas, processamos tanto no Aurora quanto através das implementações realizadas no ACMUS e comparamos os resultados.

Figura 3.3.1.1: Processamento da RI do balcão do Teatro São Pedro via Aurora

Tabela 3.3.1.1: Processamento da RI do balcão do Teatro São Pedro via ACMUS

freq	[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	1,980	1,860	3,420	2,420	3,110	3,060
C80	[dB]	3,660	3,650	4,780	4,140	4,720	5,350
D50	[%]	61,210	60,540	68,730	63,580	67,170	66,940
D80	[%]	69,890	69,840	75,030	72,170	74,780	77,400
CT	[ms]	72,060	61,500	50,530	54,420	50,120	47,330
EDT	[s]	1,108	0,913	1,073	1,069	1,117	1,088
T20	[s]	1,225	0,996	1,213	1,199	1,152	1,047
T30	[s]	1,333	1,156	1,207	1,169	1,165	1,061
T40	[s]	1,387	1,218	1,209	1,159	1,183	1,046

Figura 3.3.1.2: Processamento da RI da platéia central do Memorial via Aurora

Tabela 3.3.1.2: Processamento da RI da platéia central do Memorial via ACMUS

freq	[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	1,850	3,300	1,690	7,820	12,940	15,380
C80	[dB]	2,160	3,580	2,200	8,240	13,460	16,190
D50	[%]	60,510	68,150	59,620	85,810	95,170	97,190
D80	[%]	62,180	69,520	62,410	86,960	95,690	97,650
CT	[ms]	97,600	79,630	90,900	30,070	9,730	5,250
EDT	[s]	1,955	1,983	1,754	2,021	1,327	0,196
T20	[s]	1,666	1,987	1,906	1,570	1,215	1,094
T30	[s]	1,638	2,011	1,924	1,539	1,213	0,919
T40	[s]	1,686	1,992	1,950	1,606	1,202	0,925

Constatamos uma grande semelhança entre os valores obtidos pelo ACMUS e pelo Aurora, principalmente no que se refere a parâmetros importantes como RT60 (T30) e C80. Durante as implementações foram feitas comparações (Masiero, 2004) mais detalhadas entre os resultados que alcançamos no ACMUS e os resultados obtidos por outros *softwares*, quase sempre com um grau de semelhança satisfatório.

O grupo ACMUS está implementando (Ueda, 2005) uma interface gráfica operacional para *software* de uso aberto. O *software* ACMUS contempla as exigências de praticidade apresentando uma interface criada para satisfazer às necessidades de organização em todas as etapas: na preparação, durante a medição e posteriormente na obtenção dos resultados. As fases de geração, emissão, captação e processamento dos sinais oferecem ao usuário um leque de opções maleável e integrado. Os campos de entrada de dados foram constituídos com base nas carências que as experiências em situações reais indicaram, proporcionando assim rapidez e funcionalidade nos processos de medição.

3.3.2 MLS x varredura

Como vimos no capítulo anterior, os métodos de MLS e varredura (*sweep*) são essencialmente bastante diferentes, embora almejem o mesmo propósito que é o de obter a resposta impulsiva com uma boa relação sinal/ruído, bom grau de repetibilidade e resposta em frequência plana dentro da faixa a ser considerada para o cálculo dos parâmetros (125Hz a 4KHz).

A primeira questão é comparar as curvas de resposta impulsiva obtidas através de ambos os métodos:

Figura 3.3.2.1: Coerência entre respostas impulsivas obtidas por MLS e por varredura

A curva azul representa a resposta impulsiva obtida nos fundos da platéia central do Teatro São Pedro através do método de varredura, e a curva vermelha é a resposta impulsiva obtida no mesmo ponto através do método MLS. Com exceção de algumas diferenças na amplitude dos picos, as curvas são bastante semelhantes, tanto no que se refere aos instantes de chegada das reflexões quanto à forma das curvas ao longo do tempo.

As diferenças na amplitude dos picos se devem às características peculiares do processamento de cada método, e como já frisamos na seção 3.2, tais diferenças são irrelevantes para o processamento dos parâmetros acústicos que estamos medindo e analisando, uma vez que esses parâmetros dependem apenas da forma de onda e do comportamento temporal da resposta impulsiva.

O próximo passo é comparar os valores dos parâmetros acústicos obtidos através dos diferentes métodos. Para isso vamos aproveitar os resultados de algumas medições realizadas no Anfiteatro Camargo Guarnieri.

Tabela 3.3.2.1: Parâmetros da posição de maestro no Camargo Guarnieri via varredura.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50	[dB]	6,640	3,480	8,970	8,760	11,440	13,250	16,230	19,280
C80	[dB]	8,450	5,830	11,780	9,770	12,110	13,970	17,020	20,530
D50	[%]	82,190	69,000	88,740	88,260	93,310	95,480	97,670	98,830
D80	[%]	87,510	79,310	93,780	90,460	94,200	96,140	98,050	99,120
CT	[ms]	37,830	56,310	26,870	31,100	14,700	9,520	5,120	2,560
EDT	[s]	1,017	1,054	0,685	1,143	1,545	1,245	0,300	0,123
T20	[s]	1,074	1,187	1,053	1,299	1,245	1,279	1,172	0,918
T30	[s]	1,051	1,215	1,182	1,275	1,251	1,232	1,112	0,902
T40	[s]	1,158	1,231	1,151	1,260	1,278	1,254	1,108	0,869

Tabela 3.3.2.2: Parâmetros da posição de maestro no Camargo Guarnieri via MLS.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50	[dB]	4,560	2,590	10,010	9,160	11,390	13,230	16,290	19,560
C80	[dB]	6,820	5,070	11,930	9,820	12,030	13,920	17,100	20,860
D50	[%]	74,070	64,480	90,940	89,180	93,230	95,460	97,710	98,910
D80	[%]	82,780	76,270	93,970	90,570	94,100	96,110	98,090	99,190
CT	[ms]	50,480	62,790	19,610	24,280	14,660	9,530	5,030	2,350
EDT	[s]	1,087	1,045	0,783	1,273	1,540	1,235	0,306	0,093
T20	[s]	1,082	1,159	1,037	1,278	1,210	1,260	1,179	0,891
T30	[s]	1,034	1,020	1,082	1,220	1,152	1,166	1,103	0,886
T40	[s]	0,990	0,976	1,063	1,141	1,066	1,079	1,041	0,862

Gráfico 3.3.2.1

Gráfico 3.3.2.2

Gráfico 3.3.2.3

Tabela 3.3.2.3: Parâmetros da posição de violinos no Camargo Guarnieri via varredura.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50	[dB]	5,200	4,750	7,570	7,940	5,710	1,220	4,890	6,570
C80	[dB]	7,350	10,090	8,840	8,380	6,290	2,030	5,610	7,570
D50	[%]	76,810	74,940	85,120	86,150	78,850	56,970	75,520	81,930
D80	[%]	84,460	91,080	88,440	87,310	80,970	61,490	78,430	85,100
CT	[ms]	49,380	48,870	31,180	30,560	39,460	72,500	40,120	29,870
EDT	[s]	0,922	0,577	1,103	1,243	1,331	1,197	1,063	0,926
T20	[s]	0,953	0,914	1,066	1,256	1,247	1,201	1,042	0,854
T30	[s]	1,221	0,966	1,136	1,242	1,216	1,234	1,069	0,844
T40	[s]	1,202	1,052	1,114	1,249	1,257	1,287	1,075	0,820

Tabela 3.3.2.4: Parâmetros da posição de violinos no Camargo Guarnieri via MLS.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50	[dB]	5,490	7,380	7,640	7,960	5,770	1,360	5,000	6,780
C80	[dB]	7,370	9,910	8,740	8,360	6,370	2,060	5,690	7,790
D50	[%]	77,980	84,550	85,310	86,200	79,070	57,770	75,990	82,640
D80	[%]	84,530	90,740	88,210	87,280	81,250	61,640	78,740	85,740
CT	[ms]	47,730	42,310	31,060	31,270	38,900	71,590	39,580	29,410
EDT	[s]	0,918	0,590	1,131	1,231	1,337	1,205	1,060	0,898
T20	[s]	0,892	0,881	1,055	1,251	1,233	1,179	1,034	0,838
T30	[s]	0,850	0,915	1,082	1,178	1,138	1,113	1,039	0,853
T40	[s]	0,839	0,901	1,037	1,109	1,062	1,056	1,000	0,847

Gráfico 3.3.2.4

Gráfico 3.3.2.5

Gráfico 3.3.2.6

Tabela 3.3.2.5: Parâmetros na platéia central do Camargo Guarnieri via varredura

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50	[dB]	5,150	-3,280	0,630	1,570	6,540	8,190	10,520	13,330
C80	[dB]	8,520	3,250	4,060	3,400	7,260	8,950	11,180	14,270
D50	[%]	76,630	31,990	53,650	58,970	81,850	86,820	91,850	95,560
D80	[%]	87,660	67,860	71,800	68,620	84,170	88,710	92,920	96,400
CT	[ms]	40,120	73,540	74,990	72,700	35,950	25,250	14,950	7,580
EDT	[s]	0,974	0,867	1,268	1,096	1,318	1,346	1,451	0,964
T20	[s]	1,238	1,056	1,243	1,182	1,317	1,283	1,213	1,014
T30	[s]	1,142	1,044	1,229	1,266	1,273	1,280	1,135	0,919
T40	[s]	1,227	1,211	1,210	1,302	1,314	1,298	1,115	0,875

Tabela 3.3.2.6: Parâmetros na platéia do Camargo Guarnieri via MLS.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50	[dB]	3,290	2,580	3,190	3,140	6,530	7,960	10,460	13,670
C80	[dB]	5,110	6,780	5,220	5,080	7,280	8,730	11,130	14,640
D50	[%]	68,100	64,410	67,560	67,310	81,800	86,200	91,740	95,880
D80	[%]	76,430	82,660	76,900	76,300	84,230	88,190	92,850	96,680
CT	[ms]	58,900	59,720	58,430	53,740	35,680	26,040	15,060	7,100
EDT	[s]	1,002	0,859	1,338	1,130	1,301	1,337	1,452	0,885
T20	[s]	0,893	1,070	1,239	1,135	1,285	1,249	1,204	1,006
T30	[s]	0,796	0,948	1,172	1,092	1,173	1,180	1,116	0,931
T40	[s]	0,782	0,916	1,111	1,069	1,109	1,101	1,037	0,893

Gráfico 3.3.2.7

Gráfico 3.3.2.8

Gráfico 3.3.2.9

De uma forma geral os resultados obtidos por MLS e por varredura foram bastante semelhantes. Entretanto, o método MLS se mostrou mais sensível e mais irregular, sendo que nem sempre foi possível processar os parâmetros a partir de sua resposta impulsiva devido justamente a essas irregularidades.

Como vimos no capítulo 2 o método de MLS foi deduzido baseado em premissas de linearidade e de invariância temporal que nem sempre são conseguidas numa situação real de medição.

O método de varredura se mostrou bem mais estável e apresentou melhor relação sinal/ruído. Além disso, esse método oferece a oportunidade de eliminação das distorções harmônicas do alto-falante através de uma deconvolução por meio de seu filtro inverso (Müller, 2001).

3.3.3 Metodologia Estatística

Em cada posição de captação coletamos seis respostas impulsivas. Para chegarmos a uma tabela única de parâmetros referentes a cada posição tínhamos dois caminhos:

a) fazer no MatLab a média aritmética das respostas impulsivas e a partir desta resposta impulsiva média extrair os parâmetros

b) extrair os parâmetros de cada resposta impulsiva e fazer uma média aritmética dos parâmetros

A norma ISO 3382 aceita as duas maneiras.

O professor Angelo Farina, na ocasião do I Seminário Música Ciência e Tecnologia organizado pelo ACMUS em novembro de 2004, já havia nos aconselhado que, segundo sua própria experiência, a alternativa ‘a’ dava melhores resultados. Entretanto, decidimos fazer alguns cálculos seguindo os dois caminhos e comparamos os resultados.

Tabela 3.3.3.1: Média dos parâmetros obtidos na posição dos violinos no Camargo Guarnieri.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	5,467	5,657	7,010	7,923	5,707	1,213	4,877
C80	[dB]	7,573	10,113	8,680	8,370	6,280	2,030	5,600
D50	[%]	77,890	78,197	83,350	86,110	78,810	56,933	75,473
D80	[%]	85,103	91,130	88,067	87,300	80,953	61,477	78,407
CT	[ms]	47,393	46,587	36,123	30,597	39,500	72,560	40,203
EDT	[s]	0,920	0,577	1,045	1,243	1,331	1,198	1,063
T20	[s]	0,920	0,915	1,066	1,256	1,247	1,203	1,043
T30	[s]	1,140	0,966	1,137	1,242	1,217	1,235	1,071
T40	[s]	1,109	1,051	1,116	1,250	1,257	1,288	1,079

Tabela 3.3.3.2: Parâmetros da resposta impulsiva média na posição dos violinos no Camargo Guarnieri.

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	5,200	4,750	7,570	7,940	5,710	1,220	4,890
C80	[dB]	7,350	10,090	8,840	8,380	6,290	2,030	5,610
D50	[%]	76,810	74,940	85,120	86,150	78,850	56,970	75,520
D80	[%]	84,460	91,080	88,440	87,310	80,970	61,490	78,430
CT	[ms]	49,380	48,870	31,180	30,560	39,460	72,500	40,120
EDT	[s]	0,922	0,577	1,103	1,243	1,331	1,197	1,063
T20	[s]	0,953	0,914	1,066	1,256	1,247	1,201	1,042
T30	[s]	1,221	0,966	1,136	1,242	1,216	1,234	1,069
T40	[s]	1,202	1,052	1,114	1,249	1,257	1,287	1,075

Gráfico 3.3.3.1

Gráfico 3.3.3.2

Gráfico 3.3.3.3

Tabela 3.3.3.3: média dos parâmetros obtidos na posição do maestro no Camargo Guarnieri

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	14,370	7,237	9,347	9,020	11,080	13,213	16,177
C80	[dB]	16,057	9,287	12,123	10,033	11,963	13,937	16,977
D50	[%]	96,463	84,113	89,583	88,860	92,770	95,447	97,647
D80	[%]	97,557	89,470	94,223	90,973	94,020	96,117	98,033
CT	[ms]	12,063	30,270	25,177	29,660	23,630	9,590	5,173
EDT	[s]	0,250	0,872	0,676	1,131	1,091	1,239	0,301
T20	[s]	1,064	1,116	1,050	1,300	1,246	1,279	1,173
T30	[s]	1,022	1,150	1,180	1,276	1,251	1,234	1,115
T40	[s]	1,023	1,189	1,151	1,256	1,276	1,254	1,115

Tabela 3.3.3.4: parâmetros da resposta impulsiva média na posição de maestro no Camargo Guarnieri

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	6,640	3,480	8,970	8,760	11,440	13,250	16,230
C80	[dB]	8,450	5,830	11,780	9,770	12,110	13,970	17,020
D50	[%]	82,190	69,000	88,740	88,260	93,310	95,480	97,670
D80	[%]	87,510	79,310	93,780	90,460	94,200	96,140	98,050
CT	[ms]	37,830	56,310	26,870	31,100	14,700	9,520	5,120
EDT	[s]	1,017	1,054	0,685	1,143	1,545	1,245	0,300
T20	[s]	1,074	1,187	1,053	1,299	1,245	1,279	1,172
T30	[s]	1,051	1,215	1,182	1,275	1,251	1,232	1,112
T40	[s]	1,158	1,231	1,151	1,260	1,278	1,254	1,108

Gráfico 3.3.3.4

Gráfico 3.3.3.5

Gráfico 3.3.3.6

Tabela 3.3.3.5: Média dos parâmetros obtidos na platéia lateral do Camargo Guarnieri

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	3,777	0,693	2,490	1,940	5,347	5,613	8,010
C80	[dB]	5,300	4,187	4,320	4,313	6,183	6,200	8,660
D50	[%]	70,457	53,953	63,897	60,860	77,343	78,347	86,120
D80	[%]	77,203	72,310	72,983	72,930	80,543	80,550	87,810
CT	[ms]	66,117	66,817	60,337	65,483	43,583	43,007	26,313
EDT	[s]	1,149	0,880	1,017	1,162	1,349	1,411	1,380
T20	[s]	1,175	0,909	1,124	1,250	1,264	1,303	1,197
T30	[s]	1,150	1,035	1,137	1,262	1,271	1,247	1,151
T40	[s]	1,195	1,097	1,107	1,267	1,269	1,235	1,124

Tabela 3.3.3.6: Parâmetros da resposta impulsiva média na platéia lateral do Camargo Guarnieri

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	3,390	-0,660	2,950	2,570	5,420	5,670	8,160
C80	[dB]	4,920	3,350	4,560	4,600	6,240	6,240	8,790
D50	[%]	68,610	46,210	66,340	64,370	77,720	78,690	86,770
D80	[%]	75,660	68,360	74,080	74,260	80,820	80,810	88,320
CT	[ms]	71,320	74,300	54,500	59,450	43,080	42,310	25,140
EDT	[s]	1,140	0,884	1,017	1,167	1,346	1,406	1,384
T20	[s]	1,173	0,908	1,108	1,246	1,260	1,302	1,195
T30	[s]	1,158	1,038	1,116	1,258	1,269	1,244	1,146
T40	[s]	1,207	1,107	1,085	1,267	1,275	1,226	1,119

Gráfico 3.3.3.7

Gráfico 3.3.3.8

Gráfico 3.3.3.9

Constatamos que os dois caminhos levam aos mesmos resultados, ou seja, do ponto de vista estatístico eles se mostraram praticamente equivalentes.

Essa precisão estatística deve-se ao fato de que o método de integração de Schroeder, através do qual processamos todos os parâmetros, é uma técnica otimizada dentro da metodologia de processos estocásticos. Como já mostramos no capítulo 2, o cálculo dessa integração equivale à média conjunta dos decaimentos (Kuttuff, 1991), garantindo assim um comportamento estatístico bastante estável no cálculo dos parâmetros.

O cálculo dos parâmetros através da resposta impulsiva média permite uma grande economia de trabalho, por isso será o procedimento padrão para a obtenção dos resultados.

3.4 Sobre a fonte sonora utilizada

3.4.1 Quanto à direcionalidade

A norma ISO 3382 convencionou o uso de uma fonte sonora omnidirecional para o cálculo dos parâmetros acústicos. Na época em que realizamos os trabalhos de campo tal fonte não estava disponível, por isso utilizamos uma fonte direcional.

Conforme consta na literatura (Arruda, 2000) alguns parâmetros são mais sensíveis à direcionalidade da fonte. O parâmetro RT60 sofre pouca variação, mas o parâmetro C80 sofre uma variação maior.

Sabemos que as caixas acústicas se aproximam da omnidirecionalidade para baixas frequências (difusas), mas com o aumento da frequência elas se tornam gradativamente direcionais. Isso pode explicar os relativos altos valores de clareza em altas frequências (especulares) que observamos em nossos resultados, uma vez que nessa faixa a sala como um todo é bem menos excitada do que quando exposta à difusão de uma fonte omnidirecional. Assim, é de se esperar que em nosso caso o microfone capte menos energia reverberante em altas frequências, gerando valores maiores de C80.

O parâmetro RDR também é bastante sensível à direcionalidade da fonte uma vez que seu valor depende da energia de som direto. Sendo assim esse valor pode sofrer alterações conforme o ângulo entre microfone e a direção do alto-falante.

Em nossas medições tomamos o cuidado de sempre deixar alinhados o microfone e o alto-falante para evitar tais alterações. Quando fazíamos as captações em posições laterais, virávamos a fonte sonora em direção ao microfone. Entretanto, como experiência,

mantivemos a caixa reta (desalinhada com microfone) na posição de violinos no Camargo Guarnieri e de platéia lateral do São Pedro. Nesses casos constatamos uma considerável queda no valor de RDR, já que com esse procedimento induzimos uma diminuição da energia direta incidente.

O objetivo principal do nosso trabalho é o de aprofundar a caracterização e a compreensão dos parâmetros acústicos. Uma vez que utilizamos rigorosamente os mesmos equipamentos em todas as medições, é razoável esperar que as diferenças constatadas nos parâmetros medidos ou nas impressões subjetivas sejam causadas exclusivamente pelas diferenças na acústica das diversas salas. Assim, teremos informações suficientes para analisar a dinâmica dos parâmetros, que é o nosso principal interesse. Portanto, o uso de uma fonte direcional não chega a obstruir nossas metas.

3.4.2 Quanto à eliminação da influência da fonte

A literatura (Farina, 2000; Müller 2001) apresenta algumas técnicas para eliminar a influência da fonte nos processamentos, de modo que esta não afete a resposta impulsiva que se deseja aferir, isto é, a resposta impulsiva da sala.

Caso o método de aquisição da resposta impulsiva seja a varredura, é possível fazer a deconvolução dos sinais de modo a isolar a resposta impulsiva da sala. Para tanto, é preciso conhecer a resposta impulsiva da fonte utilizada. Conseguimos obter tal resposta através de medições em campo livre.

Figura 3.4.2.1: Fotografia das medições em campo livre (Praça do Relógio – USP)

Emitimos sinais de varredura e captamos a uma distância de 1,5 m da fonte. Utilizamos a função de deconvolução implementada, já explicada na seção 3.2 , chegando assim à resposta impulsiva da fonte sonora.

Para obtermos a resposta impulsiva da sala a ser medida basta aplicarmos a equação 2.3.2.8, como segue:

$$Y(w) = X(w) \cdot [G(w) \cdot L(w)]$$

Na equação acima, $Y(w)$ é a função de transferência do sinal captado na sala, $X(w)$ é a função de transferência do sinal emitido (varredura), $G(w)$ e $L(w)$ são as funções de transferência da sala e da fonte sonora, respectivamente. A técnica de varredura nos dá a vantagem de poder eliminar a influência do alto-falante (L) na resposta final da sala (G), a qual de fato nos interessa, mediante uma simples operação de divisão no domínio da frequência (deconvolução):

$$G(w) = \frac{Y(w)}{X(w).L(w)}$$

Em MatLab, a função deconvolução final foi implementada como segue:

```
function ir = dechirp(rec,B,A,n)

load ir_loudspeaker

ir = real(ifft(fft(rec(:,1),n)./fft(rec(:,2),n)./fft(ir_loudspeaker))));

ir = filter(B,A,ir);
```

Sendo que ‘rec 1’ e ‘rec 2’ são os sinais captado e emitido, respectivamente. O sinal ‘ir_loudspeaker’ é a resposta impulsiva de fonte sonora.

A literatura afirma (Müller, 2001) que tal procedimento é mais importante quando o objetivo é obter a resposta impulsiva para fins de auralização. De fato, não notamos diferenças significativas no resultado final dos parâmetros acústicos medidos.

3.5 Os demais parâmetros

Os parâmetros IACC, G e ST1 não foram medidos por exigirem o uso de uma fonte omnidirecional (G e ST1) e de um dispositivo de captação biauricular (IACC) dos quais não dispúnhamos na ocasião das medições. Entretanto, tais equipamentos já estão sendo adquiridos e servirão para futuras pesquisas.

3.6 Padronização das posições de captação e dos métodos utilizados

Utilizamos as implementações do ACMUS em todos os processamentos. Optamos por empregar o método de varredura logarítmica na obtenção das respostas impulsivas e calculamos os parâmetros acústicos a partir da resposta impulsiva média.

As posições de captação padronizadas foram duas no palco (uma na posição do maestro e outra no setor dos violinos) e cinco ou seis na platéia. As posições de captação na platéia seguem duas referências longitudinais (centro e lado) e três referências latitudinais (frente, meio e trás). Posições adicionais foram tomadas no caso em que os teatros apresentavam pisos superiores.

A fonte sonora foi sempre colocada em uma posição centralizada no palco.

Figura 3.6.1: Posições genéricas de captação

S 1: fonte

M 1: Maestro

M 2: violinos

M 3: centro frente

M 4: centro meio

M 5: centro trás

M 6: lado frente

M 7: lado meio

M 8: lado trás

3.7 Sobre os teatros onde realizamos as medições

Teatro Municipal de São Paulo: é o teatro mais tradicional da capital paulista. Inaugurado em 1911, foi palco da Semana de Arte Moderna de 1922 e ao longo do século XX recebeu diversos artistas de nível internacional. Sua arquitetura é característica de um teatro de óperas, no entanto realiza intensa atividade sinfônica e camerística. Externamente é renascentista, internamente o teatro segue o *art nouveau*. Palco e platéia apresentam estilo barroco. Está localizado no centro da cidade e abriga os corpos estáveis da Orquestra Experimental de Repertório, Coral Lírico e Orquestra Sinfônica Municipal.

Teatro São Pedro: o “Theatro São Pedro” foi inaugurado em 16 de janeiro de 1917. Construído no estilo neoclássico e leve inspiração *art-nouveau*, o teatro era revestido por cortinas de veludo vermelhas e verdes, alusão à pátria portuguesa, origem de seu antigo proprietário. Desde que abriu suas portas, caracterizou-se por uma programação eclética, espetáculos de variedades, operetas, dramas, comédias teatrais e concertos. Em 1982 foi feita a proposta de tombamento do prédio, que só se confirmou em 1984 embora alterado em relação a sua concepção original. A partir desse período os estudos de recuperação tiveram início, com a avaliação histórica do acervo da obra e o desenvolvimento de projetos. Durante algum tempo foi palco da Orquestra Sinfônica do Estado de São Paulo, antes que esta se transferisse para a Sala São Paulo.

Teatro Sérgio Cardoso: antigo Teatro Bela Vista, o Teatro Sérgio Cardoso foi inaugurado em 1980 está incorporado à Secretaria da Cultura do Estado de São Paulo. Em 2000, o teatro passou por uma grande reforma, tendo sua fachada totalmente remodelada e a área interna redimensionada, modernizando suas instalações. Atualmente abriga a Orquestra Jazz Sinfônica do Estado de São Paulo e a Banda Sinfônica do Estado de São Paulo.

Anfiteatro Camargo Guarnieri: localizado dentro do campus da Cidade Universitária (USP) é palco da Orquestra Sinfônica da Universidade de São Paulo.

Teatro Municipal de Diadema: é o mais recente dos teatros analisados, tendo sido inaugurado algumas semanas depois das medições que lá realizamos.

Teatro do Memorial da América Latina (Auditório Símon Bolívar): o Memorial da América Latina foi projetado por Oscar Niemeyer e inaugurado em 1989. Mostra a identidade cultural dos países latino-americanos por meio de seu acervo. O conjunto de edifícios, instalado em uma área de 78 mil metros quadrados, abriga um rico complexo de informações sobre a cultura do continente latino-americano. No acervo, também há documentação de música erudita, música popular brasileira e hispano-americana, com cerca de mil horas de gravação. O auditório do Memorial, destinado a espetáculos musicais, apresentações de dança e teatro, congressos e convenções, possui capacidade para 1.679 pessoas. Existem duas áreas de audiência dispostas simetricamente em torno do palco que divide o auditório ao meio. Para nossas medições solicitamos que a divisória entre as duas áreas fosse baixada, de modo a operar somente com uma das audiências.

O Teatro do Memorial já foi residência da Orquestra Jazz Sinfônica e da Orquestra Sinfônica do Estado de São Paulo, durante os últimos anos em que esteve sob a batuta do Maestro Eleazar de Carvalho.

4 Resultados

4.1 Teatro São Pedro

Foto 4.1.1: O Teatro São Pedro

Foto 4.2.2: Palco São Pedro

Foto 4.1.3: Montagem

Foto 4.1.4: Panorâmica São Pedro

LOTAÇÃO - 636 LUGARES

PLATÉIA: 396

1º BALCÃO: 110

2º BACÃO: 124

DEFICIENTES FÍSICOS: 06 (PLATÉIA)

PALCO - TIPO ITALIANO

PISO: QUARTELADA

LARGURA: 9,60 m (+ COXIAS)

PROFUNDIDADE: 15,50 m

Posição	Distância mic/fonte (m)	Distância mic/lateral (m)
Maestro	5,00	4,80
Violinos	3,60	2,20
Centro frente	5,70	11,05
Centro meio	10,00	11,10
Centro trás	16,50	8,75
Lado frente	6,50	3,63
Lado trás	11,80	3,50
Balcão lado	12,30	
Balcão trás	18,30	

Quadro 4.1.1: Posições de captação no Teatro São Pedro

TEMPERATURA: 24,5 °C

UMIDADE: 59 %

RUÍDO DE FUNDO: 59,2 dB

Figura 4.1.1: RI maestro – São Pedro

Tabela 4.1.1: parâmetros São Pedro - maestro

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	9,330	2,060	4,810	9,250	11,130	11,110	12,900
C80	[dB]	11,790	4,650	7,100	10,430	11,630	11,730	13,220
D50	[%]	89,540	61,640	75,150	89,380	92,840	92,810	95,120
D80	[%]	93,790	74,480	83,690	91,690	93,580	93,710	95,460
CT	[ms]	24,970	67,220	46,980	30,860	13,650	12,090	8,100
EDT	[s]	0,519	1,534	1,240	1,125	1,461	1,688	2,524
T20	[s]	1,738	1,500	1,180	1,212	1,255	1,157	1,006
T30	[s]	1,608	1,319	1,156	1,183	1,212	1,142	0,993
T40	[s]	1,630	1,330	1,167	1,208	1,195	1,144	1,001

BR: 1,086

TR: 0,877

ITDG(ms): 2,900

RDR(db): 4,840

RDR(%): 75,330

LFC(%): 4,200

Figura 4.1.2: RI violinos – São Pedro

Tabela 4.1.2: parâmetros São Pedro - violinos

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	5,450	3,780	11,360	10,020	12,760	12,810	15,090
C80	[dB]	10,760	5,450	12,040	10,950	13,550	13,660	15,630
D50	[%]	77,830	70,500	93,190	90,940	94,970	95,030	97,000
D80	[%]	92,270	77,830	94,110	92,550	95,770	95,870	97,340
CT	[ms]	39,040	57,390	15,190	18,520	9,860	8,820	5,230
EDT	[s]	0,789	1,558	0,952	1,353	1,489	1,514	0,556
T20	[s]	1,292	1,384	1,131	1,181	1,223	1,122	1,201
T30	[s]	1,425	1,332	1,084	1,141	1,176	1,102	1,017
T40	[s]	1,425	1,370	1,106	1,138	1,178	1,124	1,009

BR: 1,046

TR: 0,966

Figura 4.1.3: RI centro frente São Pedro

Tabela 4.1.3: parâmetros São Pedro – centro frente

freq	[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-7,980	4,590	3,940	2,180	6,050	6,090
C80	[dB]	-1,390	5,530	5,030	3,350	7,450	7,520
D50	[%]	13,740	74,210	71,270	62,290	80,120	80,250
D80	[%]	42,040	78,120	76,100	68,370	84,780	84,960
CT	[ms]	140,280	48,810	57,150	56,780	31,270	29,090
EDT	[s]	1,493	1,342	1,327	1,147	1,298	1,243
T20	[s]	1,188	1,211	1,185	1,174	1,146	1,073
T30	[s]	1,324	1,146	1,167	1,182	1,142	1,046
T40	[s]	1,353	1,215	1,214	1,211	1,168	1,040

BR: 1,017
TR: 0,941

Figura 4.1.4: RI centro meio - São Pedro

Tabela 4.1.4: parâmetros São Pedro – centro meio

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-9,100	-13,380	-1,640	-1,240	0,660	1,410	3,080
C80	[dB]	-4,610	-5,550	2,570	3,550	5,250	6,040	8,140
D50	[%]	10,950	4,390	40,680	42,940	53,790	58,030	67,010
D80	[%]	25,700	21,810	64,410	69,390	77,000	80,060	86,700
CT	[ms]	155,500	156,150	73,150	71,850	60,450	50,700	37,380
EDT	[s]	1,507	1,525	1,034	1,148	1,157	1,102	0,986
T20	[s]	1,455	1,427	1,161	1,235	1,186	1,119	1,030
T30	[s]	1,527	1,395	1,152	1,197	1,173	1,135	1,043
T40	[s]	1,609	1,396	1,214	1,201	1,178	1,157	1,036

BR:	1,069	ITDG(ms):	4,1	LFC(%):	3,700
TR:	0,888	RDR(db):	0,75		
		RDR(%):	54,59

Figura 4.1.5: RI centro trás - São Pedro

Tabela 4.1.5: parâmetros São Pedro – centro trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-16,870	-2,050	2,490	5,420	8,010	8,070	8,490
C80	[dB]	-11,660	5,390	7,450	7,380	10,520	10,490	10,610
D50	[%]	2,020	38,400	63,980	77,680	86,360	86,510	87,610
D80	[%]	6,390	77,580	84,770	84,540	91,840	91,800	92,010
CT	[ms]	188,600	75,980	57,380	48,780	36,020	32,720	30,680
EDT	[s]	1,779	1,090	0,889	1,034	0,781	0,857	0,841
T20	[s]	1,551	1,437	1,143	1,181	1,111	1,109	1,000
T30	[s]	1,752	1,408	1,128	1,169	1,110	1,119	1,003
T40	[s]	1,688	1,454	1,151	1,187	1,158	1,138	1,002

BR: 1,126
TR: 0,921

Figura 4.1.6: RI Lado frente - São Pedro

Tabela 4.1.6: parâmetros São Pedro – lado frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-3,590	-1,510	2,420	3,510	0,720	-0,640	1,340
C80	[dB]	-0,380	-0,390	2,950	4,400	2,200	0,340	2,160
D50	[%]	30,440	41,400	63,590	69,190	54,150	46,350	57,650
D80	[%]	47,840	47,760	66,360	73,360	62,390	51,960	62,210
CT	[ms]	123,130	106,100	63,470	56,080	69,790	76,780	57,640
EDT	[s]	1,646	1,280	1,099	1,129	1,049	1,069	0,945
T20	[s]	1,678	1,531	1,116	1,243	1,105	1,090	0,906
T30	[s]	1,495	1,451	1,149	1,194	1,156	1,112	0,994
T40	[s]	1,475	1,436	1,171	1,200	1,169	1,160	1,025

BR: 1,127 ITDG(ms): 6,600 LFC(%): 22,500
 TR: 0,85 RDR(db): -4,360
 RDR(%): 21,700

Figura 4.1.7: RI Lado trás - São Pedro

Tabela 4.1.7: parâmetros São Pedro – lado trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-14,770	3,700	6,210	2,940	3,500	1,130	2,830
C80	[dB]	-3,720	5,810	8,250	5,620	8,010	5,070	5,390
D50	[%]	3,230	70,110	80,700	66,300	69,110	56,530	65,730
D80	[%]	29,840	79,230	86,980	78,490	86,360	76,280	77,580
CT	[ms]	141,070	66,220	44,460	54,940	42,360	59,710	47,570
EDT	[s]	1,187	0,949	1,052	1,106	0,940	1,079	1,018
T20	[s]	1,478	1,313	1,297	1,244	1,123	1,148	1,012
T30	[s]	1,434	1,389	1,230	1,213	1,166	1,153	0,986
T40	[s]	1,489	1,412	1,238	1,209	1,172	1,154	0,997

BR: 1,103

TR: 0,912

Figura 4.1.8: RI balcão lado - São Pedro

Tabela 4.1.8: parâmetros São Pedro – balcão lado

freq	[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	1,980	1,860	3,420	2,420	3,110	3,060
C80	[dB]	3,660	3,650	4,780	4,140	4,720	5,350
D50	[%]	61,210	60,540	68,730	63,580	67,170	66,940
D80	[%]	69,890	69,840	75,030	72,170	74,780	77,400
CT	[ms]	72,060	61,500	50,530	54,420	50,120	47,330
EDT	[s]	1,108	0,913	1,073	1,069	1,117	1,088
T20	[s]	1,225	0,996	1,213	1,199	1,152	1,047
T30	[s]	1,333	1,156	1,207	1,169	1,165	1,061
T40	[s]	1,387	1,218	1,209	1,159	1,183	1,046

BR: 0,921 ITDG(ms): 2,600
 TR: 0,912 RDR(db): -4,860
 RDR(%): 24,730

Figura 4.1.9: RI balcão trás - São Pedro

Tabela 4.1.9: parâmetros São Pedro – balcão trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-23,750	-1,410	2,870	6,210	6,380	7,290	9,740
C80	[dB]	-13,520	1,930	6,060	8,560	8,400	8,900	11,630
D50	[%]	0,420	41,940	65,940	80,690	81,290	84,290	90,410
D80	[%]	4,260	60,960	80,160	87,780	87,390	88,580	93,570
CT	[ms]	190,520	91,320	56,650	46,100	41,620	36,480	25,500
EDT	[s]	1,584	1,508	1,025	0,757	0,887	0,946	0,779
T20	[s]	1,493	1,483	1,169	1,142	1,135	1,099	1,024
T30	[s]	1,546	1,415	1,148	1,192	1,115	1,126	1,024
T40	[s]	1,633	1,428	1,154	1,196	1,137	1,157	1,025

BR:	1,165	ITDG(ms):	9,400
TR:	0,933	RDR(db):	-4,730
		RDR(%):	25,610

Gráficos 4.1.1: RT São Pedro

Gráficos 4.1.2: C80 São Pedro

Gráficos 4.1.3: D50 São Pedro

Gráfico 4.1.4: BR e TR – São Pedro

As letras M, V, CF, CM, CT, LF, LT, BL, BT são as iniciais das respectivas posições de captação : maestro, violinos, centro frente, centro meio, centro trás, lado frente, lado trás, balcão lado, balcão trás.

Gráfico 4.1.5: ITDG e RDR – São Pedro

4.2 Anfiteatro Camargo Guarnieri

Foto 4.2.1: O Anfiteatro Camargo Guarnieri

Posição	Distância mic/fundo palco(m)	Distância mic/lateral (m)
Maestro	7,92	6,72
Violinos	6,30	3,65
Centro frente	11,58	7,50
Centro trás	20,85	9,28
Lado frente	10,45	3,34
Lado meio	15,55	4,36
Lado trás	20,85	4,90

Quadro 4.2.1: Posições de captação no Camargo Guarnieri

Lotação: 360 lugares

Largura de palco: 13,20 m

Profundidade de palco: 9,10 m

Temperatura: 25,9 °C

Comprimento da platéia: 19,20 m

Umidade: 62 %

Largura nos fundos da platéia: 21,41 m

Ruído de fundo: 57,9 dB

Foto 4.2.2: medidores físicos – Camargo Guarnieri

Figura 4.2.1: RI maestro – Camargo Guarnieri

Tabela 4.2.1: Parâmetros Camargo Guarnieri - maestro

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	6,640	3,480	8,970	8,760	11,440	13,250	16,230
C80	[dB]	8,450	5,830	11,780	9,770	12,110	13,970	17,020
D50	[%]	82,190	69,000	88,740	88,260	93,310	95,480	97,670
D80	[%]	87,510	79,310	93,780	90,460	94,200	96,140	98,050
CT	[ms]	37,830	56,310	26,870	31,100	14,700	9,520	5,120
EDT	[s]	1,017	1,054	0,685	1,143	1,545	1,245	0,300
T20	[s]	1,074	1,187	1,053	1,299	1,245	1,279	1,172
T30	[s]	1,051	1,215	1,182	1,275	1,251	1,232	1,112
T40	[s]	1,158	1,231	1,151	1,260	1,278	1,254	1,108

BR: 0,881 ITDG(ms): 3,600 LFC (%): 2,700
 TR: 0,963 RDR(db): 8,100
 RDR(%): 86,610

Figura 4.2.2: RI violinos - Camargo Guarnieri

Tabela 4.2.2: Parâmetros Camargo Guarnieri - violinos

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	5,200	4,750	7,570	7,940	5,710	1,220	4,890
C80	[dB]	7,350	10,090	8,840	8,380	6,290	2,030	5,610
D50	[%]	76,810	74,940	85,120	86,150	78,850	56,970	75,520
D80	[%]	84,460	91,080	88,440	87,310	80,970	61,490	78,430
CT	[ms]	49,380	48,870	31,180	30,560	39,460	72,500	40,120
EDT	[s]	0,922	0,577	1,103	1,243	1,331	1,197	1,063
T20	[s]	0,953	0,914	1,066	1,256	1,247	1,201	1,042
T30	[s]	1,221	0,966	1,136	1,242	1,216	1,234	1,069
T40	[s]	1,202	1,052	1,114	1,249	1,257	1,287	1,075

BR:	0,791	ITDG(ms):	2,300
TR:	0,896	RDR(db):	-2,520
		RDR(%):	36,040

Figura 4.2.3: RI centro frente - Camargo Guarnieri

Tabela 4.2.3: Parâmetros Camargo Guarnieri - centro frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	5,150	-3,280	0,630	1,570	6,540	8,190	10,520
C80	[dB]	8,520	3,250	4,060	3,400	7,260	8,950	11,180
D50	[%]	76,630	31,990	53,650	58,970	81,850	86,820	91,850
D80	[%]	87,660	67,860	71,800	68,620	84,170	88,710	92,920
CT	[ms]	40,120	73,540	74,990	72,700	35,950	25,250	14,950
EDT	[s]	0,974	0,867	1,268	1,096	1,318	1,346	1,451
T20	[s]	1,238	1,056	1,243	1,182	1,317	1,283	1,213
T30	[s]	1,142	1,044	1,229	1,266	1,273	1,280	1,135
T40	[s]	1,227	1,211	1,210	1,302	1,314	1,298	1,115

BR: 0,92

TR: 0,999 LFC (%): 5,800

Figura 4.2.4: RI centro trás - Camargo Guarnieri

Tabela 4.2.4: Parâmetros Camargo Guarnieri - centro trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-10,880	-16,110	-11,870	1,730	3,290	3,560	5,300
C80	[dB]	-1,970	-1,060	-2,170	5,140	5,680	5,690	7,640
D50	[%]	7,550	2,390	6,110	59,850	68,080	69,440	77,230
D80	[%]	38,840	43,940	37,760	76,570	78,730	78,780	85,320
CT	[ms]	112,950	97,000	124,070	60,780	57,240	52,480	37,340
EDT	[s]	1,015	0,807	1,225	0,963	1,174	1,142	1,128
T20	[s]	1,234	1,128	1,178	1,203	1,213	1,255	1,137
T30	[s]	1,377	1,184	1,229	1,267	1,306	1,323	1,139
T40	[s]	1,377	1,237	1,245	1,309	1,422	1,364	1,137

BR:	0,954	ITDG(ms):	11,100
TR:	0,99	RDR(db):	-9,600
		RDR(%):	9,900

Figura 4.2.5: RI Lado frente - Camargo Guarnieri

Tabela 4.2.5: Parâmetros Camargo Guarnieri – lado frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-13,060	3,740	0,290	1,410	4,120	2,660	5,780
C80	[dB]	-1,260	8,880	5,310	4,100	6,710	5,160	7,530
D50	[%]	4,710	70,290	51,650	58,030	72,110	64,850	79,090
D80	[%]	42,830	88,540	77,280	72,000	82,420	76,640	85,000
CT	[ms]	112,140	44,480	65,260	63,730	48,020	57,260	36,270
EDT	[s]	1,094	0,618	0,955	1,179	1,220	1,230	1,166
T20	[s]	1,096	0,908	1,101	1,278	1,345	1,331	1,157
T30	[s]	1,215	1,096	1,069	1,260	1,358	1,346	1,142
T40	[s]	1,279	1,129	1,064	1,270	1,403	1,379	1,147

BR: 0,766 ITDG(ms): 1,800 LFC (%): 11,500
 TR: 0,948 RDR(db): 1,680
 RDR(%): 59,600

Figura 4.2.6: RI Lado trás - Camargo Guarnieri

Tabela 4.2.6: Parâmetros Camargo Guarnieri -

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	3,390	-0,660	2,950	2,570	5,420	5,670	8,160
C80	[dB]	4,920	3,350	4,560	4,600	6,240	6,240	8,790
D50	[%]	68,610	46,210	66,340	64,370	77,720	78,690	86,770
D80	[%]	75,660	68,360	74,080	74,260	80,820	80,810	88,320
CT	[ms]	71,320	74,300	54,500	59,450	43,080	42,310	25,140
EDT	[s]	1,140	0,884	1,017	1,167	1,346	1,406	1,384
T20	[s]	1,173	0,908	1,108	1,246	1,260	1,302	1,195
T30	[s]	1,158	1,038	1,116	1,258	1,269	1,244	1,146
T40	[s]	1,207	1,107	1,085	1,267	1,275	1,226	1,119

BR:	0,805	ITDG(ms):	7,900
TR:	0,997	RDR(db):	-4,960
		RDR(%):	24,450

Gráficos 4.2.1: RT 60 Camargo Guarnieri

Gráficos 4.2.2: C80 Camargo Guarnieri

Gráficos: 4.2.3: ITDG e RDR - Camargo Guarnieri

Gráfico: 4.2.4: BR e TR - Camargo Guarnieri

4.3 Teatro Municipal de Diadema

Foto 4.3.1: O Teatro Municipal de Diadema

Posição	Distância mic/fundo palco(m)	Distância mic/lateral (m)
Maestro	8,52	8,40
Violinos	6,98	6,06
Centro frente	11,92	8,79
Centro meio	15,78	10,59
Centro trás	20,75	11,58
Lado frente	14,32	3,23
Lado trás	18,52	2,88

Quadro 4.3.1: Posições de captação no Teatro de Diadema

Palco - largura - 16.00m (boca de cena)
 profundidade - 8.00m
 altura - 5.90m

Temperatura: 23,9 °C

Umidade: 61 %

Platéia - largura - 17.00m (frente) e 25.00m (fundo)
 profundidade - 15.00m
 altura - 6.90m (frente) e 3.00m (fundo)

Ruído de fundo: 56,8dB

Lotação - 393 lugares

Foto 4.3.2: medidores físicos - Diadema

Figura 4.3.1: RI maestro – Diadema

Tabela 4.3.1: Parâmetros Diadema - maestro

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	6,070	-2,410	1,420	6,800	11,000	12,460	14,970
C80	[dB]	6,710	0,590	5,190	8,170	12,200	14,710	17,020
D50	[%]	80,200	36,450	58,130	82,720	92,650	94,630	96,920
D80	[%]	82,430	53,400	76,750	86,790	94,320	96,730	98,050
CT	[ms]	53,990	92,930	61,300	36,490	12,530	7,880	4,780
EDT	[s]	1,386	1,233	1,009	0,874	0,936	0,715	0,520
T20	[s]	1,670	1,551	1,229	0,996	0,913	0,755	0,695
T30	[s]	1,694	1,637	1,321	1,001	0,896	0,775	0,691
T40	[s]	1,759	1,648	1,295	1,039	0,902	0,776	0,693

BR:	1,456	ITDG(ms):	2,900
TR:	0,759	RDR(db):	7,400
		RDR(%):	86,130

Figura 4.3.2: RI violinos – Diadema

Tabela4.3.2: Parâmetros Diadema - violinos

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	2,870	3,640	2,810	7,610	9,640	10,590	13,860
C80	[dB]	6,870	4,420	5,430	9,460	11,190	13,110	16,450
D50	[%]	65,980	69,810	65,630	85,230	90,200	91,980	96,050
D80	[%]	82,970	73,470	77,720	89,830	92,940	95,350	97,790
CT	[ms]	63,530	65,750	54,060	26,210	15,700	11,590	5,950
EDT	[s]	1,204	1,322	1,094	0,918	0,922	0,744	0,620
T20	[s]	1,747	1,381	1,242	1,065	0,836	0,747	0,722
T30	[s]	1,829	1,578	1,269	1,038	0,880	0,756	0,698
T40	[s]	2,063	1,714	1,346	1,077	0,929	0,781	0,709

BR:	1,379	ITDG(ms):	2,700
TR:	0,773	RDR(db):	4,910
		RDR(%):	75,630

Figura 4.3.3: RI centro frente – Diadema

Tabela 4.3.3: Parâmetros Diadema - centro frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-1,690	-9,020	1,430	3,330	5,650	8,910	11,050
C80	[dB]	0,870	-1,310	2,180	4,980	8,410	11,450	13,390
D50	[%]	40,400	11,130	58,160	68,300	78,580	88,610	92,720
D80	[%]	54,970	42,490	62,290	75,890	87,410	93,320	95,620
CT	[ms]	124,360	139,300	68,650	55,480	28,660	15,530	10,030
EDT	[s]	1,942	1,867	1,076	1,091	0,905	0,840	0,792
T20	[s]	1,873	1,648	1,152	1,078	0,883	0,774	0,738
T30	[s]	2,054	1,653	1,257	1,048	0,936	0,785	0,702
T40	[s]	2,160	1,590	1,345	1,067	0,951	0,778	0,707

BR:	1,428	ITDG(ms):	1,600
TR:	0,771	RDR(db):	2,040
		RDR(%):	62,700

Figura 4.3.4: RI centro meio – Diadema

Tabela 4.3.4: Parâmetros Diadema - centro meio

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-7,950	-9,850	-0,280	1,350	5,560	8,070	8,670
C80	[dB]	-2,090	-4,960	2,870	3,640	7,670	11,400	12,850
D50	[%]	13,830	9,380	48,400	57,700	78,260	86,510	88,040
D80	[%]	38,210	24,210	65,950	69,820	85,410	93,250	95,070
CT	[ms]	139,560	155,060	77,870	61,430	35,410	21,900	14,720
EDT	[s]	1,519	1,419	1,121	1,022	1,000	0,715	0,611
T20	[s]	1,680	1,619	1,147	0,897	0,872	0,751	0,686
T30	[s]	1,894	1,631	1,234	0,962	0,881	0,771	0,685
T40	[s]	1,941	1,732	1,305	1,026	0,889	0,783	0,697

BR: 1,564 ITDG(ms): 9,800
 TR: 0,812 RDR(db): 2,400
 RDR(%): 63,500

Figura 4.3.5: RI centro trás – Diadema

Tabela 4.3.5: Parâmetros Diadema - centro trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-9,580	-18,040	-10,250	4,560	6,600	8,980	9,780
C80	[dB]	-1,050	-8,890	-0,180	6,270	8,890	11,020	12,070
D50	[%]	9,930	1,550	8,650	74,060	82,070	88,770	90,480
D80	[%]	43,990	11,430	48,970	80,900	88,570	92,680	94,150
CT	[ms]	150,850	161,520	111,420	45,820	31,810	21,940	16,880
EDT	[s]	1,807	1,552	1,126	0,967	0,797	0,749	0,637
T20	[s]	1,713	1,789	1,325	0,973	0,938	0,837	0,747
T30	[s]	2,004	1,714	1,418	1,038	0,947	0,828	0,758
T40	[s]	2,077	1,711	1,394	1,073	0,949	0,834	0,764

BR:	1,629	ITDG(ms):	1,900
TR:	0,829	RDR(db):	-3,390
		RDR(%):	31,880

Figura 4.3.6: RI Lado frente – Diadema

Tabela 4.3.6: Parâmetros Diadema - Lado frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-5,970	2,740	0,710	1,150	4,160	1,830	5,840
C80	[dB]	-0,690	4,640	3,050	4,010	7,230	5,420	8,480
D50	[%]	20,200	65,270	54,100	56,610	72,280	60,360	79,340
D80	[%]	46,050	74,410	66,900	71,580	84,080	77,710	87,580
CT	[ms]	128,590	79,840	68,270	63,690	39,300	51,020	26,810
EDT	[s]	1,461	1,500	1,059	1,002	0,852	0,823	0,812
T20	[s]	2,023	1,682	1,337	1,030	0,889	0,805	0,731
T30	[s]	2,132	1,611	1,314	1,061	0,916	0,811	0,732
T40	[s]	2,264	1,677	1,399	1,107	0,933	0,820	0,736

BR: 1,574

TR: 0,801

Figura 4.3.7: RI Lado trás – Diadema

Tabela 4.3.7: Parâmetros Diadema - Lado trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-16,080	-7,350	1,520	3,990	4,990	4,160	6,760
C80	[dB]	-4,990	-3,690	3,270	6,420	7,830	6,990	8,870
D50	[%]	2,400	15,550	58,680	71,500	75,950	72,270	82,620
D80	[%]	24,070	29,960	67,980	81,440	85,850	83,330	88,520
CT	[ms]	169,840	134,330	71,760	50,190	38,610	40,950	25,370
EDT	[s]	2,026	1,388	1,255	1,029	0,968	0,807	0,832
T20	[s]	2,047	1,719	1,221	1,050	0,918	0,812	0,758
T30	[s]	2,378	1,825	1,238	1,057	0,920	0,820	0,745
T40	[s]	2,180	1,804	1,308	1,065	0,938	0,827	0,759

BR:	1,494	ITDG(ms):	6,300
TR:	0,798	RDR(db):	-2,370
		RDR(%):	36,710

Gráficos 4.3.1: RT60 Diadema

Gráfico 4.3.2: C80 Diadema

Gráfico 4.3.3: ITDG e RDR – Diadema

Gráfico 4.3.4: BR e TR – Diadema

4.4 Teatro do Memorial da América Latina (Auditório Simón Bolívar)

Foto 4.4.1: Visão externa do Auditório

Foto 4.4.2: Interior do Auditório

Foto 4.4.3: A extensão do Teatro do Memorial

Foto 4.4.4: Detalhe do palco do Memorial

Posição	Distância mic/fonte (m)	Distância mic/lateral (m)
Maestro	6,70	17,70
Violinos	6,70	13,38
Centro frente	12,50	17,45
Centro trás	23,83	23,21
Lado frente	17,70	6,81
Lado trás	28,60	7,66

Quadro 4.4.1: Posições de captação no Memorial

Platéia : 876 lugares no lado A e 733 no lado B

Palco: Largura - 33 m

Profundidade - 14 m (entre o lado A e o lado B)

Altura - 7 m

Temperatura: 24,8 °C

Umidade: 55 %

Ruído de fundo: 59,3 dB

Foto 4.4.5: medidores físicos - Memorial

Figura 4.4.1: RI maestro – Memorial

Tabela 4.4.1: Parâmetros Memorial - maestro

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	14,520	5,370	4,980	7,260	10,650	14,560	18,960
C80	[dB]	19,220	8,160	6,000	8,170	11,100	14,840	19,590
D50	[%]	96,590	77,510	75,900	84,170	92,070	96,620	98,750
D80	[%]	98,820	86,750	79,920	86,780	92,800	96,820	98,910
CT	[ms]	13,900	53,450	68,250	52,890	36,290	8,120	3,210
EDT	[s]	0,243	1,571	1,882	1,770	1,253	0,832	0,022
T20	[s]	1,176	1,939	2,104	1,901	1,800	1,275	1,204
T30	[s]	1,536	1,759	2,028	1,885	1,667	1,277	1,013
T40	[s]	1,664	1,752	2,008	1,915	1,659	1,257	0,967

BR: 1,092

TR: 0,67

ITDG(ms): 2,900

RDR(db): 5,540

RDR(%): 79,170

LFC(%): 0,990

Figura 4.4.2: RI violinos – Memorial

Tabela 4.4.2: Parâmetros Memorial - violinos

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	13,270	5,740	5,600	7,590	10,320	15,370	20,470
C80	[dB]	18,650	8,930	6,410	8,250	10,930	15,810	21,730
D50	[%]	95,510	79,040	78,420	85,180	91,500	97,180	99,110
D80	[%]	98,650	88,670	81,400	86,990	92,530	97,440	99,330
CT	[ms]	12,320	47,920	59,620	49,780	36,230	7,200	2,550
EDT	[s]	0,265	1,367	1,654	1,662	1,252	0,287	0,023
T20	[s]	1,148	1,720	1,868	1,944	1,677	1,459	0,975
T30	[s]	1,078	1,594	1,941	1,949	1,596	1,298	1,029
T40	[s]	1,392	1,691	2,009	1,950	1,630	1,278	0,989

BR:	0,991	ITDG(ms):	3,200
TR:	0,672	RDR(db):	6,870
		RDR(%):	83,160

Figura 4.4.3: RI centro frente – Memorial

Tabela 4.4.3: Parâmetros Memorial - centro frente

freq	[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	1,850	3,300	1,690	7,820	12,940	15,380
C80	[dB]	2,160	3,580	2,200	8,240	13,460	16,190
D50	[%]	60,510	68,150	59,620	85,810	95,170	97,190
D80	[%]	62,180	69,520	62,410	86,960	95,690	97,650
CT	[ms]	97,600	79,630	90,900	30,070	9,730	5,250
EDT	[s]	1,955	1,983	1,754	2,021	1,327	0,196
T20	[s]	1,666	1,987	1,906	1,570	1,215	1,094
T30	[s]	1,638	2,011	1,924	1,539	1,213	0,919
T40	[s]	1,686	1,992	1,950	1,606	1,202	0,925

BR: 1,051 ITDG(ms): 1,600
 TR: 0,664 RDR(db): 2,240
 RDR(%): 69,440

Fig 4.4.4: RI centro trás – Memorial

Houve problemas com os processamentos nessa posição e somente alguns parâmetros foram obtidos. Se o padrão de decaimento sonoro em determinado ponto for muito atípico, as implementações não são capazes de realizar o cálculo da integral de Schroeder para todas as bandas de frequências. Notamos que esse problema foi mais crítico para valores entre 63Hz e 250 Hz. Entretanto essa é uma situação rara, ocorrendo apenas em três posições de captação ao longo de todo nosso trabalho (as outras duas foram no teatro Sérgio Cardoso).

Tabela 4.4.4: Parâmetros Memorial - centro trás

ITDG(ms):	2,04
RDR(db):	1,61
RDR(%):	59,23
LFC(%):	1,08

Figura 4.4.5: RI Lado frente – Memorial

Tabela: Parâmetros Memorial - Lado frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-11,240	-13,450	0,360	-1,440	5,080	6,280	11,580
C80	[dB]	-1,720	-3,230	0,670	-0,500	5,680	7,300	12,330
D50	[%]	6,990	4,330	52,080	41,760	76,310	80,950	93,510
D80	[%]	40,220	32,240	53,830	47,120	78,720	84,300	94,470
CT	[ms]	111,260	168,170	114,510	134,890	47,380	31,810	10,110
EDT	[s]	1,386	1,722	1,823	1,843	1,692	1,318	1,152
T20	[s]	1,754	1,776	1,724	1,844	1,684	1,236	0,930
T30	[s]	1,606	1,691	1,970	1,889	1,690	1,257	0,943
T40	[s]	1,609	1,829	2,032	1,933	1,695	1,285	0,949

BR:	0,992	ITDG(ms):	1,200
TR:	0,614	RDR(db):	1,960
		RDR(%):	64,570

Figura 4.4.6: RI Lado Trás – Memorial

Tabela 4.4.6: Parâmetros Memorial - Lado Trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-3,820	-7,300	-3,150	-2,080	4,260	8,750	11,910
C80	[dB]	0,370	-1,880	0,730	2,970	7,850	11,080	13,680
D50	[%]	29,310	15,710	32,640	38,270	72,720	88,230	93,960
D80	[%]	52,130	39,350	54,210	66,480	85,910	92,760	95,890
CT	[ms]	90,780	122,160	100,870	88,160	58,130	45,080	32,450
EDT	[s]	1,363	1,518	1,625	1,606	1,393	0,802	0,365
T20	[s]	1,499	1,641	2,060	2,170	1,703	1,301	1,143
T30	[s]	1,540	1,843	1,956	2,010	1,634	1,282	0,986
T40	[s]	1,494	1,845	2,000	1,974	1,623	1,323	0,980

BR: 0,955
TR: 0,631

ITDG(ms): 6,100
RDR(db): -4,460
RDR(%): 26,330

LFC(%): 14,040

Gráficos 4.4.1: RT60 – Memorial

Gráficos 4.4.2: C80 - Memorial

Gráfico 4.4.3: ITDG e RDR – Memorial

Gráfico 4.4.4: BR e TR – Memorial

4.5 Teatro Sérgio Cardoso

Fotos 4.5.1: O Teatro Sérgio Cardoso

Foto 4.5.2: Detalhe do palco do Sérgio Cardoso

Foto 4.5.3: medidores físicos – Sérgio Cardoso

Posição	Distância mic/beira do palco (m)	Distância mic/lateral (m)
Maestro	2,20	6,10
Violinos	4,10	2,80
Centro frente	5,10	9,40
Centro meio	10,20	10,60
Centro trás	18,80	10,90
Lado frente	7,10	2,50
Lado trás	14,40	6,80
Balcão	33,40 (mic/fonte)	X

Quadro 4.5.1: Posições de captação no Sérgio Cardoso

Lotação: 862 lugares

Palco: Largura – 27,90 m

Profundidade – 22,80 m

Altura - 21,50 m

Temperatura: 22,1 °C

Umidade: 62 %

Ruído de fundo: 60,3 dB

Figura 4.5.1: RI maestro – Sérgio Cardoso

Tabela 4.5.1: Parâmetros Sérgio Cardoso - maestro

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	4,060	1,270	7,120	8,570	11,580	14,730	16,900
C80	[dB]	5,560	2,230	8,140	9,950	12,330	15,240	17,720
D50	[%]	71,840	57,250	83,750	87,800	93,510	96,750	98,000
D80	[%]	78,240	62,580	86,700	90,810	94,480	97,090	98,340
CT	[ms]	73,910	109,320	46,970	32,770	14,150	7,430	4,290
EDT	[s]	1,739	2,633	1,460	0,954	1,423	0,480	0,427
T20	[s]	3,207	3,695	2,212	1,546	1,208	1,162	1,008
T30	[s]	3,679	3,921	3,187	2,422	1,455	1,156	0,868
T40	[s]	3,520	3,963	3,578	2,842	1,842	1,350	0,918

BR: 2,146
TR: 0,788

ITDG(ms): 4,500
RDR(db): 8,800
RDR(%): 88,520

LFC(%): 3,480

Figura 4.5.2: RI violinos - Sérgio Cardoso

Tabela 4.5.2: Parâmetros Sérgio Cardoso - violinos

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	6,250	-0,720	8,980	10,760	11,170	13,240	14,900
C80	[dB]	7,370	2,050	9,770	11,780	11,680	14,540	16,260
D50	[%]	80,850	45,870	88,780	92,260	92,910	95,480	96,870
D80	[%]	84,530	61,600	90,460	93,770	93,640	96,600	97,690
CT	[ms]	73,110	140,600	30,630	21,810	15,740	8,990	5,720
EDT	[s]	2,700	3,004	1,416	0,874	1,311	0,808	0,439
T20	[s]	4,298	4,000	2,900	2,036	1,194	1,114	0,866
T30	[s]	4,220	4,381	3,593	2,796	1,505	1,154	0,904
T40	[s]	4,005	4,402	3,845	3,148	1,967	1,412	1,008

BR: 2,136

TR: 0,613

Figura 4.5.3: RI centro frente - Sérgio Cardoso

Tabela 4.5.3: Parâmetros Sérgio Cardoso - centro frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-2,730	-2,590	-1,410	1,700	4,910	7,570	10,360
C80	[dB]	-0,530	-0,540	-0,420	3,570	5,480	8,300	11,130
D50	[%]	34,800	35,540	41,950	59,660	75,610	85,120	91,580
D80	[%]	46,940	46,890	47,620	69,470	77,940	87,130	92,850
CT	[ms]	167,860	176,890	128,020	81,480	39,490	22,470	11,810
EDT	[s]	2,332	2,656	1,525	1,047	1,198	1,267	1,299
T20	[s]	3,044	3,418	2,584	1,628	1,162	1,014	0,867
T30	[s]	3,490	3,967	3,346	2,433	1,336	1,092	0,837
T40	[s]	3,242	4,098	3,587	2,804	1,724	1,238	0,876

BR: 2,151 LFC(%): 2,620
 TR: 0,674

Figura 4.5.4: RI centro meio - Sérgio Cardoso

Houve problemas no processamento e não conseguimos obter os parâmetros para essa posição.

Figura 4.5.5: RI centro trás - Sérgio Cardoso

Houve problemas no processamento e não conseguimos obter os parâmetros para essa posição.

Figura 4.5.6: RI Lado frente - Sérgio Cardoso

Tabela 4.5.6: Parâmetros Sérgio Cardoso - Lado frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-0,470	-4,150	-1,560	1,320	5,540	6,890	10,900
C80	[dB]	1,070	-0,940	1,650	3,260	6,990	8,500	12,240
D50	[%]	47,270	27,800	41,130	57,570	78,150	83,000	92,480
D80	[%]	56,160	44,630	59,370	67,930	83,320	87,620	94,370
CT	[ms]	144,680	172,900	110,020	84,510	36,820	26,840	11,630
EDT	[s]	2,916	2,764	1,532	0,974	1,256	1,203	0,977
T20	[s]	3,892	3,600	2,965	1,689	1,251	1,107	0,878
T30	[s]	4,063	3,969	3,465	2,510	1,444	1,169	0,893
T40	[s]	3,962	4,033	3,752	2,859	1,790	1,334	0,958

BR:	2,233	ITDG(ms):	2,005
TR:	0,675	RDR(db):	1,950
		RDR(%):	61,080

Figura 4.5.7: RI Lado Trás - Sérgio Cardoso

Tabela 4.5.7: Parâmetros Sérgio Cardoso - Lado Trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-1,720	-2,610	2,280	4,150	5,700	6,990	10,200
C80	[dB]	-0,620	-1,900	3,140	5,650	7,500	8,570	12,620
D50	[%]	40,200	35,410	62,830	72,220	78,800	83,340	91,280
D80	[%]	46,410	39,230	67,350	78,590	84,900	87,790	94,810
CT	[ms]	179,230	185,150	71,480	44,720	35,620	28,830	12,840
EDT	[s]	3,321	2,956	1,629	0,920	1,220	1,157	0,794
T20	[s]	4,207	3,828	2,784	1,625	1,277	1,264	0,888
T30	[s]	4,140	3,829	3,506	2,513	1,443	1,288	0,892
T40	[s]	3,798	3,817	3,964	3,124	1,834	1,429	0,959

BR: 2,279
TR: 0,742

ITDG(ms): 6,600
RDR(db): 2,650
RDR(%): 64,870

LFC(%): 6,880

Figura 4.5.8: RI balcão - Sérgio Cardoso

Tabela 4.5.8: Parâmetros Sérgio Cardoso - balcão

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-2,520	-3,990	3,140	6,680	5,070	7,950	8,760
C80	[dB]	-1,230	-0,390	5,570	9,050	8,030	9,990	10,430
D50	[%]	35,890	28,520	67,310	82,330	76,260	86,190	88,250
D80	[%]	42,980	47,790	78,300	88,930	86,410	90,900	91,700
CT	[ms]	216,130	182,450	65,690	35,130	42,270	33,920	24,420
EDT	[s]	3,459	3,142	1,513	0,906	0,972	0,886	0,805
T20	[s]	3,704	3,460	2,574	1,690	1,231	1,260	0,946
T30	[s]	3,972	3,836	3,379	2,470	1,485	1,247	0,862
T40	[s]	3,830	3,949	3,642	3,235	1,871	1,472	0,934

BR:	2,066	ITDG(ms):	4,400
TR:	0,755	RDR(db):	-4,030
		RDR(%):	28,340

Gráficos 4.5.1: RT60 - Sérgio Cardoso

Gráficos 4.5.2: C80 - Sérgio Cardoso

Gráficos 4.5.3: ITDG e RDR - Sérgio Cardoso

Gráfico 4.5.4: BR e TR - Sérgio Cardoso

4.6 Teatro Municipal de São Paulo

Foto 4.6.1: O Teatro Municipal de São Paulo

Foto 4.6.2: Vista externa

Foto 4.6.3: Platéia e pisos superiores

Foto 4.6.4: Detalhe dos microfones

Foto 4.6.5: Vista frontal do palco. Ao lado – Pedro Kohler, o autor das fotos

Foto 4.6.6: Vista superior do palco

Lotação: 1580 lugares

Largura da platéia: 23 m (máximo)

Comprimento da platéia: 24 m

Alturas (com referência ao piso):

Balcão: 5,80 m

Galeria: 13,50 m

Base da cúpula: 17,40 m

Teto: 19,50 m

Posição	Distância mic/fonte (m)	Distância mic/lateral (m)
Maestro	2,68	8,90
Violinos	5,28	3,70
Centro frente	9,22	11,12
Centro trás	16,82	11,05
Lado frente	8,40	5,80
Lado meio	13,18	6,45
Lado trás	20,30	4,80
Balcão lado	X	X
Balcão trás	X	X
Galeria	X	X

Quadro 4.6.1: Posições de captação no Municipal

Foto 4.6.5: medidores físicos – Municipal

Temperatura: 24,8 °C

Umidade: 57 %

Ruído de fundo: 58,1 dB

Figura 4.6.1: RI maestro – Municipal

Tabela 4.6.1: Parâmetros Municipal - maestro

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	15,530	11,500	11,670	12,110	14,860	19,010	21,790
C80	[dB]	16,640	11,790	13,400	13,000	15,580	19,520	22,640
D50	[%]	97,280	93,390	93,630	94,210	96,840	98,760	99,340
D80	[%]	97,880	93,790	95,630	95,220	97,310	98,900	99,460
CT	[ms]	11,540	24,580	19,860	18,240	13,230	3,060	1,440
EDT	[s]	0,199	1,657	0,748	0,815	0,205	0,034	0,003
T20	[s]	1,977	1,805	1,685	1,495	1,263	1,325	1,203
T30	[s]	1,466	1,837	1,495	1,333	1,219	1,053	0,898
T40	[s]	1,658	1,983	1,524	1,338	1,214	1,033	0,840

BR: 1,265
TR: 0,916

ITDG(ms): 4,8
RDR(db): 12,51
RDR(%): 94,73

LFC(%): 0,450

Figura 4.6.2: RI violinos – Municipal

Tabela 4.6.2: Parâmetros Municipal - violinos

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	6,020	-0,940	8,720	10,200	11,930	14,780	15,340
C80	[dB]	7,610	1,970	9,750	11,170	12,590	15,990	16,640
D50	[%]	80,000	44,630	88,160	91,290	93,970	96,780	97,160
D80	[%]	85,230	61,180	90,430	92,910	94,780	97,540	97,880
CT	[ms]	49,690	104,860	25,800	22,180	15,010	8,020	7,070
EDT	[s]	1,047	1,569	1,448	1,321	1,059	0,356	0,290
T20	[s]	1,629	1,662	1,580	1,435	1,326	1,169	0,933
T30	[s]	1,776	1,870	1,556	1,377	1,311	1,202	0,992
T40	[s]	1,768	1,938	1,554	1,408	1,310	1,236	1,045

BR:	1,175	ITDG(ms):	3,400
TR:	0,761	RDR(db):	5,250
		RDR(%):	77,050

Figura 4.6.3: RI centro frente – Municipal

Tabela: Parâmetros Municipal - centro frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-0,580	-7,330	-1,950	-0,080	6,220	9,100	9,480
C80	[dB]	0,740	-5,820	0,300	1,250	7,140	9,730	10,650
D50	[%]	46,650	15,610	38,950	49,510	80,720	89,040	89,890
D80	[%]	54,230	20,730	51,750	57,150	83,830	90,380	92,080
CT	[ms]	121,320	194,360	112,820	94,730	31,930	18,040	14,450
EDT	[s]	2,322	2,181	1,655	1,377	1,422	1,367	1,277
T20	[s]	2,932	2,189	1,749	1,531	1,414	1,296	1,060
T30	[s]	2,954	2,267	1,639	1,532	1,460	1,315	1,088
T40	[s]	2,963	2,437	1,650	1,562	1,475	1,341	1,107

BR: 1,338
TR: 0,8

ITDG(ms): 15,200
RDR(db): 6,280
RDR(%): 81,040

LFC(%): 3,300

Figura 4.6.4: RI centro trás – Municipal

Tabela 4.6.4: Parâmetros Municipal - centro trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-10,420	-18,730	-0,300	2,010	3,710	7,870	10,920
C80	[dB]	-6,990	-11,270	2,170	5,930	9,270	10,940	13,600
D50	[%]	8,330	1,320	48,260	61,380	70,130	85,960	92,510
D80	[%]	16,680	6,950	62,260	79,730	89,430	92,560	95,820
CT	[ms]	126,610	158,620	78,720	66,890	50,330	39,080	31,400
EDT	[s]	1,354	1,458	0,990	0,956	0,729	0,532	0,327
T20	[s]	1,627	1,782	1,581	1,283	1,154	1,158	1,062
T30	[s]	1,771	1,753	1,502	1,366	1,265	1,199	1,043
T40	[s]	1,765	1,875	1,555	1,415	1,312	1,226	1,052

BR:	1,38	ITDG(ms):	2,000
TR:	0,911	RDR(db):	-5,230
		RDR(%):	23,070

Figura 4.6.5: RI Lado frente – Municipal

Tabela 4.6.5: Parâmetros Municipal - Lado frente

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	4,580	1,330	1,880	3,740	9,280	11,310	11,720
C80	[dB]	6,100	1,890	2,980	5,600	10,310	13,240	13,660
D50	[%]	74,190	57,580	60,690	70,280	89,440	93,120	93,700
D80	[%]	80,280	60,700	66,500	78,400	91,490	95,470	95,880
CT	[ms]	59,950	103,410	85,800	64,920	20,080	11,580	10,000
EDT	[s]	1,795	1,599	1,541	1,214	1,333	0,974	0,874
T20	[s]	1,911	1,708	1,546	1,395	1,347	1,169	1,009
T30	[s]	2,038	1,893	1,557	1,445	1,332	1,200	1,065
T40	[s]	2,040	1,966	1,606	1,422	1,328	1,223	1,085

BR:	1,186	ITDG(ms):	5,000
TR:	0,794	RDR(db):	6,370
		RDR(%):	81,300

Figura 4.6.6: RI Lado meio – Municipal

Tabela 4.6.6: Parâmetros Municipal - Lado meio

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-0,070	-9,600	-1,290	-0,060	5,880	8,680	9,600
C80	[dB]	5,760	-4,130	0,140	2,710	8,100	10,610	12,110
D50	[%]	49,650	9,880	42,610	49,670	79,500	88,060	90,130
D80	[%]	79,030	27,880	50,830	65,110	86,600	92,000	94,210
CT	[ms]	73,110	147,850	107,880	88,250	37,620	21,520	17,060
EDT	[s]	1,640	1,776	1,483	1,322	1,307	1,051	0,924
T20	[s]	1,969	2,162	1,607	1,448	1,371	1,218	1,012
T30	[s]	2,087	2,051	1,630	1,428	1,284	1,231	1,067
T40	[s]	1,887	2,096	1,633	1,437	1,313	1,254	1,080

BR: 1,337 LFC(%): 24,100
 TR: 0,791

Figura 4.6.7: RI Lado Trás – Municipal

Tabela: 4.6.7: Parâmetros Municipal - Lado Trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-13,940	-20,390	-28,710	1,600	8,950	8,610	10,640
C80	[dB]	-7,320	-11,670	-4,990	5,160	11,420	10,830	12,350
D50	[%]	3,880	0,910	0,130	59,120	88,700	87,880	92,060
D80	[%]	15,640	6,370	24,080	76,670	93,290	92,380	94,500
CT	[ms]	131,130	169,290	129,790	56,160	23,560	23,340	18,210
EDT	[s]	1,128	1,585	1,140	1,036	0,699	0,919	0,845
T20	[s]	1,476	1,762	1,588	1,305	1,124	1,147	1,033
T30	[s]	1,641	1,843	1,587	1,397	1,188	1,190	1,036
T40	[s]	1,562	1,943	1,600	1,446	1,244	1,222	1,049

BR:	1,379	ITDG(ms):	10,200
TR:	0,897	RDR(db):	-0,890
		RDR(%):	44,900

Figura 4.6.8: RI balcão trás – Municipal

Tabela 4.6.8: Parâmetros Municipal – balcão trás

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-16,370	-7,590	-2,880	1,240	2,840	5,900	7,670
C80	[dB]	-13,990	2,400	2,720	7,270	7,570	9,040	9,750
D50	[%]	2,250	14,850	34,010	57,170	65,920	79,570	85,410
D80	[%]	3,840	63,480	65,190	84,220	85,110	88,930	90,420
CT	[ms]	171,940	99,200	92,010	62,320	53,060	41,200	32,690
EDT	[s]	1,175	1,336	1,421	1,039	1,028	0,890	0,923
T20	[s]	2,052	1,489	1,518	1,421	1,268	1,216	1,132
T30	[s]	2,191	1,700	1,562	1,439	1,306	1,218	1,117
T40	[s]	2,016	1,785	1,620	1,443	1,331	1,249	1,098

BR: 1,118

TR: 0,873

ITDG(ms): 2,300

RDR(db): -5,350

RDR(%): 22,580

LFC(%): 4,700

Figura 4.8.9: balcão lado – Municipal

Tabela 4.8.9: Parâmetros Municipal - balcão lado

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-7,970	1,480	2,630	3,720	4,700	4,770	4,100
C80	[dB]	1,430	2,750	4,430	5,290	6,110	7,010	6,770
D50	[%]	13,770	58,430	64,710	70,210	74,680	75,000	71,980
D80	[%]	58,200	65,320	73,500	77,190	80,320	83,400	82,630
CT	[ms]	120,530	84,450	64,500	52,900	42,880	38,110	40,890
EDT	[s]	1,713	1,596	1,629	1,263	1,295	1,205	1,197
T20	[s]	2,047	1,620	1,695	1,395	1,289	1,257	1,127
T30	[s]	2,232	1,793	1,622	1,414	1,304	1,253	1,120
T40	[s]	2,091	1,910	1,653	1,410	1,336	1,268	1,096

BR: 1,235 LFC(%): 10,200
 TR: 0,888

Figura 4.6.10: RI Galeria – Municipal

Tabela 4.6.10: Parâmetros Municipal - Galeria

freq	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
C50	[dB]	-20,480	-0,620	-0,210	-0,050	0,550	0,810	1,810
C80	[dB]	-11,460	2,210	3,170	2,820	2,810	3,480	3,670
D50	[%]	0,890	46,450	48,810	49,730	53,190	54,690	60,290
D80	[%]	6,670	62,460	67,480	65,680	65,640	69,020	70,000
CT	[ms]	204,360	105,870	88,660	85,820	76,870	72,480	65,440
EDT	[s]	2,051	1,844	1,416	1,471	1,437	1,358	1,299
T20	[s]	2,081	1,730	1,581	1,569	1,364	1,254	1,149
T30	[s]	2,151	1,842	1,504	1,465	1,351	1,245	1,118
T40	[s]	2,013	1,817	1,622	1,445	1,362	1,254	1,082

BR: 1,129

TR: 0,819

Gráficos 4.6.1: RT60 – Municipal

Gráficos 4.6.2: C80 - -Municipal

Gráficos 4.6.3: D50 – Municipal

Gráficos 4.6.4: ITDG e RDR – Municipal

Gráfico 4.6.5: BR e TR - Municipal

5 Análises e Conclusões

Neste capítulo vamos analisar e tirar conclusões sobre os resultados expostos no capítulo anterior. Nosso objetivo é aprofundar a compreensão dos parâmetros acústicos e não o de estabelecer um *ranking* para as salas onde efetuamos as medições. É claro que em vários momentos tivemos que comparar as salas, mas esse procedimento foi um mero recurso tomado exclusivamente para entendermos melhor os parâmetros acústicos.

Primeiramente exibimos um quadro geral dos resultados para cada parâmetro. Em seguida, vamos buscar nas características arquitetônicas das salas as causas ou explicações para os resultados observados.

No caso de alguns parâmetros fizemos uma análise crítica confrontando as informações bibliográficas com nossos resultados, deduções e conclusões.

Ao final da análise de cada parâmetro, estruturamos uma escuta dirigida que dará oportunidade ao leitor de se tornar também um ouvinte, e comparar por si próprio os resultados numéricos com as amostras musicais gravadas nos teatros, acompanhando assim as nossas conclusões. Essas amostras foram as mesmas exibidas aos jurados que compuseram a análise subjetiva.

A seguir fazemos algumas considerações necessárias ao procedimento da escuta dirigida.

Gravações musicais a partir de amostras anecóicas:

Uma câmara anecóica é uma sala onde não há reverberação, ou seja, qualquer som executado em seu interior soa como se estivesse sendo tocado em campo livre, sem nenhuma superfície para refletir as ondas sonoras. Analisando a resposta impulsiva de uma câmara anecóica observamos apenas a chegada do som direto e de nenhuma outra reflexão.

As amostras anecóicas são de grande utilidade experimental. Como as amostras não trazem a influência da sala onde foram gravadas, elas podem ser reproduzidas em salas reverberantes de tal forma que uma gravação na sala em questão irá proporcionar uma apreciação acústica fiel sobre aquela sala. Como a repetibilidade é perfeita, podemos fazer gravações em diversos teatros e comparar os resultados. As amostras anecóicas também são bastante utilizadas como ferramentas de verificação em processos de simulação acústica.

Na prática, existe uma tolerância para o nível de reverberação que uma sala pode ter para ser considerada “anecóica”. Tais especificações constam na norma ISO 3745, e foram obedecidas na produção dos registros anecóicos que utilizamos. As amostras anecóicas que colhemos em fevereiro de 2005 estavam disponíveis na *Internet* nos seguintes *sites*:

<http://www.ymec.com/hp/pref2>

http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Aurora_CD/Anecoic/Denon

A partir das amostras anecóicas, realizamos diversas gravações nas salas de concerto, empregando rigorosamente o mesmo equipamento de reprodução e de gravação. Utilizamos um critério didático na seleção das amostras gravadas a serem confrontadas com os resultados numéricos dos parâmetros. Tal critério será detalhado na seção de análise subjetiva.

As amostras gravadas que constam no CD anexo estão organizadas em pastas que compreendem cada parâmetro analisado subjetivamente. Dentro de cada pasta também vão as amostras anecóicas utilizadas. Neste capítulo, a nomenclatura dos arquivos gravados é escrita em *itálico* e obedece à seguinte ordem:

Instrumento/autor_local de captação_teatro_normalização_parâmetro e grupo de amostra

Por exemplo: *tchai_palco_sc_nor_RT2* ,
significa uma amostra de Tchaikovsky gravada no palco do teatro Sérgio Cardoso, normalizada¹¹, e que está presente no segundo grupo de amostras para análise do parâmetro RT60.

As siglas relativas a cada teatro, que serão usadas daqui em diante, são dadas na tabela a seguir:

Tabela 5.1: Siglas dos Teatros

Sigla	Teatro
CG	CamargoGuarnieri
SP	São Pedro
TD	Diadema
SC	Sérgio Cardoso
ME	Memorial
TM	Municipal

A referência básica utilizada neste capítulo foi Beranek (2004) por ser a mais completa e a mais recente, e por trazer algumas correções e novas considerações as quais tivemos a oportunidade de verificar nas análises e conclusões.

¹¹ Normalização é um processamento digital realizado no *software* de edição de áudio. Através desse processamento os valores de pico das amplitudes das amostras gravadas são levados a um mesmo nível arbitrário. Esse procedimento é necessário pois as amostras gravadas a diferentes distâncias apresentam diferentes amplitudes, e tal fato não deve interferir no julgamento subjetivo de cada parâmetro específico, por isso foram todas igualmente normalizadas.

5.1 Reverberação

Os resultados de reverberação foram, em geral, condizentes com a fórmula de Sabine, ou seja: maiores valores de reverberação para salas com maior razão entre volume e capacidade de absorção. As salas menores (Camargo Guarnieri, São Pedro e Diadema) apresentaram menores tempos de reverberação em comparação com as maiores (Municipal, Memorial e Sérgio Cardoso). Porém, algumas sutilezas do comportamento do tempo de reverberação em função da frequência podem ser melhor entendidas quando observamos as particularidades do tratamento acústico de cada teatro.

Gráfico 5.1.1: RT 60 geral Maestro

O Memorial, que tem praticamente todas as paredes cobertas por carpetes, e o Municipal, que também é bastante acarpetado, são as salas que mais dispõem de material

absorvedor. O Camargo Guarnieri e principalmente o São Pedro têm relativamente pouca quantidade de material de absorção. Isso explica porque esses teatros apresentam tempos de reverberação mais estáveis nas altas frequências quando em comparação com teatros maiores, porém mais absorvedores.

Gráfico 5.1.2: RT60 geral platéia centro-frente

Gráfico 5.1.3: RT60 geral platéia centro lado

O Sérgio Cardoso, que também é um teatro usado para arte dramática, possui um palco com 13.676 metros cúbicos, que é por si só um volume maior do que o de alguns teatros. Isso resulta numa câmara reverberante cujos efeitos podem ser comprometedores, quando não bem controlados. A presença de alguns painéis em torno do espaço da orquestra não se mostrou suficiente para diminuir os efeitos do excesso de reverberação causado pela câmara reverberante e o resultado pode ser observado tanto no gráfico de RT60 do Sérgio Cardoso quanto nas amostras musicais lá registradas [*beethoven_palco_sc_nor_RT1* e *tchai_palco_sc_nor_RT2*].

O Municipal, cuja arquitetura é visivelmente voltada para a ópera, também apresenta um palco de grandes dimensões. Entretanto, quando o espetáculo é estritamente musical, os dispositivos de isolamento entre a orquestra e a área restante do palco são, no

caso do Municipal, bem mais eficientes que no caso do Sérgio Cardoso, o que pode ser notado pelos valores comportados de RT60 no Municipal.

O Memorial, mesmo não tendo uma câmara reverberante no palco, como no caso dos teatros anteriormente citados, apresenta valores de RT60 maiores do que no Municipal, principalmente no palco, que no caso do Memorial situa-se em uma área mais livre, sem abrigo, contando apenas com um conjunto de painéis removíveis que é eventualmente colocado em torno dos músicos.

Dentre todos os teatros medidos o que apresentou acústica mais seca foi o Teatro de Diadema.

Com exceção do Teatro Municipal, que apresenta maior variedade de locais para escuta, os tempos de reverberação se mostraram, em geral, uniformes para cada teatro, ou seja, não detectamos grandes variações de RT60, para cada faixa de frequência, dentro de uma mesma sala. Entretanto, existem grandes diferenças na percepção auditiva conforme mudamos de lugar num mesmo teatro, como pode ser verificado através das amostras musicais gravadas para a análise do parâmetro RDR. Isso mostra como o parâmetro RT60 é absolutamente insuficiente para caracterizar a acústica de uma sala.

Verificamos que mesmo impressões como vivacidade e reverberação, usualmente atribuídas ao RT60, mudavam bastante de acordo com os diversos locais de escuta dentro de uma mesma sala, ainda que o parâmetro RT60 não apresentasse variações na mesma proporção. Certamente, deveria haver outro (s) parâmetro(s) que exercesse, juntamente com o RT60, uma forte influência sobre a impressão de reverberação. Esse parâmetro é a razão de som direto / reverberante, conforme veremos mais adiante.

5.1.1 Escuta dirigida para RT60

Nos gráficos seguintes observamos os resultados numéricos relativos à análise subjetiva para o parâmetro RT60.

Gráfico 5.1.4: Grupo RT1 e RT2

Seguindo a definição do parâmetro o RT60, torna-se mais conveniente a escolha de amostras musicais impulsivas, após as quais uma pausa musical permite que se ouça a resposta reverberante da sala. Assim sendo, escolhemos passagens de ataque do naipe de metais nos dois primeiros grupos de amostras. Nos dois outros grupos executamos passagens mais longas, de metais e vozes.

Nos dois primeiros grupos de amostras (RT 1 e RT 2) podemos constatar a resposta seca do Teatro de Diadema em contraposição à resposta excessivamente reverberante no

palco do Sérgio Cardoso. Em níveis intermediários encontram-se os teatros do Memorial, o Municipal e o Camargo Guarnieri.

É importante observar que na comparação de RT60 entre diferentes teatros, cada grupo de amostras diz respeito a um determinado local de captação. Nos grupos 1 e 2 estamos comparando amostras de palco e no grupo 4, amostras de platéia lateral.

Gráfico 5.1.5: Grupo RT4

O grupo 3 traz amostras gravadas em duas posições diferentes no Teatro Municipal, que apresenta valores de RT60 que variam conforme o local de captação.

Gráfico 5.1.6: Grupo RT3

Conforme as indicações de Beranek (2004) os resultados de RT60 para o Teatro Municipal o colocam essencialmente como um teatro bom para ópera, os teatros São Pedro e Camargo Guarnieri propícios para música de câmara ou reduzidas formações orquestrais.

5.2 Equilíbrio entre graves e agudos

Nesta seção vamos tratar dos parâmetros BR (*bass ratio*) e TR (*treble ratio*). O parâmetro BR é usualmente relacionado ao calor acústico, ou à presença de graves. O parâmetro TR é normalmente relacionado ao brilho acústico. Eles fazem parte do conjunto de parâmetros inicialmente propostos por Beranek (1962), porém, não é grande a frequência com que aparecem na bibliografia desde então.

Os valores de BR e TR apresentam relativamente pouca variação entre as diversas posições de captação numa mesma sala. Esse fato foi observado em todos teatros e pode ser verificado nas tabelas da seção de resultados. Ambos os parâmetros são bem sintéticos, isto é, se reduzem a um número para cada posição de captação. Isso nos permitiu calcular a média e o desvio padrão entre todas as posições para cada sala e condensar as informações em um único gráfico. O resultado é exibido a seguir

Tabela 5.2: BR e TR geral

	BR (med)	Desvio		TR (med)	Desvio
CG	0,853	0,076	CG	0,966	0,040
TD	1,503	0,089	TD	0,792	0,025
ME	1,016	0,055	ME	0,650	0,026
TM	1,254	0,101	TM	0,845	0,058
SP	1,073	0,073	SP	0,911	0,035
SC	2,169	0,065	SC	0,708	0,065

Gráfico 5.2.1: BR e TR geral

As grandes dimensões da câmara reverberante no palco do Sérgio Cardoso fazem com que as ondas de baixas frequências tenham longos tempos de reverberação, gerando valores de BR demasiadamente altos.

O teatro de Diadema apresenta aberturas incomuns nas laterais do palco, ocasionando um aumento considerável na largura desse setor. Essa região torna-se propícia para o confinamento de ondas de baixas frequências, ocasionando valores de BR relativamente altos.

Além de ser o teatro mais estreito, o Camargo Guarnieri é o único que apresenta em toda a extensão lateral grande quantidade de superfície de madeira funcionando como membranas dissipadoras de energia das ondas de baixa frequência, o que resultou nos menores valores de BR.

A julgar pelas suas grandes dimensões e pelo excesso de material absorvedor, o que determinaria uma grande diferença entre os tempos de reverberação entre graves e médios, o Teatro do Memorial seria um forte candidato a apresentar altos valores de BR. Isso só não acontece em razão do teto parabólico que faz com que a altura do teatro diminua

gradativamente, atenuando a reverberação dos graves, perceptível no resultado acústico “metálico” e “ardido” da amostra tomada na platéia central da sala [bruckner_plateia_centro_me_nor_BReTR3].

As paredes descobertas e lisas dos teatros São Pedro e Camargo Guarnieri resultaram nos maiores índices de TR e o excesso de material absorvedor no Memorial causou os menores valores desse parâmetro.

Seguindo as orientações bibliográficas, analisamos as amostras musicais gravadas nos teatros de maior BR esperando perceber maior presença de graves nesses teatros. Isso não aconteceu. A presença dos graves percebida nas amostras não acompanhava a indicação dos valores de BR, isto é, teatros que apresentaram grande diferença entre si nos valores de BR não apresentaram a mesma diferença na percepção auditiva da presença dos graves, o que pode ser verificado fazendo-se uma comparação entre as amostras gravadas e o gráfico geral de BR e TR.

Basta uma observação mais atenta na definição do parâmetro BR para concluirmos que de fato não faz muito sentido esperarmos que ele seja bem correlacionado com a presença de graves. O parâmetro BR engloba variáveis de RT60, que informam a *rapidez* do decaimento da energia acústica. A presença de graves deve estar mais relacionada à *intensidade* com que as ondas de baixas frequências atingem um determinado ponto de captação. Devemos, portanto, esperar melhor correlação entre tal impressão e o parâmetro G (*strength*), tomado para baixas frequências.

Embora ainda referências modernas (Henrique, 2002) apresentem o referido equívoco, a conclusão anterior é confirmada por referências mais específicas e atualizadas. Em seu mais recente trabalho, Beranek (2004) associa a impressão de presença dos graves ao novo parâmetro G_{low} que é a média dos valores do parâmetro G entre 125 Hz e 250 Hz.

A análise do parâmetro TR revelou fato semelhante. Encontramos amostras que eram muito mais “opacas” do que outras, apresentando, entretanto, praticamente os mesmos valores de TR. Seguindo o mesmo raciocínio usado para o parâmetro BR, podemos esperar que a impressão de brilho acústico esteja relacionada não a uma razão entre valores de RT60, mas à quantidade de energia de ondas de alta frequência captadas. Embora não apareça em nenhuma referência estudada, torna-se natural propor o emprego de outro novo parâmetro, o G_{high} , média dos valores do parâmetro G entre 2 KHz e 4 KHz, o qual, espera-se, esteja melhor relacionado ao brilho acústico.

5.2.1 Escuta dirigida para BR e TR

A audição das amostras gravadas revelou uma outra utilidade, bastante importante do ponto de vista musical, para os parâmetros BR e TR. Ao contrário do que foi constatado anteriormente, essa nova utilidade está em perfeito acordo com a definição dos parâmetros.

O parâmetro BR é a razão entre os RT60 de graves e médios e o TR é razão entre os RT60 de agudos e médios. Observamos que as salas que apresentavam valores de BR próximos aos de TR soavam mais equilibradas com respeito à reverberação entre graves e agudos, enquanto que nas salas que apresentavam maiores discrepâncias entre esses parâmetros ouvia-se um desequilíbrio indesejável na reverberação entre graves e agudos.

Os dois primeiros grupos de amostras gravadas (BR e TR1, BR e TR2) são exemplos de *pizzicatos*¹² tocados por um naípe inteiro de cordas. Nas salas onde BR é maior do que TR (Teatro de Diadema, Municipal e Memorial) há uma perceptível “sobra” de graves quando em comparação com teatros em que os valores de BR e TR são mais

¹² Passagem musical em que o naípe de cordas toca os instrumentos com a ponta do dedo indicador.

próximos (Camargo Guarnieri e São Pedro) nos quais o decaimento sonoro entre graves e agudos é mais uniforme e agradável.

As conseqüências musicais desse desequilíbrio vão desde uma execução aparentemente infiel do texto musical (notas de mesma duração soando com diferentes durações) até a sensação de que os naipes estão tocando de forma desencontrada.

No terceiro grupo de amostras (BR e TR3) um ataque do naipe de metais apresenta sobra de graves muito mais evidente no Teatro Sérgio Cardoso do que nos demais teatros.

Os dois últimos pares de amostras (TR e TR2) dizem respeito à impressão de brilho acústico. No grupo TR1 a amostra aparentemente mais brilhante [*strauss_plateia_centro_cg_nor_TR1*] apresenta, de fato, valor de TR (0,96) maior que o da outra (0,65) amostra [*strauss_plateia_lado_me_nor_TR_2*]. Porém, no grupo TR2 as amostras apresentam praticamente o mesmo valor de TR (0,84), embora uma soe bem mais opaca do que outra.

Concluimos, portanto, que a utilidade dos parâmetros BR e TR se restringe à importância que eles apresentaram como critérios eficientes para a avaliação do equilíbrio entre frequências dentro de uma sala.

5.3 Clareza ou Definição

O parâmetro C80 mede a razão entre a energia acústica que chega em um ponto de captação nos primeiros 80 ms e a energia remanescente. Essa distribuição de energia ao longo do tempo é determinada por características peculiares de cada teatro. Dada a diversidade de peculiaridades observadas nas salas que analisamos, é de se esperar também uma variedade no comportamento de C80.

Por exemplo, a platéia do teatro São Pedro tem forma de concha e há pouco material absorvedor nas superfícies. Isso faz com que as ondas de alta frequência transitem mais pelo teatro, causando os menores valores de C80 para essa faixa de frequência. No Memorial há um excesso de material absorvedor e a distância entre as paredes laterais é muito grande. Além disso, o teto parabólico transforma os fundos da platéia num calabouço para ondas de alta frequência. Como resultado, os valores de C80 para essa faixa de frequência na posição central do Memorial foram os maiores.

Os valores de C80 no palco foram maiores que os da platéia em todos os teatros. Isso é desejável por facilitar o trabalho do maestro e tornar a audição mais agradável para o público.

As laterais estendidas do palco do Teatro de Diadema, já descritas na análise do parâmetro BR, resultam nos menores valores de C80 para baixas frequências, na posição do maestro, ainda que seus valores de RT60 sejam relativamente baixos.

A partir de um ponto de vista conceitual, somos induzidos a esperar que quanto maior a reverberação numa sala, menor será a clareza. Nas salas estudadas por Beranek (2004: 529) foi calculado um coeficiente de correlação igual a -0,84 entre os parâmetros C80 e RT60. Isso significa que esses parâmetros, pelo menos nas salas estudadas (a maior parte em formato retangular), tendem a seguir comportamentos contrários.

Devemos, entretanto, tomar cuidado com a interpretação estatística desse resultado.

A tendência apontada anteriormente se reflete num fato facilmente observável: os aglomerados de curvas de RT60 em função da frequência são descendentes, enquanto que os de C80 em função das mesmas frequências são ascendentes.

Gráfico 5.3.1: C80 geral Maestro

Gráfico 5.3.2: C80 geral platéia centro-frente

Gráfico 5.3.3: C80 geral platéia lateral

Esse resultado deve-se ao fato de que ondas de baixas frequências são mais difusas e transpõem melhor os obstáculos, enquanto que as de altas frequências são mais direcionais e mais suscetíveis de serem absorvidas em cada incidência sobre uma superfície. Assim, as ondas de baixas frequências serão captadas por mais tempo e sofrerão um decaimento menos acentuado do que as de altas frequências, ou seja, maior RT60 e menor C80. O mesmo raciocínio se aplica às ondas de alta frequência, levando a um RT60 menor e C80 maior.

Porém, constatamos que essa regra geral vale para tendências estatísticas com respeito à frequência, mas nem sempre para comparação direta entre valores isolados; isto é, dada uma determinada frequência, não podemos olhar no gráfico de RT60, tomar o valor de um teatro que esteja abaixo de todos os outros e afirmar que ele estará acima de todos os outros no gráfico de C80. Por exemplo, o Municipal apresenta os maiores valores de C80

no palco, entretanto seus valores de RT60 estão numa região intermediária com relação aos outros teatros. O teatro de Diadema é o que apresenta menores valores de RT60, porém, é o que tem menores valores de C80 na região dos graves, e na região dos agudos está numa zona intermediária.

Podemos compreender tais possibilidades se observarmos os conceitos mais atentamente. O RT60 informa *quanto tempo* dura o decaimento, mas o C80 informa *como* esse decaimento se dá. Para um mesmo tempo de decaimento podemos ter várias possibilidades de distribuição de energia ao longo do tempo, ou seja, para um mesmo valor de RT60 há diversos valores possíveis de C80.

Esse fato pode ser facilmente verificado quando observamos os parâmetros medidos em alguns teatros. Por exemplo, as três diferentes posições de captação na platéia central do São Pedro apresentaram praticamente o mesmo RT60, porém seus valores de C80 são bastante diferentes; o mesmo vale para as posições do balcão daquele mesmo teatro. Um caso ainda mais acentuado é o dos pisos superiores (balcões e galeria) do Teatro Municipal, que também apresentam valores de RT60 semelhantes entre si, mas os valores de C80 divergem fortemente. Certamente outros parâmetros devem estar influenciando a Clareza.

Como já mencionamos, a referência temporal para o cálculo de C80 é 80 ms. Considerando um decaimento linear em dB, já observado nos resultados da salas, e utilizando uma regra de três simples, podemos calcular que em 80 ms o decaimento de energia é de 3,2 dB, para o caso de um RT60 de 1,5 s. Seria grosseiro demais tentar estimar o que acontece nos primeiros 3,2 dB a partir de um resultado válido para o decaimento de 60 dB. É mais razoável esperar uma correlação melhor entre C80 e um valor referente ao intervalo de tempo relacionado aos primeiros instantes de decaimento da energia.

Já conhecemos um parâmetro relacionado ao decaimento de energia nos primeiros instantes da reverberação. Este parâmetro é o EDT (*early decay time*), que como já

mostramos é calculado tomando-se a inclinação de decaimento apenas para os primeiros 10 dB. Na análise dos gráficos de decaimento do Camargo Guarnieri, na posição do maestro, notamos como é possível que haja valores de EDT muito diferentes para valores de RT60 bastante semelhantes:

Figura 5.3.1: EDT1 x RT60

Figura 5.3.2: EDT2 x RT60

Figura 5.3.3: EDT3 x RT60

Seguindo o raciocínio anterior, podemos esperar que seja mais provável uma relação entre EDT e C80, de tal forma que olhando para o gráfico de um poderíamos estimar o comportamento do outro, algo que como já vimos é mais difícil entre C80 e RT60. O próximo passo é comparar os três parâmetros (RT60, C80 e EDT) nas mesmas posições de captação.

Gráficos 5.3.4: EDT x C80 x RT60

Gráficos 5.3.5: EDT x C80 x RT60

Dentro de cada setor os valores de RT60 são praticamente os mesmos. Os valores de C80 assumem valores diferentes entre as posições de cada setor. Podemos agora observar alguns resultados interessantes. Os valores de C80 na posição centro-meio do São Pedro são menores que os da posição centro-trás. Para o mesmo setor o comportamento de EDT é inverso: a posição centro-meio apresenta maiores valores de EDT do que a posição centro-trás. No setor dos balcões do São Pedro esse fato se repete: a posição que estava em cima no gráfico de C80 está em baixo no gráfico de EDT. A mesma inversão ocorre no setor dos pisos superiores do Municipal. O que esses gráficos querem expressar vai de encontro à hipótese inicial segundo a qual quanto maior a clareza menor a reverberação e vice-versa. O detalhe importante é que essa relação diz respeito aos primeiros instantes da reverberação (EDT) e não à reverberação total (RT60). No caso em que o EDT sofre pouca variação entre as posições de captação (setor central do Diadema) observamos que o C80 também apresenta variações menores.

Seria muito bom se as relações de previsibilidade entre C80 e EDT fossem sempre tão bem comportadas. Infelizmente não é o que acontece, como veremos a seguir.

Gráficos 5.3.6: RT 60 x C80

Gráfico 5.3.7: EDT x C80

Em alguns casos, como no Sérgio Cardoso, a relação de proporcionalidade inversa entre EDT e C80 não se verificou para todas as frequências. Apesar desse fato, a conclusão mais importante a ser tomada, e que permanece válida para todos os casos observados, é que Clareza musical é muito mais sensível ao decaimento nos primeiros instantes de reverberação do que na reverberação total.

Essa conclusão aparece em trabalhos mais recentes (Beranek, 2004: 23) e é importante para compreendermos alguns resultados acústicos observados. Por exemplo, o Teatro Sérgio Cardoso apresenta excessivos valores de RT60. Antes da conclusão a que chegamos, poderíamos ficar temerosos quanto à Clareza percebida naquele teatro. Entretanto, observamos que seus valores de EDT são bem menores que os de RT60, principalmente nas baixas frequências. Os valores de EDT no Sérgio Cardoso estão dentro da média com relação aos outros teatros, isso explica a posição intermediária ocupada pelo Teatro Sérgio Cardoso no gráfico geral de C80, que também pode ser verificada nas amostras gravadas [*glinka_plateia_centro_sc_nor_C80_2*].

A variação relativamente baixa entre os valores de RT60, para cada faixa de frequência, dentro de uma mesma sala, permitiria condensar os resultados de cada sala em

uma única curva em termos das médias e dos desvios padrões. O parâmetro C80, conforme vimos, é muito mais dinâmico e variável. Dada uma faixa de frequência, podemos indicar o valor de RT60 para uma determinada sala como um todo, mas no caso de C80, dizer a frequência é insuficiente, pois a posição de captação dentro da sala faz bastante diferença. Não faz sentido, portanto, expressar um valor de C80 para determinada sala como um todo, em função das frequências, como pode ser feito para o parâmetro RT60.

5.3.1 Escuta dirigida para C80

O primeiro grupo de amostras C80 traz o som de um único instrumento (clarineta). No caso de maior clareza é possível perceber com mais nitidez e com uma certa “dureza” a articulação das notas [*clarineta_palco_tm_nor_C80_1*]. Menor clareza se reflete numa articulação mais “macia” [*clarineta_plateia_lado_sp_nor_C80_1*].

Gráfico 5.3.8: Grupo C80 1

O segundo grupo de amostras C80 mostra o caso de uma passagem sinfônica em que as cordas articulam com grande velocidade. Essas articulações são mais perceptíveis para maiores valores de C80 [*glinka_palco_cg_nor_C80_2*] e soam mais confusas para menores valores de C80 [*glinka_galeria_tm_nor_C80_2*]. Em certos casos percebemos como uma mesma amostra [*glinka_plateia_centro_td_nor_C80_2*] pode apresentar baixa Clareza nos graves e mais Clareza nos agudos.

Gráfico 5.3.9: Grupo C80 2

No setor dos pisos superiores do Teatro Municipal notamos uma diferença considerável. Os valores de C80 para o balcão são bem maiores do que para a galeria. Segundo Beranek (2004: 548) isto se deve ao fato de que um balcão infiltrado evita que muitas reflexões, principalmente vindas da parte de cima do teatro, cheguem aos ouvintes, causando assim maiores índices de C80.

Figura 5.3.4: Um balcão ideal

No caso de um balcão ideal, a distância D não deve ser muito maior que a distância H , para evitar que as últimas fileiras do balcão sejam prejudicadas.

No Teatro Municipal a galeria, que é o último piso, recebe diretamente as reflexões vindas da cúpula, resultando numa drástica redução de Clareza.

Um fato curioso é que ao acompanhar de um balcão a sua ópera “A Flauta Mágica”, em 1791, Mozart teria afirmado: “você não faz idéia de como a música soa agradável quando ouvida de um balcão próximo à orquestra - ela soa muito melhor do que na galeria...” (Beranek, 2004: 26). Essa declaração é perfeitamente compreensível, pois a execução de obras clássicas, principalmente operísticas, requer um grau maior de Clareza do que, por exemplo, a execução de obras românticas.

Ainda no segundo grupo de amostras podemos verificar a diferença de Clareza entre balcão e galeria comparando $[glinka_balcao_tm_nor_C80_2]$ com $[glinka_galeria_tm_nor_C80_2]$. Notar que ambos os lugares apresentam praticamente o mesmo valor de RT60.

No terceiro e último grupo de amostras exibimos a diferença de Clareza entre o palco e a platéia central do Teatro Municipal.

Gráfico 5.3.10: Grupo C80 3

5.4 Intimismo e proximidade

Nesta seção trataremos dos parâmetros RDR (razão de som direto / reverberante) e ITDG (*initial time delay gap*). Na literatura, o ITDG está relacionado com a impressão de intimismo acústico e aparece mais freqüentemente do que o RDR.

Para calcular o ITDG é necessário observar o gráfico da resposta impulsiva e nele identificar o instante da captação do som direto e o instante da chegada da primeira reflexão, como exemplificamos a seguir:

Figura 5.4.1: Exemplo de ITDG – Camargo Guarnieri – platéia fundos

O eixo horizontal no gráfico anterior marca o tempo em segundos (para os demais gráficos desta seção o eixo horizontal será dado em amostras). Observamos que o som direto chega em 49,5 ms e a primeira reflexão em 61 ms. O intervalo entre esses dois instantes (11,5 ms) é o ITDG.

Observando os gráficos de resposta impulsiva, por várias vezes encontramos dificuldade em identificar os instantes necessários ao cálculo de ITDG. O instante da chegada do som direto é sempre bastante nítido, mas o da primeira reflexão nem sempre. Vamos observar alguns desses casos:

Figura 5.4.2: RI – Sérgio Cardoso – platéia frente

Fifura 5.4.3: RI – Municipal – balcão lateral

Neses casos, assim como em alguns outros, é difícil distinguir o instante da primeira reflexão. Também pode acontecer de haver dúvida quanto à determinação de qual pulso seja a primeira reflexão, como nos exemplos seguintes:

Figura 5.4.4: RI – Camargo Guarnieri – platéia lateral

Figura 5.4.5: RI – Memorial – platéia fundos

Apesar de se tratar da minoria dos casos, torna-se evidente que às vezes é necessária uma boa dose de arbitrariedade para a determinação do ITDG.

Um outro dilema é quanto à faixa de valores do ITDG. A literatura informa (Beranek, 2004) que para as salas de concerto do porte das que analisamos, o valor deve girar em torno de 15 ms. Entretanto, segundo uma convenção proposta pelo próprio Beranek, esse valor é sempre tomado na posição central da platéia. Curiosamente, foi essa a posição que mais freqüentemente apresentou dificuldades para a identificação do ITDG.

Em outras posições de captação os valores de ITDG foram bem diferentes daqueles propostos por Beranek. Verificamos duas faixas de valores. Uma para ITDGs menores, entre 2ms e 5ms, geralmente tomados numa posição de captação próxima a alguma superfície, e outra para ITDGs maiores, condizentes com os valores propostos por Beranek.

Os valores de ITDG menores certamente se devem ao caso trivial de haver alguma superfície próxima ao local de captação. A primeira reflexão, nesse caso, deve-se provavelmente a essa superfície. Deste modo, a sala como um todo, cujas reflexões chegam posteriormente, não aparece como fator determinante para o ITDG.

Os valores maiores de ITDG, estes sim são causados por uma primeira reflexão que chega do teatro como um todo, e são mais condizentes com o significado da impressão de intimismo que se quer relacionar ao ITDG.

No gráfico a seguir as duas faixas de valores estão bem explícitas:

Gráfico 5.4.1: ITDG 1 e ITDG 2

Convencionamos a nomenclatura de ITDG1 para valores menores que 5 ms e ITDG2 para valores maiores. Em todos os teatros observamos de maneira irregular tanto casos de ITDG1 como de ITDG2, conforme consta na seção de resultados. O gráfico anterior resume o que foi obtido em cada uma das salas.

5.4.1 O Parâmetro RDR

O parâmetro RDR é a razão entre a energia direta e a energia reverberante captadas em determinado ponto. O valor do parâmetro RDR é obtido tomando-se como referência o instante de chegada da primeira reflexão. A energia compreendida entre a captação do som direto e da primeira reflexão é a energia direta, e após o instante da primeira reflexão é a energia reverberante.

O gráfico a seguir mostra os valores de RDR calculados em três setores diferentes para cada teatro, conforme o que foi obtido na seção de resultados :

Gráfico 5.4.1.1: RDR geral

Observamos um interessante padrão no qual as posições de palco apresentam altos valores de RDR, as posições do fundo da platéia apresentam RDR baixo e as posições centrais, valores intermediários. Isso mostra que o RDR é um bom parâmetro para indicar a distância entre fonte sonora e local de captação.

A impressão acústica de intimismo foi considerada uma das mais importantes por Beranek (1962) e aparece freqüentemente na literatura. Sua caracterização pode ser resumida como sendo

a sensação auditiva de se estar perto da fonte sonora. Quando uma sala tem intimismo, a música nela executada soa como se fosse executada numa sala pequena, isto é temos a sensação que estamos numa sala pequena mesmo que não o seja. O intimismo depende essencialmente do intervalo de tempo entre o som direto e a primeira reflexão, ou seja, do ITDG, mas também secundariamente do tempo de reverberação (Henrique, 2002: 791).

Segundo a citação acima, deve-se esperar que quanto maior o ITDG, maior a impressão do volume da sala, e maior a impressão de distância da fonte sonora.

Vamos analisar alguns resultados:

Gráficos 5.4.1.2: ITDG x RDR

Conforme estipulado na seção de resultados, as siglas M, V, CF, CM, CT, LF e LT indicam respectivamente a captação nas posições de maestro, violino, centro frente, centro meio, centro trás, lado frente e lado trás.

Podemos notar várias inconsistências a respeito do que se esperava do parâmetro ITDG. Primeiramente, observamos que nesses casos ele não cresce conforme aumenta a distância entre fonte sonora e ponto de captação. Seu comportamento é irregular, ao contrário do parâmetro RDR que apresenta uma tendência bastante estável de diminuição conforme aumenta a distância.

Outra incongruência pode ser constatada quando analisamos as platéias centrais desses teatros:

Figura 5.4.1.1: RI - Platéia central Memorial

Figura 5.4.1.2: RI - Platéia central Diadema

A chegada do som direto se dá praticamente no mesmo instante nos dois casos: 35,8 ms (1580 amostras) no Memorial, e 34,9 ms (1540 amostras) em Diadema. Multiplicando-

se esses valores pela velocidade do som (344 m/s) chegamos à distância entre microfone e fonte: aproximadamente 12 m nos dois teatros. Esse valor coincide com os medidos nas salas, o que pode ser conferido na seção de resultados. O ITDG no Memorial é dado por: $(1650-1580) \times 44100 = 1,6$ ms. Em Diadema o ITDG será 5,2 ms se considerarmos a primeira reflexão na amostra 1770, e 9,8 ms se a considerarmos na amostra 1980. De qualquer forma o ITDG em Diadema é bem maior que no Memorial, entretanto a sala do Memorial é muito maior que em Diadema. Para as mesmas posições, o valor de RDR em Diadema é 63,5% e no Memorial é 69,4%.

Isso mostra que o ITDG é bastante sensível às particularidades arquitetônicas de cada teatro, ao contrário do RDR que mais uma vez demonstrou estabilidade e coerência. O ITDG como critério de qualidade acústica parece ser válido apenas para grandes salas de concerto, e somente para posições centralizadas.

Um outro fato importante é que apesar de o ITDG lhe servir de referência, o parâmetro RDR se mostrou pouco sensível às arbitrariedades e aos dilemas observados na análise do ITDG. Por exemplo, na resposta impulsiva da platéia dos fundos do Memorial (Figura 4.4.5) observamos 2 pulsos que chegam após o som direto. O primeiro aparece no instante da amostra 3080 que, para uma frequência de amostragem de 44100Hz, representa 69,8 ms. O segundo chega na amostra 3295 (74,7 ms). O instante de chegada do som direto é 67,8 ms (2990 amostras). No primeiro caso o ITDG considerado seria de 2ms e no segundo caso de 6,9 ms. Como pode ser observado na seção de resultados, o RDR para o primeiro caso é de 59,2 %, e para o segundo chega a 66,3 %. O valor de ITDG foi mais do que triplicado e o RDR subiu apenas alguns pontos percentuais. Isso mostra que o RDR está muito mais relacionado à forma de onda da resposta impulsiva do que propriamente ao instante da primeira reflexão que lhe serve como referência. Tal fato foi observado com frequência em todos os teatros.

5.4.2 Escuta dirigida para ITDG e RDR

No grupo ITDG e RDR1 exibimos amostras gravadas em três diferentes posições de captação no Teatro Sérgio Cardoso. Conforme consta na seção de resultados, o valor de ITDG no palco é 4,5 ms. O balcão apresentou um valor de ITDG parecido (4,5 ms) e a platéia central curiosamente apresentou o menor valor (2 ms), e um RDR de 61 %. Os valores de RDR para palco e balcão foram respectivamente 88,5% e 28,3%.

Considerando a estabilidade do parâmetro RDR, e aproveitando a coincidência dos valores de ITDG, calculamos o RDR para a platéia central utilizando uma referência temporal de 4,5 ms em vez de 2ms. O valor de RDR subiu de 61% para 65,5%, permanecendo ainda assim na mesma faixa de valores intermediários.

Tínhamos então uma situação interessante: três amostras com a mesma referência temporal para ITDG, e praticamente os mesmos valores de RT60 (já que todas foram captadas no mesmo teatro). Lembramos ainda que todas as amostras foram igualmente normalizadas. A escuta das amostras desse grupo não deixa dúvidas quanto às diferenças na percepção acústica que elas provocam: a impressão de intimismo muda bastante. Embora ITDG e RT60 estejam estacionados, o parâmetro RDR diminui conforme se vai do palco ao balcão. Conforme será verificado na análise subjetiva, as amostras que apresentaram menor RDR dão impressão de maior distância e maior volume de sala.

Concluímos então que o intimismo decresce junto com o parâmetro RDR, mas não necessariamente se correlaciona com o ITDG, muito menos com RT60.

É importante notar que cada um dos cinco grupos engloba amostras que foram colhidas nos mesmos teatros, apresentando, dentro de cada grupo, valores aproximadamente iguais de RT60. Fato notável é que mesmo assim a impressão de reverberação muda bastante. As amostras que apresentam menor grau de intimismo parecem soar mais reverberantes. Durante a análise subjetiva, quando estava sendo

indagado sobre o aparente tamanho da sala em que as amostras exibidas foram gravadas, um professor do Departamento de Música afirmou que ele estava se deixando levar pelo fato de que a amostra mais reverberante parecia ser aquela gravada numa sala maior. Entretanto, como já afirmamos, as duas amostras exibidas foram gravadas na mesma sala, e tinham praticamente o mesmo valor de RT60, apenas o parâmetro RDR variava.

Logo, o parâmetro RDR também é determinante na impressão de reverberação, juntamente com RT60, conclusão que já havíamos prenunciado no final da seção 5.1.

Em síntese, o parâmetro RDR está ligado às impressões subjetivas de proximidade, intimismo e reverberação. Levamos esse fato em consideração nos questionamentos da análise subjetiva. Perguntamos a uma parte do júri qual amostra deveria ter sido gravada numa sala maior, e à outra parte, qual amostra parecia estar mais distante. Embora não conste nos dados da análise subjetiva, perguntamos também qual eles achavam mais reverberante. O comportamento estatístico dos julgamentos é o mesmo independentemente de qual impressão esteja sendo questionada, o que demonstra a relação do parâmetro RDR com as três impressões subjetivas.

Quanto às suas aplicações, o parâmetro RDR pode ser útil como ferramenta auxiliar em simulações acústicas ou como monitoração do ponto de mixagem nos estúdios de gravação.

Como critério de comparação entre qualidade acústica de salas de música, ele passará a ser mais útil a partir da padronização de distâncias de captação, isto é, convencionaríamos a distância entre microfone e fonte sonora (10 e/ou 20 metros, por exemplo) e calcularíamos o RDR em várias salas, analisando as diferenças. Nesse sentido o parâmetro RDR poderia ser usado em conjunção com o parâmetro G, uma vez que este segundo parâmetro informa, a partir de energia da fonte, quanta energia está chegando em um ponto de captação, ao passo que o parâmetro RDR informa, a partir da energia que está

chegando a esse ponto de captação, o quanto se deve à energia direta em comparação com a reverberante.

5.5 Espacialidade

A impressão acústica de espacialidade está associada ao parâmetro acústico LFC (*lateral fraction*). Esse parâmetro é dado pela porcentagem de energia vinda das laterais com relação à energia omnidirecional. A literatura (Schroeder, 1979) informa que quanto maior essa porcentagem, tanto melhor; e que é mais provável a ocorrência dessa condição satisfatória em salas relativamente estreitas.

O gráfico abaixo mostra os resultados que obtivemos nas salas analisadas:

Gráfico 5.5.1: LCF geral

O gráfico mostra que o parâmetro LFC é bem maior quando tomado nas posições laterais, confirmando as indicações de que a proximidade com as laterais de fato aumenta o valor desse parâmetro, o que nos ajuda a compreender a preferência pelas salas estreitas.

Vamos agora focalizar as posições de maestro e platéia central:

Gráfico 5.5.2: LFC nas posições centrais

Na posição de maestro, a sala que apresentou maior LFC foi o Teatro São Pedro, que de fato é tido como “aconchegante” pelos músicos que já tocaram nele. A largura do palco do São Pedro é a menor dentre todas as medidas (10 m), e as paredes laterais apresentam uma inclinação que ajuda a dar suporte ao músico no palco.

Na posição de platéia central, a sala que apresentou maior LFC foi o Camargo Guarnieri, que também é a sala mais estreita nessa posição de platéia. Ainda na platéia central, o menor valor de LFC foi obtido no Memorial, que apresenta nessa posição uma largura de 35m.

Analisando qualitativamente, como podemos observar, o gráfico faz sentido; mas do ponto de vista quantitativo constatamos um problema: seus valores são bem menores do que aqueles que normalmente aparecem na literatura. Essa diferença provavelmente foi causada por uma possível descalibração interna entre o captador figura 8 e o captador omnidirecional do microfone *Neumann U-87* utilizado.

O parâmetro LFC pode ser empregado em conjunção com o parâmetro G e o IACC. O parâmetro G informa, com relação à energia da fonte, quanta energia está chegando em um ponto de captação. Dessa energia, o *quanto* vem das laterais é dado pelo LFC e *como* ela vem das laterais é informado pelo IACC.

Não realizamos análise subjetiva nem grupo de amostras para escuta dirigida com referência ao parâmetro LFC, uma vez que tal procedimento só faria sentido mediante a utilização de dispositivos biauriculares dos quais não dispúnhamos na ocasião em que esta pesquisa foi realizada.

5.6 Análise subjetiva

5.6.1 Seleção de amostras gravadas a serem exibidas ao júri

Considerando que todos os parâmetros atuam durante todo o tempo da execução musical, constatamos que poderia ser bastante difícil, dada uma amostra qualquer, que o júri conseguisse abstrair uma impressão específica relativa a um determinado parâmetro.

Para que a análise subjetiva lograsse êxito, precisaríamos cumprir dois requisitos: o júri deveria compreender o significado de cada um dos parâmetros e deveria ter a oportunidade de analisá-los auditivamente de maneira inequívoca. Sendo assim, selecionamos as amostras que melhor representavam cada parâmetro, tanto do ponto de vista conceitual (matemático) quanto do ponto de vista acústico.

Também era importante que o questionário apresentado ao júri não se tornasse exaustivo, o que poderia facilmente ter acontecido, dada a exposição sensorial a que o júri seria submetido. Portanto foi necessário minimizar o número de questões e de amostras exibidas.

É bom salientar que o objetivo desse trabalho concentra-se exclusivamente no esforço de se compreender e de se analisar os parâmetros acústicos. Assim, a seleção de amostras gravadas que utilizamos para a análise subjetiva se restringe a um conteúdo que julgamos suficiente para que cada um dos parâmetros fosse bem caracterizado.

Os grupos foram montados de forma a exibir amostras que apresentavam valores extremos de cada parâmetro, e algumas outras que apresentavam valores intermediários.

Realizamos análise subjetiva sobre os seguintes parâmetros: reverberação, clareza, intimismo / proximidade, e equilíbrio entre graves e agudos. Para cada um desses

parâmetros foi constituída uma pasta (presente no CD anexo) contendo os grupos de amostras gravadas em diferentes salas.

5.6.2 O júri e o questionário

A metodologia psicométrica empregada na análise subjetiva foi a Análise de Construto (Pasquali, 1999), segundo a qual

os juízes devem ser peritos na área do construto¹³, pois sua tarefa consiste em ajuizar se os itens estão se referindo ou não ao traço em questão. Uma tabela de dupla entrada, com os itens arrolados na margem esquerda e os traços no cabeçalho, serve para coletar essa informação. Uma concordância de, pelo menos, 80% entre os juízes pode servir de critério de decisão sobre a pertinência do item ao traço a que teoricamente se refere. Um número de 6 juízes será suficiente para realizar esta tarefa.

Nosso júri foi composto por 16 ouvintes de acurado discernimento auditivo, todos pertencentes ao Departamento de Música da USP: quatro professores titulares (dentre os quais um maestro) e alunos das classes de regência e de instrumento.

O questionário foi elaborado sobre os grupos de amostras relativos a cada parâmetro subjetivo (construto). Primeiramente, o júri era informado sobre qual parâmetro específico seria analisado naquele momento. Era feita uma breve explicação a respeito da impressão auditiva sobre a qual o jurado deveria se concentrar. A partir de então eram exibidos pares de amostras pertencentes a um mesmo grupo e solicitava-se que se julgasse em qual das duas amostras tal parâmetro era mais intenso ou mais perceptível. O júri recebia o sinal sonoro através de monitores de boa qualidade.

Vamos a partir daqui seguir o roteiro do questionário.

¹³ No nosso caso, ‘construto’ são os parâmetros acústicos subjetivos e ‘traço’ são os parâmetros objetivos medidos.

5.6.3 Roteiro do Questionário

Grupode amostras: RT1

Parâmetro subjetivo: reverberação

Pergunta: “Qual a mais reverberante ?”

a) [beethoven_palco_td_nor_RT1] x [beethoven_palco_tm_nor_RT1]

Como já foi explicado em seções anteriores, no item ‘a’ estamos comparando amostras normalizadas de Beethoven, presentes no grupo de amostras RT1, sendo que uma delas foi captada no palco do Teatro de Diadema e outra no palco do Teatro Municipal.

b) [beethoven_palco_tm_nor_RT1] x [beethoven_palco_sc_nor_RT1]

c) [beethoven_palco_td_nor_RT1] x [beethoven_palco_sc_nor_RT1]

Grupo de amostras: RT2

Parâmetro subjetivo: reverberação

Pergunta: “Qual a mais reverberante ?”

a) [tchai_palco_me_nor_RT2] x [tchai_palco_td_nor_RT2]

b) [tchai_palco_me_nor_RT2] x [tchai_palco_sc_nor_RT2]

c) [tchai_palco_td_nor_RT2] x [tchai_palco_sc_nor_RT2]

Os resultados para esses dois primeiros grupos vêm a seguir:

Tabela 5.6.1: Respostas do júri para os grupos RT1 e RT2

Grupo RT1		Grupo RT2	
TD	2	ME	16
TM	14	TD	0
TM	0	ME	2
SC	16	SC	14
TD	0	TD	0
SC	16	SC	16

De onde se conclui que, dentro do grupo de amostras exibidas, o júri considerou bastante evidente que o Teatro de Diadema é o mais seco e o Teatro Sérgio Cardoso é o mais reverberante. Ocupam posições intermediárias os Teatros Municipal e Memorial.

Essa avaliação está perfeitamente coerente com os resultados de RT60 medidos:

Gráfico 5.6.1: Resultados das medições relativas aos grupos RT 1 e RT2

Em alguns casos, a última pergunta relativa a cada grupo de amostras era sobre a preferência do jurado a respeito das amostras exibidas naquele grupo.

Grupo de amostras: RT1

Parâmetro subjetivo: reverberação

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Gráfico 5.6.2: Preferências para o grupo RT1

Grupo de amostras: RT2

Parâmetro subjetivo: reverberação

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Gráfico 5.6.3: Preferências para o grupo RT2

Torna-se claro que um nível intermediário de reverberação é o mais apreciado. O valor de RT60 considerado ideal dependerá da forma, do volume e do propósito ao qual a sala de destina.

Grupo de amostras: RT3

Parâmetro subjetivo: reverberação

Pergunta: “Qual a mais reverberante ?”

[tchai_palco_tm_nor_RT3] x [tchai_plateia_centro_tm_nor_RT3]

Grupo de amostras: RT4

Parâmetro subjetivo: reverberação

Pergunta: “Qual o mais reverberante ?”

[vozes_plateia_lado_td_nor_RT4] x [vozes_plateia_lado_tm_nor_RT4]

Tabela 5.6.2: Respostas do júri para os grupos RT3 e RT4

Grupo RT3		Grupo RT4	
palco TM	0	TM	16
platéia TM	16	TD	0

Gráfico 5.6.4: Resultados das medições relativas aos grupos RT3 e RT4

Grupo de amostras: C80 1

Parâmetro subjetivo: clareza

Pergunta: “Qual é a mais clara ?”

[clarineta_palco_tm_nor_C80_1] x [clarineta_plateia_sp_nor_C80_1]

[clarineta_palco_tm_nor_C80_1] x [clarineta_plateia_cg_nor_C80_1]

[clarineta_plateia_cg_nor_C80_1] x [clarineta_plateia_sp_nor_C80_1]

Grupo de amostras: C80 2

Parâmetro subjetivo: clareza

Pergunta: “Qual é a mais clara ?”

[glinka_palco_cg_nor_C80_2] x [glinka_balcão_tm_nor_C80_2]

[glinka_balcão_tm_nor_C80_2] x [glinka_galeria_tm_nor_C80_2]

[glinka_palco_cg_nor_C80_2] x [glinka_galeria_tm_nor_C80_2]

Tabela 5.6.3: Respostas do júri para os grupos C80 1 e C80 2

Grupo C80 1		Grupo C80 2	
palco TM	16	palco CG	14
platéia SP	0	balcão TM	2
palco TM	16	balcão TM	15
platéia CG	0	galeria	1
platéia CG	11	palco CG	16
platéia SP	3	galeria	0

Gráfico 5.6.5: Resultados das medições relativas aos grupos C80 1 e C80 2

Grupo de amostras: C80 1

Parâmetro subjetivo: clareza

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Grupo de amostras: C80 2

Parâmetro subjetivo: clareza

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Gráfico 5.6.6: Preferências para o grupo C80 1

Gráfico 5.6.7: Preferências para o grupo C80 2

A galeria do Teatro Municipal não recebeu nenhuma indicação de preferência.

Da mesma forma que na reverberação, os níveis intermediários de clareza também são os preferíveis, sendo que os valores ideais de C80 dependem da forma, do volume e do propósito ao qual a sala de destina.

Grupo de amostras: C80 3

Parâmetro subjetivo: clareza

Pergunta: “Qual é a mais clara ?”

[glinka_palco_tm_nor_C80_3] x [glinka_plateia_tm_nor_C80_3]

Tabela 5.6.4: Respostas do júri para o grupo C80 3

Grupo C80 3	
palco TM	14
platéia TM	2

Gráfico 5.6.8: Resultados das medições relativas aos grupo C80 3

Grupo de amostras: ITDG e RDR 1

Parâmetro subjetivo: intimismo

Pergunta: “Qual é a sala maior?”

[cello_plateia_lado_sc_nor_ITDGeRDR1] x [cello_balcão_sc_nor_ITDGeRDR1]

[cello_palco_sc_nor_ITDGeRDR1] x [cello_plateia_lado_sc_nor_ITDGeRDR1]

[cello_palco_sc_nor_ITDGeRDR1] x [cello_balcão_sc_nor_ITDGeRDR1]

Tabela 5.6.5: Respostas do júri para o grupo ITDG e RDR 1

Grupo ITDGeRDR1	
platéia SC	1
balcão SC	15
palco SC	2
platéia SC	14
palco SC	0
balcão SC	16

Tabela 5.6.6: Valores de RDR para o Teatro Sérgio Cardoso

RDR (SC)	
palco	88,52
platéia	61,08
balcão	28,340

Embora tenham sido gravadas no mesmo teatro (Sérgio Cardoso), as amostras referentes a menores valores de RDR deram a impressão de terem sido gravadas em salas maiores.

Grupo de amostras: ITDG e RDR 1

Parâmetro Subjetivo: intimismo

Pergunta: “Qual você prefere?”

Gráfico 5.6.9: Preferências para o grupo ITDG e RDR 1

Altos valores de RDR indicam que há bastante presença do(s) instrumento(s) e pouca presença da sala; por outro lado, baixos valores de RDR indicam pouca presença do instrumento e bastante presença da sala. Valores intermediários de RDR se mostraram os preferíveis.

As amostras do grupo ITDG e RDR 2 são apenas exemplos didáticos e não entraram na análise subjetiva.

Grupo de amostras: ITDG e RDR 3

Parâmetro Subjetivo: intimismo

Pergunta: “Qual a sala maior?”

[haendel_plateia_centro_me_nor_ITDGeRDR3] x

[haendel_plateia_lado_fundos_me_nor_ITDGeRDR3]

Tabela 5.6.7: Respostas do júri para o grupo ITDG e RDR 3

Grupo ITDGeRDR3	
fundos ME	15
centro ME	1

Tabela 5.6.8: Valores de RDR para o Memorial

RDR (ME)	
frente	67,005
fundos	26,33

Grupo de amostras: ITDG e RDR 4

Parâmetro Subjetivo: intimismo

Pergunta: “Qual a posição mais distante?”

[haendel_palco_td_nor_ITDGeRDR4] x [haendel_plateia_centro_td_nor_ITDGeRDR4]

Tabela 5.6.9: Respostas do júri para o grupo ITDG e RDR 4

Grupo ITDGeRDR4	
palco TD	3
platéia TD	13

Tabela 5.6.10: Valores de RDR para o Teatro de Diadema

RDR (TD)	
palco	80,880
platéia	63,100

Grupo de amostras: ITDG e RDR 5

Parâmetro Subjetivo: intimismo

Pergunta: “Qual a posição mais distante?”

[haendel_palco_sc_nor_ITDGeRDR5] x [haendel_plateia_centro_sc_nor_ITDGeRDR5]

Tabela 5.6.11: Respostas do júri para o grupo ITDG e RDR 5

Grupo ITDGeRDR5	
platéia SC	14
palco SC	1

Os valores de RDR do Sérgio Cardoso já constam na tabela 4.6.6. Observamos que da mesma forma que os valores menores de RDR geram a impressão de salas maiores, eles também dão impressão de maior distância entre fonte sonora e ouvinte. Notar que palco e platéia do Sérgio Cardoso foram comparados tanto no questionamento sobre volume de sala (ITDG e RDR 1) quanto sobre a distância (ITDG e RDR 5).

Grupo de amostras: BR e TR 1

Parâmetro Subjetivo: equilíbrio entre frequências

Pergunta: “Em qual amostra os graves sobram mais ?”

[strauss_plateia_centro_cg_nor_BReTR1] x [strauss_plateia_centro_td_nor_BReTR1]

[strauss_plateia_centro_cg_nor_BReTR1] x [strauss_plateia_lado_me_nor_BReTR1]

[strauss_plateia_lado_me_nor_BReTR1] x [strauss_plateia_centro_td_nor_BReTR1]

Tabela 5.6.12: Respostas do júri para o grupo BR e TR 1

Grupo BReTR1	
CG	2
TD	14
CG	4
ME	12
ME	7
TD	9

Gráfico 5.6.10: Resultado geral de BR e TR

Nota-se que, em termos de BR e TR, quanto mais distinta a situação entre dois teatros, maior o consenso entre os jurados na afirmação de qual é o teatro mais desequilibrado.

Grupo de amostras: BR e TR 1

Parâmetro Subjetivo: equilíbrio entre frequências

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Gráfico 5.6.11: Preferências para o grupo BR eTR 1

Grupo de amostras: BR e TR 2

Parâmetro Subjetivo: equilíbrio entre frequências

Pergunta: “Em qual amostra os graves sobram mais ?”

[strauss_plateia_lado_sp_nor_BReTR2] x [strauss_plateia_centro_td_nor_BReTR2]

[strauss_plateia_centro_tm_nor_BReTR2] x [strauss_plateia_centro_td_nor_BReTR2]

[strauss_plateia_lado_sp_nor_BReTR2] x [strauss_plateia_centro_tm_nor_BReTR2]

Tabela 5.6.13: Respostas do júri para o grupo BR e TR 2

Grupo BReTR2	
SP	3
TD	9
TM	7
TD	8
SP	3
TM	11

Grupo de amostras: BR e TR 2

Parâmetro Subjetivo: equilíbrio entre frequências

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Gráfico 5.6.12: Preferências para o grupo BR eTR 2

Grupo de amostras: BR e TR 3

Parâmetro Subjetivo: equilíbrio entre frequências

Pergunta: “Em qual amostra os graves sobram mais ?”

[bruckner_plateia_centro_sc_nor_BReTR3] x [bruckner_plateia_centro_tm_nor_BReTR3]

[bruckner_plateia_centro_cg_nor_BReTR3] x [bruckner_plateia_centro_sc_nor_BReTR3]

[bruckner_plateia_centro_tm_nor_BReTR3] x [bruckner_plateia_centro_cg_nor_BReTR3]

Tabela 5.6.14: Respostas do júri para o grupo BR e TR 3

Grupo BReTR3	
SC	16
TM	0
CG	1
SC	13
TM	9
CG	6

Grupo de amostras: BR e TR 3

Parâmetro Subjetivo: equilíbrio entre frequências

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Gráfico 5.6.13: Preferências para o grupo BR e TR 3

Observamos que existe uma clara preferência pelas situações de equilíbrio entre frequências, nas quais os valores de BR e de TR são aproximadamente iguais.

Grupo de amostras: TR 1

Parâmetro Subjetivo: brilho

Pergunta: “Qual é a mais opaca ?”

[strauss_plateia_lado_me_nor_TR1] x [strauss_plateia_centro_cg_nor_TR1]

Tabela 5.6.15: Respostas do júri para o grupo TR 1

Grupo TR1	
ME	12
CG	3

Grupo de amostras: TR 1

Parâmetro Subjetivo: brilho

Pergunta: “Qual você prefere ?”

Gráfico 5.6.14: Preferências para o grupo TR 1

Nota-se que a impressão de brilho acústico é altamente desejável.

Grupo de amostras: TR 2

Parâmetro Subjetivo: brilho

Pergunta: “Qual é a mais opaca ?”

[strauss_plateia_centro_tm_nor_TR2] x [strauss_balcão_tm_nor_TR2]

Tabela 5.6.16: Respostas do júri para o grupo TR 2

Grupo TR2	
balcão TM	12
platéia TM	4

Observamos que o consenso entre os juízes esteve quase sempre acima dos 80% requeridos pela metodologia, o que confirma a relação entre os parâmetros calculados e as impressões avaliadas, ratificando a pertinência de tais parâmetros como critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música.

Resumo das principais conclusões:

- RT60 se mantém razoavelmente constante para as várias posições de captação dentro de uma sala.
- A impressão de reverberação muda conforme a posição de audição dentro de uma sala, embora os valores de RT60 muitas vezes não acompanhem tal mudança.
- Além do RT60, o parâmetro razão de som direto / reverberante tem forte influência sobre a impressão de reverberação.
- O parâmetro BR não se mostrou bem correlacionado com a presença dos graves. Tal impressão é melhor correlacionada ao parâmetro G (*strength*) tomado nas baixas frequências.

- O parâmetro TR nem sempre foi um bom indicador de brilho.
- A utilidade dos parâmetros BR e TR se restringe à importância que eles apresentaram como critérios eficientes para a avaliação do equilíbrio entre frequências dentro de uma sala.
- O parâmetro razão direto / reverberante se mostrou mais estável e coerente do que o ITDG, no que diz respeito à impressão de intimismo.
- Ao contrário do RT60, o parâmetro C80 sofre forte variação conforme o local de captação na sala.
- O parâmetro C80 é muito melhor correlacionado ao EDT (*early decay time*) do que ao RT60.

5.7 Síntese dos parâmetros

Após o estudo aprofundado das características de cada parâmetro acústico, estamos em condições de sintetizá-los em três grupos genéricos:

Tabela 5.7.1: Síntese dos parâmetros acústicos

Grupo Temporal	Grupo Espacial	Grupo de Intensidade
RT60	LFC	G
BR e TR		
C80		
ITDG		
RDR		
ST1		
	IACC	

Em nosso trabalho nos concentramos nas medições e na análise subjetiva a respeito do grupo temporal, que sendo o mais complexo, sugere maior campo de pesquisa, uma vez

que os outros parâmetros já estão assegurados no que se refere à conceituação, independência e margem ideal de valores.

Já houve tentativas (Ando, 1998) de se reduzir os grupos de parâmetros. Essa intenção recai principalmente sobre o grupo temporal cujos parâmetros apresentam uma intrincada rede de relações, na qual constata-se uma área de intersecção entre certos parâmetros, porém cada um deles vai até onde nenhum outro chega. Daí a complexidade em se alcançar uma ortogonalização geral entre os parâmetros. Mais importante, porém, do que tornar a teoria elegante do ponto de vista matemático, é torná-la eficaz do ponto de vista acústico.

Tomando como objetivo principal a garantia de uma boa acústica, a decisão científica mais segura, no atual estado da arte, é a de se levar em consideração todos os parâmetros aqui analisados.

5.8 Considerações finais

Todas as metas iniciais foram cumpridas. Isso só foi possível graças a um grupo de trabalho (Projeto Temático ACMUS - FAPESP) no qual todos os integrantes se mostraram igualmente competentes e responsáveis, promovendo um ambiente de sinergia a partir do qual não se poderia esperar outro resultado que não o sucesso.

A bagagem de conhecimentos acumulada ao longo desses anos nos deixa aptos e confiantes a enfrentar novos desafios.

Concluimos este trabalho com a certeza de que ele será apenas o primeiro de uma frutífera seqüência.

Referências Bibliográficas

- ANDO, Yoichi. *Architectural Acoustics*. New York: Springer, 1998.
- ANDO, Y., YAMAMURA, M. *Subjective preference tests for sound fields in concert halls simulated by the aid of computer*. J. Sound Vib., vol 65, 229-239, 1979.
- ARRUDA, F., GUEDES, R. *A influência da direcionalidade de fontes sonoras na avaliação experimental da qualidade acústica de salas*. XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Belo Horizonte, 2000.
- BARRON, M. *The Subjective Effects of the First Reflections in Concert Halls – The Need for Lateral Reflections* J. Sound Vib.Vol.15, 475-494, 1971.
- BARRON, M., MARSHALL, A.H., *Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of physical measure*. J. Sound Vibration, vol.77,p211,1981 .
- BARRON, M. *Subjective study of British symphony concert halls*. Acustica, vol 66, pp.1-14, 1988.
- BAXA, D., SEIREG, A. *The use of quantitative criteria for the optimum design of concert halls* J. Acoust. Soc. Am. Vol.67, 2045-2054, 1980.
- BERANEK, L. *Music,Acoustics & Architecture*. London: Wiley, 1962.
- BERANEK, Leo. *Acoustics and concert halls*. New York: Acoustical Society of America, vol 57, 1975.
- BERANEK, L. *Concert and Opera Halls. How they sound*. New York: Acoustical Society of America, 1996.
- BERANEK, L. *Concert Halls and Operas Houses: Music, Acoustics and Architecture*. New York: Springer-Verlag, 2004.
- BERKHOUT, D. et.al. *A new method to acquire impulse responses in concert halls* J. Acoust. Soc. Am. Vol.68, 179-183, 1980.
- BLEAKLEY, C., SCAIFE, R. *New formulas for predicting the accuracy of acoustical measurements made in noisy environments using the averaged m-sequence correlation technique* J. Acoust.Soc. Am. Vol. 97(2) February 1995.
- BORISH, J. ANGELL, J.B., *An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise* J. Audio Eng. Soc. Vol. 31, No. 7 1983.

BRADLEY, J.S. *Auditorium acoustics measures from pistol shots* J. Acoust. Soc. Am. Vol.80, 199-205, 1986.

BRADLEY, J.S. *Optimizing the Decay Range in Room Acoustics Measurements using Maximum-Length-Sequence Techniques* J. Audio Eng. Soc. Vol. 44, No. 4 1996.

CHIAN, W., HUANG, J. *Subjective Evaluation of Acoustical Environments for Solo Performance*. Building Acoustics. London: Multi-Science, 1999.

CHU, W.T. *Eingemode analysis of the interference patterns in reverberant sound fields* J. Acoust. Soc. Am. vol.68, 184-190, 1980.

CHU, W.T. *Impulse Response and Reverberation Decay Measurements Made by Using a Periodic Pseudorandom Sequence* Applied Acoustics Vol.29, 193-205, 1990.

CREMER, L., SCHULTZ, T. *Principle and Applications of Room Acoustics*. London: Applied Science, 1978.

D'ANTONIO, P. *Minimizing Acoustic Distortion in Project Studios*, RPG Diffusor Systems, Inc.

DUNN, C., HAWKSFORD, M.O. *Distortion Immunity of MLS-Derived Impulse Response Measurements*. J. Audio Eng. Soc. Vol. 41, No. 5 1993.

FARINA, A. *Simultaneous Measurements of Impulse Response and Distortion with a Swept Sine Technique* AES Conference, França, 2000.

FARINA, A. et al. *Acoustic Quality of Theaters: Correlation Between Experimental Measures and Subjective Evaluation*. Applied Acoustics, Vol. 62, 889-916, 2001.

FARINA, A., RIGHINI, F. *Software implementation of an MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering* [HTTP://pcfarina.eng.unipr.it](http://pcfarina.eng.unipr.it)

GADE, A. C., *Investigation of musicians' room acoustic condition in concert halls, part I*. Acustica vol.69, p193, 1989.

GALINDO, M., GIRON, S. *Clarity and Definition in Mudejar-Gotic Churches*. Building Acoustics. London: Multi-Sciences, 1999.

GINN. *Architectural Acoustics*. Naerum: Bruel & Kjaer, 1978.

GOMES, M., GERGES, S. *Modelling of Room Acoustic Parameters Using MLS Technique and Numerical Simulation* IBPSA Conference, Rio de Janeiro, 2001.

GUIMARÃES, G., HERRERA, C. *A Method for the Evaluation of the Acoustics of Auditoriums*. Belo Horizonte: UFMG.

HARMAN, H. N., *Modern factor analysis*. University of Chicago press, Chicago, 1968.

HAWKES, R., DOUGLAS, H. *Subjective Acoustics Experiences in Concert Auditoria*. Acustica, vol 25(5), 236-250, 1971.

HENRIQUE, L. *Acústica Musical*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2002.

HULBERT, G., BAXA, D., SEIREG, A. *Criterion for quantitative rating and optimum design of concert halls* J. Acoust. Soc. Am. Vol.71, 619-629, 1982.

HUTCHINS, C. *Musical Acoustics*. New York: Hastled, 1975.

ISO 3382 *Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997.

JORDAN, L. *Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques* J. Acoust. Soc. Am. Vol 47, 408-412 ,1970.

JORDAN, V.L. *Auditoria Acoustics: Development in Recent Years* Applied Acoustics Vol.8, 217-235,1975.

JORDAN, V.L. *A Group of Objective Criteria for Concert Halls* Applied Acoustics Vol.14, 253-266, 1981.

KINSLER, L. *Foundamental of Acoustics*. New York: Wiley, 1962.

KNUDSEN, V. *Architectural Acoustics*. New York: Wiley, 1932.

KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. London: Elsevier Applied Science, 1991.

LINDSAY, R. *Acoustics: Historical and Philosophical Development*. Dowden: Hutchinson&Ross, 1972.

LUNDEBY, A., VIGRAN, T.E. et al. *Uncertainties of Measurements in Room Acoustics* Acustica Vol.81 1995.

MALAFIA, S., TENEMBAUM, R. *Estudo psicoacústico dos parâmetros utilizados para caracterizar a qualidade acústica de salas de concerto*. Belo Horizonte: SOBRAC, 2000.

MARSHALL, A. H. *Note of the importance of room cross-section in concert halls*. J. Sound Vib., vol 5, 365, 1967.

MASIERO, B., *Estudo e Implementação de Métodos de Medição e Resposta Impulsiva em Salas de Pequeno Porte*, Relatório Técnico - Fapesp, at <http://gsd.ime.usp.br/acmus/public.html> , 2004.

MEYER, E. *Definition and Difusion in Rooms* J. Acoust. Soc. Am. Vol 26, 630-636, 1954.

MEYER, J. *Acoustics and Performance of Music*. Frankfurt: Verlag , 1980.

MEYER, J., *The Sound of the Orchestra*, J. Audio Eng. Soc., vol 41, 203-213, 1993.

MOLLER, H. *Fundamentals of binaural technology* Applied acoustics, vol. 36, 171-218, 1992.

MORSE, P. *Theoretical Acoustics*. New York: McGraw-Hill, 1968.

MÜLLER, SWEN *Criação de Varreduras com Ênfase Arbitrária*, INMETRO, Rio de Janeiro.

MÜLLER, S., MASSARANI, P., “*Transfer Function Measurements with Sweeps*”. J.AES, Vol. 49, number 6, pp.443. 2001.

NICKSON, A., MUNCEY, R. *Criteria for Room Acoustics* J. Sound Vib.Vol.3, 292-297, 1964.

PASQUALI, L. *Elaboração de Instrumentos Psicológicos*. São Paulo: Casa do Psicólogo, 1999.

POLACK, J.D. *Playing Billiards in the Concert Hall: The Mathematical Foundations of Geometrical Room Acoustics* Applied Acoustics Vol.38, 235-244, 1993.

RIFE, D. *Modulation Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences* J. Audio Eng. Soc. Vol. 40, No. 10 1992.

SAMPAIO, R., *Aplicações da Teoria dos Números em Acústica: Técnica de MLS e Difusores*. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado – Eng. Mecânica – UFRJ, 1998.

SANDRO, R., ARRUDA, J. *Violin quality assessment with an objective criterion using the Constant-Q Transform*. UNICAMP, 2000.

SCHROEDER, M. *New Method of Measuring Reverberation Time*. New York: Acoustical Society of America, vol 37, 409-412, 1965.

SCHROEDER, M. et.al. *Acoustical Measurements in Philharmonic Hall* J. Acoust. Soc. Am. Vol 40, 434-440, 1966.

SCHROEDER, M., SIEBRASSE, K. *Comparative study of European halls: correlation of subjective preference with geometrie and acoustics parameters*. Acoustical Society of America, vol 56, 1195-1201, 1974.

SCHROEDER, M. *Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion* J. Acoust. Soc. Am. Vol 65, 958-963, 1979.

SCHROEDER, M.R. *Integrated-Impulse method measuring sound decay without using impulses* J.Acoust. Soc. Am. Vol. 66(2) ,497-500, 1979.

SCHROEDER, M. *Acoustics in human communications: Room acoustics, music and speech* J. Acoust. Soc. Am. Vol.68, 22-28, 1980.

SOMERVILLE, T. *Empirical Acoustic Criterion*. Acustica, vol 3, 1953.

UEDA, L., IAZZETTA, F., KON, F. *An open-source platform for Musical Room Acoustics Research* . Proceedings of the 2005 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, August 2005.

VANDERKOOY, J. *Aspects of MLS Measuring Systems* J. Audio Eng. Soc. Vol. 42, No. 4 1994.

VORLANDER, M., KOB, M. *Practical Aspects of MLS Measurements in Building Acoustics* Applied Acoustics Vol. 52 1997.

WILKENS, H., PLENGE, G. *The correlation between subjective and objective data of concert halls*. Auditorium Acoustics. London: Applied Science, 1974.

YAMAGUCHI, K. *Multivariate Analysis of Subjective and Physical Measures of Hall Acoustics* J. Acoust. Soc. Am. Vol.52, 1271-1279, 1972.

APÊNDICE - A acústica de salas na História da Música

Acusticamente, o período Barroco apresentava dois divergentes espaços para performance: um altamente reverberante e outro com bastante clareza e pouco preenchimento sonoro.

A música instrumental barroca era tocada em salas secas, com bastante intimismo, em câmaras retangulares de palácios, por exemplo, ou em pequenos teatros. As salas apresentavam paredes rígidas e refletoras, ainda que o tempo de reverberação não passasse de 1,5 s. Ainda hoje, existe a preferência para se ouvir esse tipo de música em ambientes pequenos e com baixo tempo de reverberação.

Os espaços que o Barroco dispunha para música sacra eram bastante diversos, oferecendo aos compositores um leque de desafios e possibilidades. Bach foi o compositor que melhor soube explorar esses espaços. Muitas igrejas importantes naquela época eram bastante grandes e altamente reverberantes, por outro lado, uma boa parte da música sacra desse período foi escrita para execução privada em ambientes com baixo tempo de reverberação.

Durante o mesmo período, as igrejas luteranas se espalhavam, e seu público ocupava tanto a platéia quando os balcões. A acústica era mais clara e menos reverberante que a das catedrais medievais. Bach compôs corais especificamente para esse ambiente, como é o caso da Missa em Si menor e da Paixão segundo São Mateus.

No período Clássico houve um crescente interesse pela música de concerto. As audições públicas estavam em voga e compositores se adaptaram a essa nova realidade. Caracteristicamente, o período Clássico abandonava o contraponto, e produzia obras que exigiam maior preenchimento sonoro.

Entretanto, na segunda metade do século XVIII, a maioria das salas não estava adaptada a essa nova tendência. As salas de Viena e de Leipzig não costumavam abrigar mais do que 400 pessoas, e os tempos de reverberação estavam entre 1,3s e 1,5s. Isso quer dizer que naquela época as pessoas escutavam Beethoven de maneira muito diferente da que nós escutamos hoje, em salas para 1500 pessoas com tempo de reverberação frequentemente maior do que 2s.

Somente em meados do século XIX, salas maiores começaram a ser construídas especificamente para música de concerto. Essas salas já tinham um tempo de reverberação bem maior.

Por exemplo, a antiga *Boston Music Hall*, inaugurada em 1863, tinha um formato retangular e uma lotação de 2400 pessoas com tempo de reverberação superior a 1,8 s, quando cheia. A Gewandhaus em Leipzig, concluída em 1886, e destruída na segunda guerra mundial, tinha 1560 lugares e um tempo de reverberação de 1,6 s.

Essas salas eram retangulares e estreitas de modo a permitir um bom preenchimento sonoro, mas ao mesmo tempo preservavam a clareza necessária para a música do Classicismo.

Hoje em dia, o tempo de reverberação preferencial para a música do período Clássico está justamente nessa faixa de valores das antigas salas de Leipzig, Oxford e Viena.

Mais uma vez chamamos a atenção para o caso notável de Beethoven, que morreu em 1827, mas a julgar pelas suas últimas sinfonias, ele de fato parecia antever a transformação da realidade acústica que ocorreria nos próximos 150 anos. A evolução de sua obra parecia apontar essa tendência. Basta considerar a sua primeira sinfonia, que pode soar muito bem nas salas modestas do início do período Clássico, porém sua nona sinfonia só revela todas as suas dimensões no ambiente de uma grande sala de concerto.

No período Romântico os compositores criaram um volume de obras que, juntamente com as sinfonias do período Clássico, formam a parte preponderante do repertório que se costuma escutar hoje na salas de concerto.

A música desse período, ricamente orquestral, exige grande preenchimento sonoro e permite baixa clareza, quando em comparação com o período Clássico. Maestros e instrumentistas confirmam a preferência de 1,9s a 2,1s no tempo de reverberação para esse tipo de repertório. Também é característica a preferência por uma baixa razão entre som direto e reverberante.

Muitas vezes os compositores desse período escreviam tendo uma sala específica em mente. Por exemplo, Wagner compôs *Parsifal* para o seu *Festspielhaus*, em Bayreuth; e Berlioz escreveu seu *Requiem* para *Les Invalides*, em Paris.

A célebre *Grosser Musikvereinssaal* foi inaugurada nesse período (1870) apresentando um tempo de reverberação de 2s, quando ocupada. O seu tamanho não muito grande, quando em comparação com outras salas nas modernas, permite que um *fortissimo* soe de fato de forma bastante intensa em toda a sala, e por ser uma sala estreita enfatiza as primeiras reflexões conferindo definição e espacialidade à música.

A Concertgebouw de Amsterdã, concluída em 1887, também tem um tempo de reverberação de 2s, porém é muito mais larga que a de Viena, o que diminui a clareza e enfatiza o preenchimento sonoro. A sala de Amsterdã é ideal para as últimas obras do Romantismo.